

修士論文

MANETにおける
ネットワークトポロジの変化に応じた
相互切替を行うブロードキャスト方式

平成 30 年度修了

三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 情報工学専攻

川北 優

目次

はじめに	1
第1章 MANET	2
1.1 MANET	2
1.2 フラッディング	3
1.3 ネットワークコーディング	4
1.4 ランダムネットワークコーディング	6
第2章 関連研究	7
2.1 隣接端末の移動性を利用した動的転送制御	7
2.1.1 移動性判定	8
2.1.2 切り替えアルゴリズム	9
2.1.3 問題点	10
第3章 提案手法	11
3.1 ランダムネットワークコーディングの適合性判定	12
3.1.1 再送処理を利用して判定する手法	12
3.1.2 復号状況を利用して判定する手法	13
3.2 提案手法におけるノードの移動性判定	15
3.3 相互切り替えアルゴリズム	16
3.3.1 フラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替え	16
3.3.2 ランダムネットワークコーディングからフラッディングへの切り替え	17
第4章 実験	18
4.1 実験概要	18
4.2 実験結果1	20

4.2.1	実験結果 2	23
4.2.2	実験結果 3	25
	おわりに	27
	謝辞	28
	参考文献	29

はじめに

現代において誰でもどこでも快適にネットワークで繋がることは当たり前のようになっている。総務省の調査では 2017 年の個人のインターネット利用率は 80.9 %。また端末別のインターネット利用率はスマートフォンが 59.7 % と最も高く、パソコンの 52.5 % の利用率を上回っており、多くの人々がスマートフォンで無線通信によりネットワークを利用している [1]。そのためネットワークが利用できない状況は大きな混乱を招くことがある。2011 年 3 月の東日本大震災においては地震や津波の影響により情報通信インフラ設備に甚大な被害が発生し、情報通信機器が使用できなくなった。固定通信、移動通信共に復旧したのは 4 月末までかかった。このような事態に対処するために実用化が期待されているのがモバイルアドホックネットワーク (以下、MANET) である。

MANET は基地局などの情報通信インフラ設備に依存することなく、スマートフォンなどのモバイル端末のみでネットワークを構築することが可能である。MANET では災害時の安否情報や復旧状況配信などの情報配信をするためにネットワーク上の全ての端末に送信するブロードキャストが必要となる。しかし、MANET は通信の信頼性が低いこと、ネットワークを構成するモバイル端末のバッテリー容量が有限であることなどの課題から実用化の例は多くない。この問題を解決するためにフラッディングからネットワークコーディングに切り替えて転送する手法が提案されている [5]。これは通信の信頼性が高いフラッディングからパケット削減効果の高いネットワークコーディングに各中継ノードが周辺状況に基づいて切り替える手法である。しかし、フラッディングからネットワークコーディングへの単方向しか切り替えを行わないため、切り替え後に端末の移動によってネットワークコーディングが適合しないネットワークトポロジに変化した後も、ネットワークコーディングを使用し続けてしまうという問題がある。

本研究では、ネットワークコーディングの一種であり、ネットワークトポロジに依存しないランダムネットワークコーディングを用いて、フラッディングからランダムネットワークコーディングに切り替えるだけでなく、ランダムネットワークコーディングからフラッディングにも切り替える、相互切り替えを行うブロードキャスト方式を提案する。具体的にはランダムネットワークコーディングからフラッディングに切り替えるためにランダムネットワークコーディングのネットワークトポロジへの適合性を判断する 2 つの手法を提案する。

本稿では、第 1 章で MANET の概要とブロードキャスト方式について述べる。第 2 章で関連研究を紹介し、第 3 章で提案手法について説明する。第 4 章で実験と考察を行う。

第 1 章

MANET

本章では、はじめに MANET について説明した後、MANET におけるブロードキャストを行う手法 [2,3] を紹介する。

1.1 MANET

MANET とはスマートフォン等の移動可能なモバイル端末で構成されるネットワークのことである。図 1 に示すように、モバイル端末同士で自律的にネットワークを構成するため、基地局などの情報通信インフラに依存しないという特徴がある。そのため、災害などで通信インフラが崩壊した非常時の通信手段として利用されることが期待されている。しかし、移動可能な端末を用いるため、通信リンクの生成・切断が頻繁に発生する。そのため、ネットワークトポロジの頻繁な変化に適応的に対応することが求められている。また、スマートフォン等の移動可能な端末のバッテリー容量は有限である。これらの技術的課題から MANET の実用化の例は多くない。そのため、MANET でのブロードキャストにおいて不要なパケット転送の削減によって電力の浪費を抑えつつ、通信の信頼性を低下させないことが求められている。

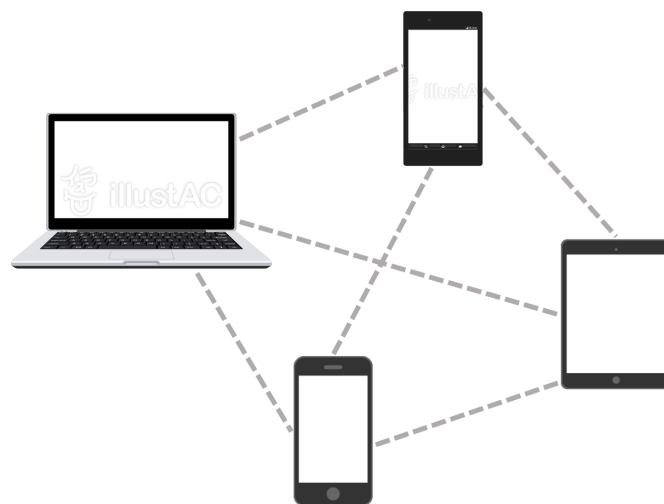


図 1 MANET

1.2 フラッディング

MANET でのブロードキャストにおいて一般に用いられる方式。図 2 に示すように、中継ノードは受信したパケットを複製し、通信可能な全ての隣接ノードに送信する。そのため、フラッディング方式は膨大な数の複製されたパケットを生成してしまい、ネットワーク内にパケットが溢れてしまう。その結果、パケットの競合や衝突による通信の信頼性の低下や冗長なパケット転送による端末電力の浪費が発生するという問題がある。

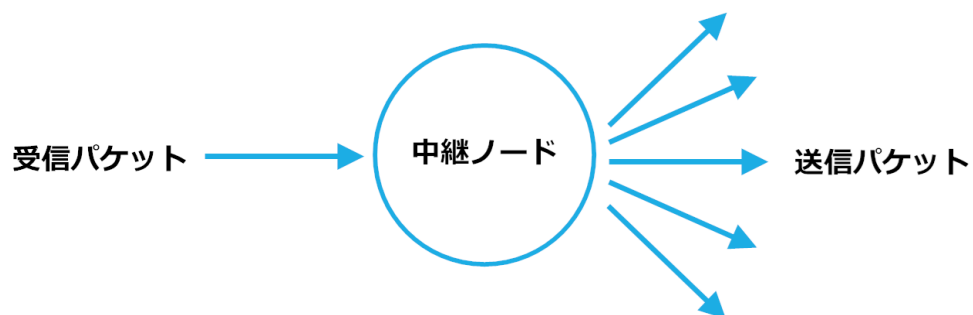


図 2 フラッディング

1.3 ネットワークコーディング

図3に示すように，各中継ノードでパケットを符号化することでネットワーク内を流れるパケットを削減するネットワークコーディング方式が研究されている．本論文では，ネットワークコーディングの中でも線形ネットワークコーディングについて説明する．

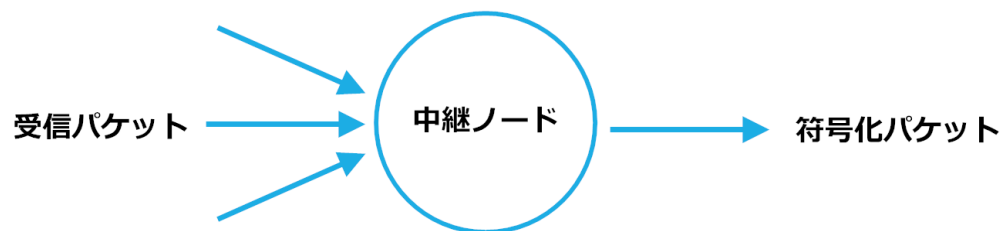


図3 ネットワークコーディング

線形ネットワークコーディングでは，事前にネットワークトポロジに応じて重複することのないように各中継ノードに符号化ベクトルが割り当てられる．各中継ノードは図4に示すように，複数の入力パケットと符号化ベクトルで線形演算を行い，単一のパケットに符号化する．この時符号化する入力パケットの数を符号化数という．そして各受信ノードは復号処理を行って元のパケットを得る．パケット同士の演算はパケットを有限体とみなして演算を行う．

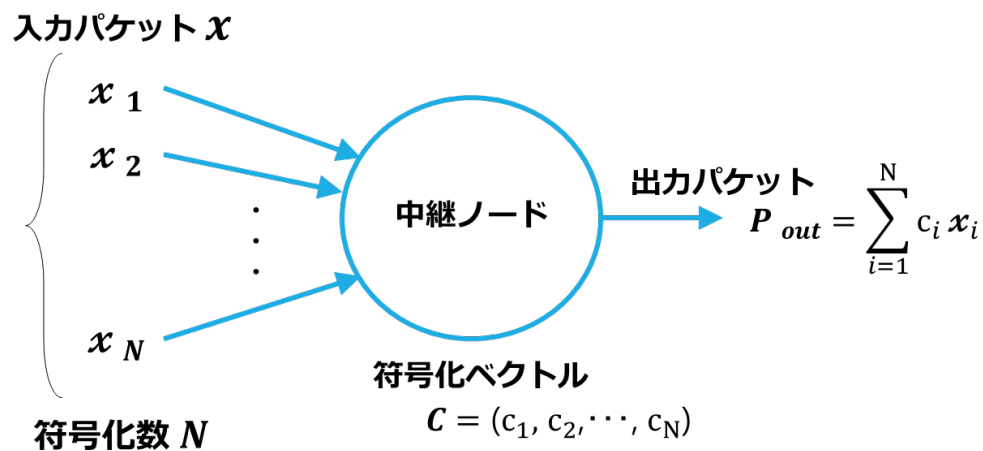


図 4 線形ネットワークコーディング

端末の移動によってトポロジが変化する MANET において、フラッディング方式を用いることで高い通信の信頼性を実現できるが、冗長な packet 転送によってブロードキャストストーム問題が発生する。そこでネットワークコーディング [2] を用いて、複数の packet を線形演算によって単一の packet に符号化することで、この問題を解決できる。しかし、符号化された元の packet を取得するための復号処理が各受信ノードで必要になる。復号処理を成功させるためには十分な数の符号化 packet を収集しなければならない。MANET では端末が移動するため、トポロジの変化によっては通信リンクの切断などにより十分に符号化 packet を収集できず、通信の信頼性が低下することがある。また、復号処理に失敗した時は、各中継ノードが復号処理に必要な packet を収集するための再送要求を周辺ノードに対してブロードキャストするため、再送処理による packet 数の増加が符号化によって削減された packet 数を上回ることがある。

1.4 ランダムネットワークコーディング

線形ネットワークコーディングでは符号化ベクトルを用いて線形演算を行い、複数のパケットを単一のパケットに符号化する。この時用いる符号化ベクトルは、予め適切に割り当てられる必要がある。しかし、MANETのように移動性のあるネットワークでは、ネットワークトポロジが頻繁に変化するため、それに応じて符号化ベクトルを再度割り当てる必要があり現実的ではない。そこで各中継ノードで自律分散的に符号化ベクトルを生成するランダムネットワークコーディングが研究されている。ランダムネットワークコーディングでは事前に適切に符号化ベクトルを割り当てている従来のネットワークコーディングに比べて、ランダムに符号化ベクトルを割り当てるため逆行列が存在しない場合には受信ノードで復号に失敗する可能性がある。ランダムネットワークコーディングは物理層、ネットワーク層、アプリケーション層の様々な層で実装が可能であるが、本研究ではアプリケーション層でのランダムネットワークコーディングの実装を考える。

第 2 章

関連研究

本章では、MANET でのマルチキャストにおいてフラディングからネットワークコーディングに切り替える転送制御を行う手法 [5] を紹介し、その問題点について述べる。


2.1 隣接端末の移動性を利用した動的転送制御

MANET は自律的にネットワークを構築する。そのため、構築されるネットワークのトポロジは常に異なる。フラディングやネットワークコーディングといった従来の転送方式では、パフォーマンスがネットワークトポロジに依存するため、あらゆるネットワークトポロジに対応する転送方式が求められる。フラディングでは無数の複製した通常の packets を転送するため通信の信頼性が高いが、冗長な packet 転送が繰り返されるため電力の浪費などネットワークに負荷がかかる。一方でネットワークコーディングを用いることで packet 数を削減し、ネットワークへの負荷を抑制することができる。しかし、ネットワークコーディングを用いた場合、符号化 packet を復号するための packet が収集できず、目的の packet を復号することができないことがある。そのため、ネットワークへの負荷と通信の信頼性はトレードオフの関係にある。ネットワークへの負荷はネットワーク内を流れる総 packet 数で考えることができる。また、アドホックネットワークにおいてノードの移動性に依存してネットワークコーディングの有効性は変化する [4]。そこで、ノードの移動性に応じてフラディングからネットワークコーディングに転送方式を切り替える手法が提案されている [5]。適切に切り替えを行うことで、通信の信頼性が高いフラディングと packet の削減効果の高いネットワークコーディングの両方の利点を活かすことができる。

2.1.1 移動性判定

この手法 [5] では、隣接ノードの移動性を評価し、その結果に従い、フラッディングからネットワークコーディングに切り替える。移動性の評価を行うために、各中継ノードは図 5 に示す例のような受信履歴を作成する。受信履歴に中継元情報と受信時刻をパケットを受信するたびに記録する。受信履歴から抽出された最新 t 秒以内の k 回の履歴情報を参考履歴とし、 k 回分の参考履歴内の転送するパケットの中継元 i と一致する中継元情報の履歴数をカウントする。 k は周辺ノードが多く、パケット受信頻度が高い中継ノードでは大きな値になる。一方で周辺ノードが少なく、パケット受信頻度が低い中継ノードでは k は小さな値となる。次に、転送方式を動的に制御するためのパラメータ x を用いてカウントした中継元と一致する履歴数が $k \times x$ 以上の場合には中継元が静的であると判断する。 $k \times x$ 未満の場合は動的であると判断する。 x は 0 以上 1 以下の実数で周辺ノードの移動性を判断するための閾値として用い、文献では事前実験によって求められた最適値を使用し、 $x = 0.67$ と定めている。また、受信履歴から参考履歴を抽出する範囲 t を $t = 10$ と定めている。

中継元 情報	3	3	5	5	4	5	5	5	3	5	...
受信時刻	60.0	59.5	58.7	57.0	54.2	53.1	52.3	49.2	48.5	47.9	...



参考履歴(k回)

図 5 受信履歴の例

2.1.2 切り替えアルゴリズム

既存手法における切り替えアルゴリズムを図6に示す。中継ノードは、フラッディングによって送信された通常の packets を受信した時、移動性の評価を行い、転送方式を決定する。中継ノードが中継元ノードを動的であると判断した場合は、受信した packets を即時にそのまま中継するフラッディングを行う。静的であると判断した場合は、ネットワークコーディングを行うため、符号化に必要な複数の packets を受信するまで待機する。また、中継ノードで受信した packets が符号化された packets であった場合には、中継元ノードの移動性に関わらず復号に必要な packets の収集が完了するまで待機し、収集ができ次第復号処理を行う。

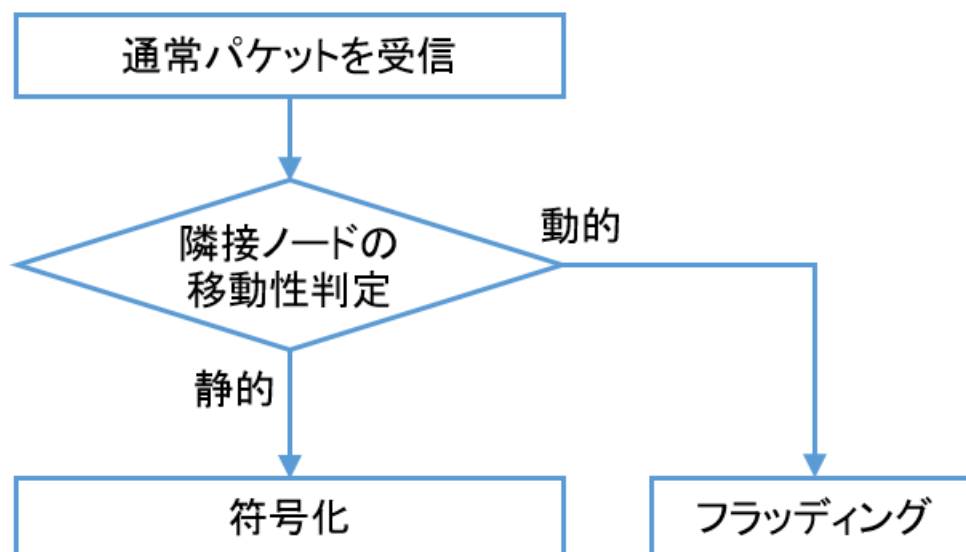


図6 フラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替え

2.1.3 問題点

フラッピングからネットワークコーディングへの切り替えにおいて、ネットワークコーディングを適用することで得られるパケット数の削減量が、復号処理の失敗により発生する再送処理によって増加するパケット数を上回っていることが非常に重要である。しかし、既存手法ではフラッピングからネットワークコーディングの単方向しか切り替えを行わないため、切り替え後にネットワークトポロジが変化してもネットワークコーディングを用いて転送し続けてしまう。ネットワークコーディングが適合性しない状況において、復号するための十分なパケットを収集できないため、再送処理が行われる可能性が高い。そのため、再送処理によって引き起こされるパケット数の増加がネットワークコーディングによって削減されるパケット数を上回ってしまうと、ネットワークコーディングを用いることでかえってネットワーク内を流れる総パケット数が増加してしまう。

第 3 章

提案手法

第 2.1.3 項で述べた既存手法の問題点を解決するために，MANET でのブロードキャストにおいて，ネットワークコーディングの適合性を用いて，フラッディングとネットワークコーディングを相互に切り替える手法を提案する．本研究では，ネットワークコーディングの一種で，ネットワークトポロジに依存しないランダムネットワークコーディングを用いる．既存手法 [5] では隣接端末の移動性を用いてフラッディングからネットワークコーディングに切り替えを行っているのに対して，提案手法ではランダムネットワークコーディングが適合していない状況であるかを判定し，フラッディングからランダムネットワークコーディングだけでなく，ランダムネットワークコーディングからフラッディングにも切り替えを行う．相互に切り替えを行うことで切り替え後のネットワークトポロジの変化に対応する．本章では，まず，ランダムネットワークコーディングが適合していない状況を再送処理を利用して判定する手法と復号状況を利用して判定する手法の 2 つの手法について述べる．そして，提案手法におけるフラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替えに用いる移動性判定とランダムネットワークコーディングの適合性判定を用いたフラッディングとランダムネットワークコーディングの相互切り替えアルゴリズムについて説明する．

3.1 ランダムネットワークコーディングの適合性判定

3.1.1 再送処理を利用して判定する手法

ランダムネットワークコーディングにおいて符号化されたパケットから元のパケットを得るために復号処理を行う必要がある。ランダムネットワークコーディングが適合する状況であれば問題なく十分な符号化パケットを収集することができるため、復号処理は成功する。

一方で、図7に示すような状況では中継ノードCがランダムネットワークコーディングを用いて符号化パケットを転送する場合、下流側の中継ノードDはただ一つの上流ノードしか持たず、符号化パケットを十分に収集することが困難である。そのため、中継ノードDは周辺ノードに対して再送要求パケットを送信する。このように下流側からの再送要求パケットを受信した中継ノードCは自身の近隣のネットワークポロジがランダムネットワークコーディングによるパケット転送が適合しないと推測できる。このようにして、再送要求パケットの受信履歴を用いてランダムネットワークコーディングの適合性を判定する。

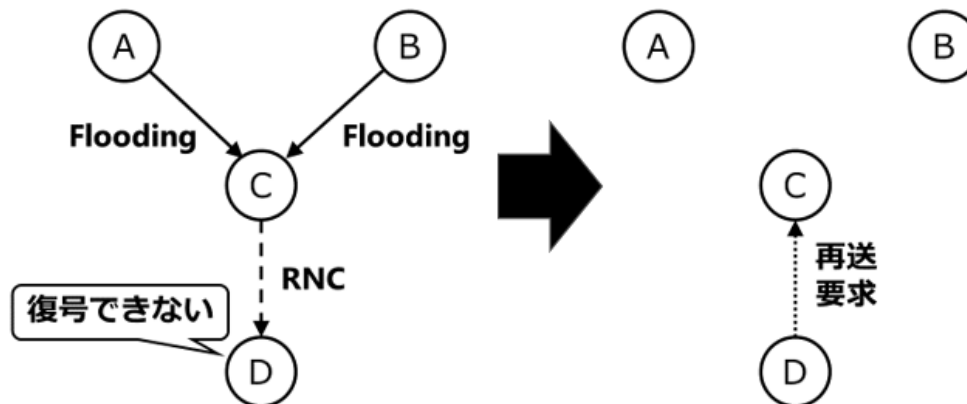


図7 RNCが適合しない状況

本手法では、ネットワーク内を流れるパケットを通常パケット、符号化パケット、再送要求パケット、再送応答パケットの4種類に分類する。そして、各中継ノードで受信履歴を作成し、中継元情報、受信時刻、パケットの種類、ホップ数を記録する。受信履歴から最新2秒以内の履歴情報を参考履歴とし、参考履歴内に下流側の中継ノードから再送要求パケットを受信した履歴があれば中継ノードの周辺状況はランダムネットワークコーディングが適合しないと判断する。下流側の中継ノードから再送要求パケットを受信した履歴がなければ中継ノードでの周辺状況はランダムネットワークコーディングが適合すると判断する。

3.1.2 復号状況を利用して判定する手法

符号化されたパケットから元のパケットを得るためには復号処理を行う必要がある。この復号処理は符号化パケットだけ、あるいは通常パケットを標準基底で符号化された符号化パケットに変換して行うことができる。ランダムネットワークコーディングが適合する状況では十分に符号化パケットを収集できるため、符号化パケットだけで復号処理を行うことができる。

一方で、図8に示すような状況では上位に符号化パケットを送信するノードが少ないため、中継ノードBは十分に符号化パケットを収集することができない。この時、中継ノードBは既に受信した通常パケットを変換して復号処理を試みる。そして復号に成功した場合には第3.1.1項の手法で適合性を判定し、転送方式を決定する。もしランダムネットワークコーディングで転送を行った場合に中継ノードCで復号するためには中継ノードDが中継ノードCにパケットを転送していなければならない。中継ノードBが符号化パケットを十分に収集できない場合、隣接ノードである中継ノードDも中継ノードBと同様に上位に符号化パケットを送信するノードが少ないと考えられる。その結果、中継ノードDがパケットを転送しなければ、中継ノードCは十分に符号化パケットを収集できないため、復号に失敗する。

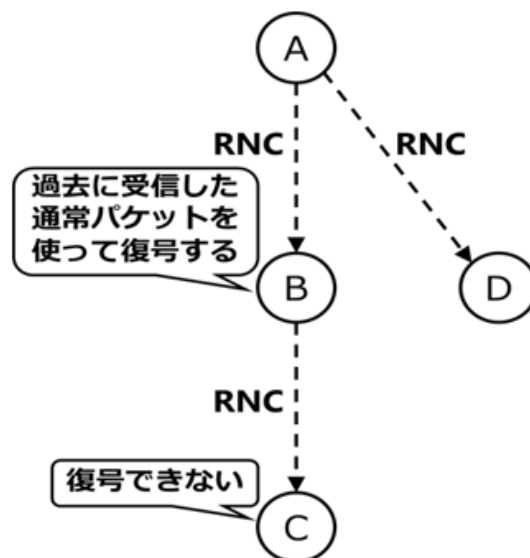


図8 RNCが適合しない状況

図 8 の中継ノード B のように、通常パケットを利用した復号処理を行った中継ノードはランダムネットワークコーディングによるパケット転送を行っても中継先ノードが符号化パケットを十分に収集することが困難であるため、中継ノードではランダムネットワークコーディングによるパケット転送が適しないと推測できる。このようにして、復号処理が行われる状況を利用してランダムネットワークコーディングの適合性を判定する。

本手法では、符号化パケットを最後に受信してから 2 秒経過した時に、それまでに受信した復号ができていない符号化パケットに対して通常パケットを用いた復号処理を行う。復号に成功した場合でも、通常パケットを用いているため、ランダムネットワークコーディングを用いた転送がネットワークポロジに適合していないと判断する。

3.2 提案手法におけるノードの移動性判定

提案手法のランダムネットワークコーディングの適合性判定を用いてランダムネットワークコーディングからフラッディングへの切り替えを行うためには、既にフラッディングからランダムネットワークコーディングに切り替えが行われている必要がある。フラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替え回数が多いほどパケット削減効果も大きいですが、安易な切り替えは復号処理の失敗を招き、パケット配送率の低下と再送処理によるパケット数の増加を引き起こす。この問題はランダムネットワークコーディングが適合しない状況ではフラッディングに切り替えを行うことで解決できる。また、フラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替えが少なければランダムネットワークコーディングへの切り替えも少ない。そこで、本研究では、切り替え機会を多く得るために既存手法 [5] とは異なるノードの移動性判定を行う。

MANET において 2 秒以内にあるノードと通信した履歴があれば、そのノードとの通信リンクが生存していると考えられる。このことから通信リンクが生存していれば、符号化を行うためのパケットを十分に収集することができると考え、各中継ノードの受信履歴の最新 2 秒以内に中継元 i からパケットを受信した履歴があれば中継元 i は中継ノードに対して静的であると判断する。受信した履歴がなければ動的であると判断する。

3.3 相互切り替えアルゴリズム

図9, 10に示す切り替えアルゴリズムを用いてフラッディングとランダムネットワークコーディング (RNC) を相互に切り替える。

3.3.1 フラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替え

フラッディングによって転送される通常パケットを受信した場合, 第3.2節の移動性判定を用いて隣接ノードの移動性を判定する。動的であればフラッディングで即座に転送する。静的であれば第3.1節のランダムネットワークコーディングの適合性判定を用いて適合性を判定する。適合性があればフラッディングからランダムネットワークコーディングに切り替えを行うために符号化を行う。適合性がなければフラッディングを行う。

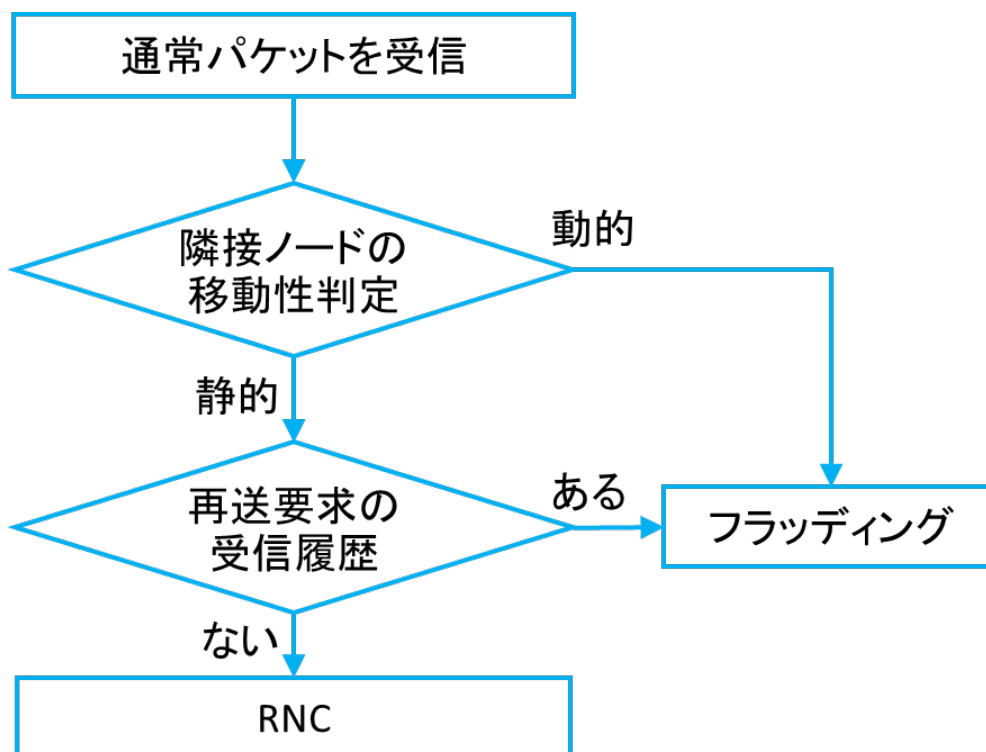


図9 フラッディングからランダムネットワークコーディングへの切り替え

3.3.2 ランダムネットワークコーディングからフラッディングへの切り替え

ランダムネットワークコーディングによって転送される符号化パケットを受信した場合，はじめに復号処理を行う．復号処理に失敗した場合は復号に必要なパケットを受信するためにしばらく待機し，一定時間経過しても復号処理が成功しない場合には再送要求パケットを送信し，再送処理を行う．復号処理に成功した場合，第 3.1 節のランダムネットワークコーディングの適合性判定を用いて適合性を判定する．適合性があれば引き続きランダムネットワークコーディングで送信するために符号化を行う．適合性がなければフラッディングに切り替えて送信する．

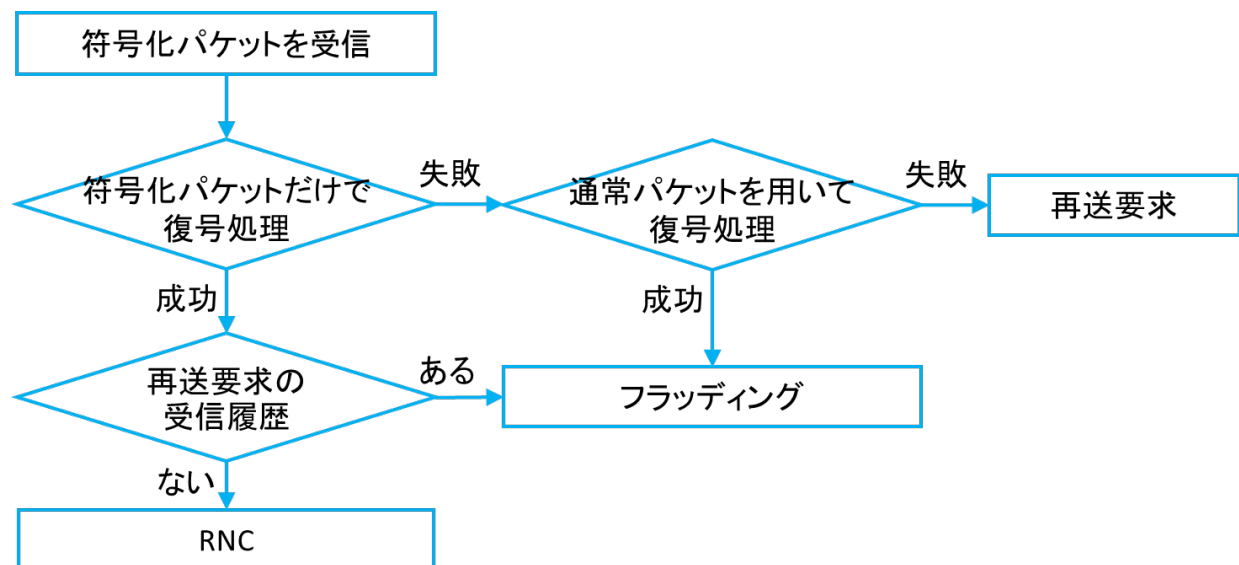


図 10 ランダムネットワークコーディングからフラッディングへの切り替え

第 4 章

実験

提案手法の有効性を確認するために実験を行う。本章では実験概要と実験結果について述べ、提案手法の考察を述べる。

4.1 実験概要

3章で述べた2手法についてネットワークシミュレータの ns-3 [6] を用いてシミュレーションによる提案手法の性能評価を行う。シミュレーション諸元を表 1 に示す。

表 1 シミュレーション諸元

シミュレーション時間	200s
フィールドサイズ	500m×500m
総ノード数	25
送信ノード数	1
ノードの通信半径	70m
送信パケット数	100
パケットサイズ	512bytes
符号化数	2
移動モデル	RandomWayPoint
移動速度	5km/h
ポーズタイム	1s
移動ノード割合	96%

3.1.1 項のランダムネットワークコーディングの適合性判定を用いた手法を提案手法 (1) , 第 3.1.1 項と 3.1.2 項のランダムネットワークコーディングの適合性判定を組み合わせて用いた手法を提案手法 (2) とし , 次の 3 つの条件でそれぞれ実験を行い , 従来手法であるフラッディング (Flooding) , ランダムネットワークコーディング (RNC) , 3.3 節の切り替えアルゴリズムを用いてフラッディングからランダムネットワークコーディングの単方向のみ切り替える手法と比較した . 全てのノードはフィールド内に少なくとも 1 つの他のノードとのリンクを持つようにランダムに配置した .

- 実験 1

総ノード数に対して移動するノードの割合を , デフォルトの 96% に加え , 20% , 40% , 60% にそれぞれ変更する .

- 実験 2

ノードの移動速度を , デフォルトの 5km/h に加え , 10km/h , 15km/h にそれぞれ変更する .

- 実験 3

総ノード数を , デフォルトの 25 に加え , 50 , 100 にそれぞれ変更する . 総ノード数の変更に伴い , 移動ノード割合も送信ノード以外全ての中継ノードが移動するように変更する .

4.2 実験結果 1

ここでは、総ノード数 25 に対して移動するノードの割合を 20%、40%、60%、96% に変更した場合の実験結果を示す。移動ノード割合 96% はただ 1 つの送信ノードを除く全ての中継ノードが移動モデルに従って移動する場合である。図 11、表 2、3 はそれぞれ移動するノードの割合を変化させた時の平均パケット配送率とネットワーク内を流れた総パケット数と切り替えが行われた回数を示す。

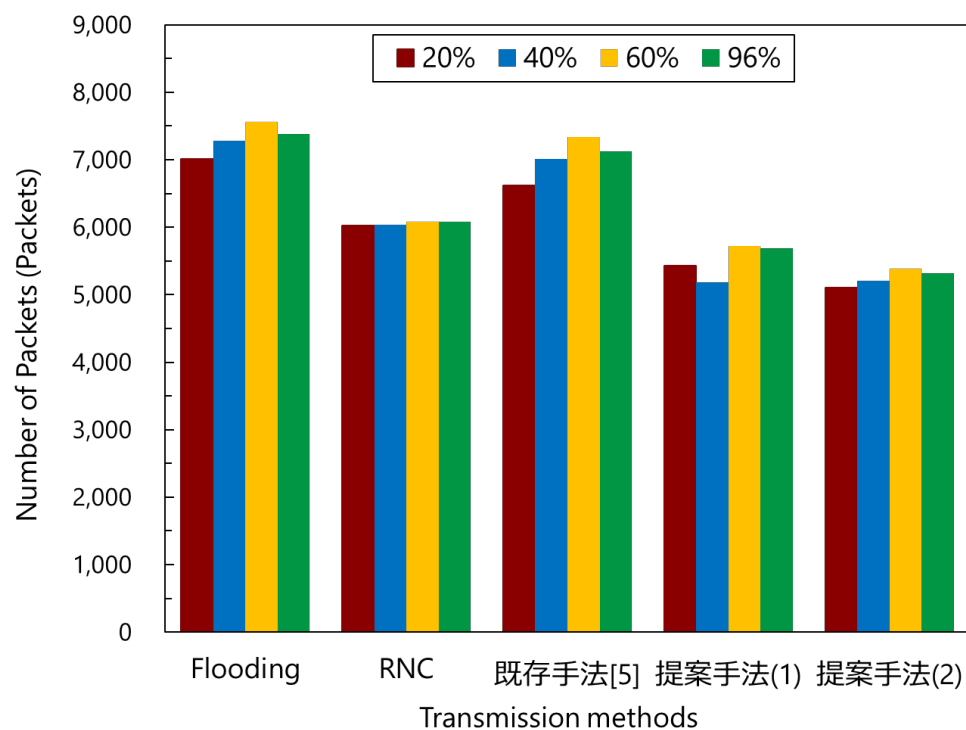


図 11 平均パケット数

表 2 平均パケット配送率

	20%	40%	60%	96%
Flooding	96.63%	95.35%	95.83%	93.63%
RNC	88.99%	88.90%	90.35%	88.36%
既存手法 [5]	93.55%	94.13%	95.52%	93.54%
提案手法 (1)	94.99%	94.03%	94.40%	93.62%
提案手法 (2)	95.07%	94.12%	94.44%	92.87%

表 3 平均切り替え回数

		20%	40%	60%	96%
既存手法 [5]	Flooding→RNC	37	32	28	30
提案手法 (1)	Flooding→RNC	186	187	182	172
	RNC→Flooding	15	16	17	16
提案手法 (2)	Flooding→RNC	187	188	182	173
	RNC→Flooding	15	17	18	18

既存手法 [5] に比べ、提案手法はどの移動ノード割合においても平均パケット配送率を維持しつつ平均パケット数を削減することができている。提案手法 (1) は移動ノード割合が 40% の時に最も大きく、既存手法から 25.20% 削減できている。また、提案手法 (2) は移動ノード割合が 60% の時に最も大きく、既存手法から 26.5% 削減できている。これは、表 3 に示すように提案手法のフラッディングからランダムネットワークコーディングへの平均切り替え回数が多いためだと考える。ランダムネットワークコーディングによる転送が既存手法よりも多く行われているため提案手法はパケット数を大幅に削減できている。ランダムネットワークコーディングの多用は復号処理の失敗による再送処理のためのパケット数の増加とパケット配送率の低下を引き起こす危険があるが、各中継ノードにおいてネットワークトポロジに対応してランダムネットワークコーディングの適合性を判定し、フラッディングに切り替えることによって、パケット数の削減とパケット配送率の低下の抑制が両立できたと考えられる。

提案手法 (1), (2) を比較すると、パケット配送率の差は小さいが、どの移動ノード割合においても提案手法 (2) の方がパケット数が少ない。MANET でのブロードキャストにおいてパケット数とパケット配送率はトレードオフの関係にあるが、パケット数を削減することはネットワーク負荷を軽減するために重要であるため、提案手法 (2) が優れている。

4.2.1 実験結果 2

ここでは、ノードの移動速度を 5km/h、10km/h、15km/h にそれぞれ変更した場合の実験結果を図 12、表 4、5 に示す。

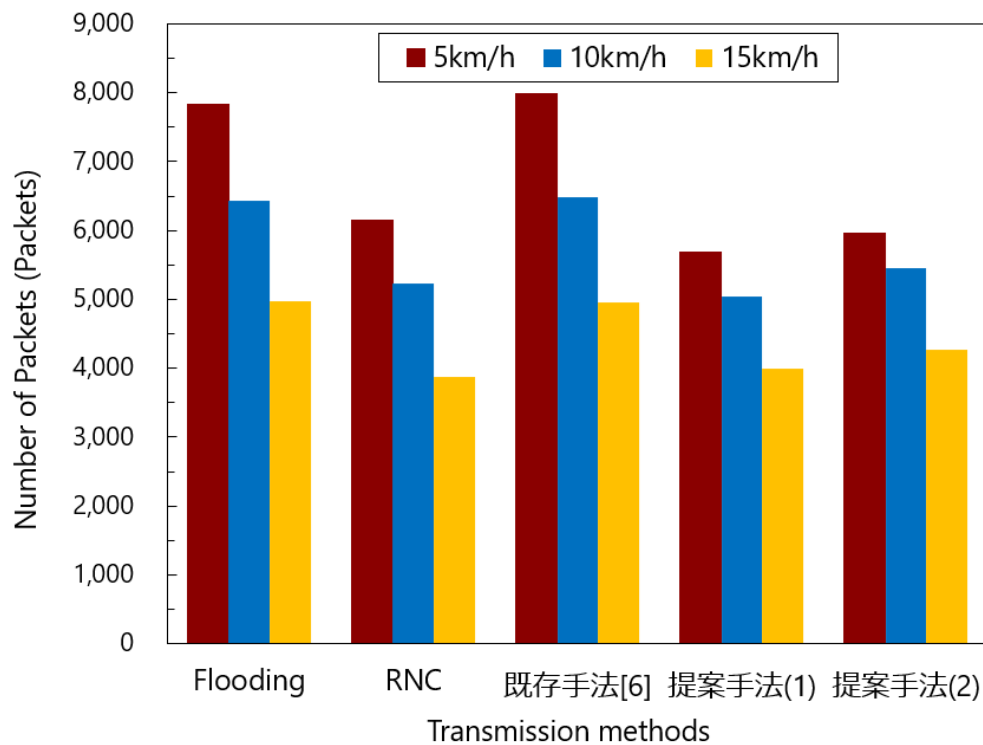


図 12 平均パケット数

表 4 平均パケット配送率

	5km/h	10km/h	15km/h
Flooding	93.63%	85.08%	69.44%
RNC	88.36%	78.15%	57.88%
既存手法 [5]	93.54%	85.28%	69.33%
提案手法 (1)	93.03%	83.33%	65.69%
提案手法 (2)	92.87%	83.32%	65.37%

表 5 平均切り替え回数

		5km/h	10km/h	15km/h
既存手法 [5]	F→RNC	30	25	20
提案手法 (1)	F→RNC	172	143	92
	RNC→F	16	18	11
提案手法 (2)	F→RNC	173	138	91
	RNC→F	18	26	21

端末の移動速度が速くなると、復号に失敗する可能性が高くなる。そのため RNC への切り替えはパケット数を削減できるが、パケット配送率の低下を招く。既存手法は動的なネットワークであるためフラッディングと似た結果を示したが、RNC に切り替える提案手法は共にパケット数を削減するもののパケット配送率も低下している。提案手法はフラッディングと RNC を併用するため、RNC に比べてパケット配送率は高い。

提案手法 (1)、(2) を比較すると、パケット配送率は提案手法 (1) の方が高く、パケット数が少ない。ノードの移動速度が速い場合には、わずかではあるが提案手法 (1) の方が優れている。

4.2.2 実験結果 3

ここでは、総ノード数を 25, 50, 100 にそれぞれ変更した場合の実験結果を図 13, 表 6, 7 に示す。

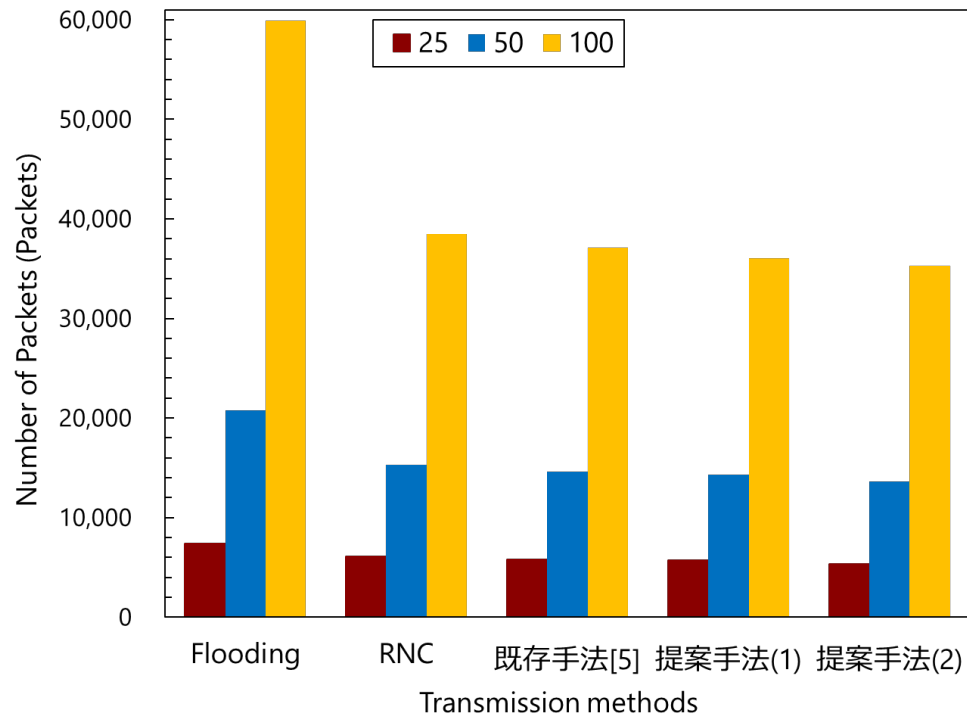


図 13 パケット数

表 6 パケット配送率

	25	50	100
Flooding	93.63%	97.35%	99.00%
RNC	88.36%	95.10%	97.82%
既存手法 [5]	93.54%	97.36%	99.07%
提案手法 (1)	93.03%	96.16%	97.46%
提案手法 (2)	92.87%	96.13%	97.37%

表 7 切り替え回数

		25	50	100
既存手法 [5]	F→RNC	30	35	42
提案手法 (1)	F→RNC	172	268	356
	RNC→F	16	32	38
提案手法 (2)	F→RNC	173	267	355
	RNC→F	18	34	38

ノードの密度が高くなると、各中継ノードは複数個の符号化パケットを収集できるため復号に成功する可能性が高くなる。提案手法は既存手法に比べ、パケット配送率がわずかに低下するがパケット数を削減できている。

提案手法 (1), (2) を比較すると、提案手法 (1) の方がわずかにパケット配送率は高いが、パケット数は提案手法 (2) の方が少ない。パケット数を削減することはネットワーク負荷を軽減するために重要であるため提案手法 (2) の方が優れている。

おわりに

本論文では、MANET でのブロードキャストにおいて、2つのランダムネットワークコーディング適合性判定を用いることで中継ノードが周辺状況に合わせてフラッディングとランダムネットワークコーディングを適切に相互切り替えを行う手法を提案した。また、シミュレーションによる性能評価を行い、既存手法と比較して提案手法によってパケット配送率の低下を最大 1.63% に抑制しながらも更にパケット数を最大 30.07% 削減できることを示した。

今後の課題として、実機を用いた性能評価実験を行うことや網羅できていない多様なネットワークポロジの形状や変化、シナリオを洗い出し、性能を更に検証していくことが挙げられる。

謝辞

日ごろから多くの御指導を頂きました太田義勝教授，鈴木秀智准教授，杉浦徳宏准教授に深く感謝いたします。そして，日頃何かとお世話になりました落合美子事務員に感謝いたします。また，本論文作成にあたって特にお世話になりました太田義勝教授に深く感謝いたします。最後に，日頃から熱心に討論して頂いた研究室の諸氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 総務省, “平成 29 年通信利用動向調査”, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05.html>
- [2] R. Ahlswede, et al., “Network Information Flow,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, No. 4, pp 1204-1216, Jul. 2000.
- [3] T. Ho, et al., “On randomized network coding,” in *Proc. 41st Annu. Allerton Conf. Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, Oct. 2003.
- [4] 林直秀, 野口拓, 川合誠, “Android プラットフォーム上でのネットワークコーディングを用いたアドホックブロードキャスト”, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2013-DPS-155 No. 20, Vol. 2013-MBL-66 No. 22, 2013.
- [5] 吉田政望, 野口拓, “アドホックネットワークにおけるネットワークコーディングを用いた動的転送制御”, *電子情報通信学会技術研究報告*, NS2016-75 Vol. 116 No. 230, pp. 7-11, 2016.
- [6] “ns-3”, <https://www.nsnam.org/>