

# ネットワークコーディングを用いたマルチパス回避ルーティングに関する一考察 A Study of Multi-path Avoidance Routing with Network Coding

杉浦 佑介<sup>†</sup>      酒井 和哉<sup>‡</sup>      福本 聡<sup>‡</sup>  
Yusuke SUGIURA      Kazuya SAKAI      Satoshi FUKUMOTO

## 1. はじめに

アドホックネットワークにおけるルーティングプロトコルの一つに回避ルーティングがある。最新の研究では、マルチパスベースの転送と XOR コーディングを組み合わせることで、従来の回避ルーティングに比べてメッセージの到達率を大幅に改善可能であることが報告されている [1]。しかし、複数経路の探索は大量の制御 packets を使用するため、全体の転送コストが増加するという問題が生じる。本論文では、一度のフラッディングで複数の経路を探索する Message-Efficient Multi-Path Avoidance Routing (ME-MPAR) を提案する。加えて、メッセージの送信時にネットワークコーディングを用いることでさらなる転送コストの削減を目指す ME-MPAR-NC を提案する。シミュレーションによって、これらの提案手法が効果的に転送コストを削減することを示す。

## 2. 回避ルーティング

回避ルーティングは、悪意のあるユーザによる盗聴を防ぐために危険な領域を迂回してデータを転送するルーティング手法である。しかし、従来の回避ルーティングはシングルパスベースの転送のため、ネットワーク上に敵ノードが隣接していない安全な経路が少なくとも一つ必要であり、この条件を常に満たすのは困難である。近年の回避ルーティングの研究は、XOR コーディングとマルチパスベースの転送を組み合わせることで、ネットワーク条件を緩和しデータの到達率を改善した。

Sakai らが提案した MPAR [1] は、ネットワーク上に共通の敵ノードが隣接してしない複数の経路が存在する場合、安全なデータ通信を保証する回避ルーティングプロトコルである (図 1, 図 2 参照)。オンデマンド型のプロトコルであり、リクエストパケットのフラッディングによって経路を求める。各ノードは最初に受け取ったパケットを隣接ノードへブロードキャストし、目的地までパケットを転送する。目的地ノードは最初に届いたパケットに対してリプライし、経路を確立する。ここで、この経路に敵ノードが隣接している場合、再びフラッディングを行い、敵ノードが共通して隣接していない経路を探索する。MPAR は一度のフラッディングで一つの経路を得るため、複数経路の探索では複数回のフラッディン

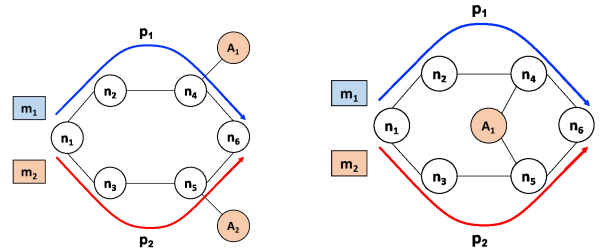


図 1: 安全なデータ通信が可能なネットワーク      図 2: 安全なデータ通信が不可能なネットワーク

グによる転送コストの増加が問題となる。

## 3. ME-MPAR

ME-MPAR は、一度のフラッディングで複数の経路を発見する効率的な回避ルーティングプロトコルである。ME-MPAR の特徴は、中継ノードでのリクエストパケットの再送にある。中継ノードは受け取ったパケットが持つ経路情報を記録しており、二回目以降に受け取ったパケットの経路情報と比較する。ここではパケットが経由したノードに隣接している敵ノードのリストを比較対象とし、以前受け取ったパケットの経路情報より優れている場合、そのパケットを隣接ノードへ再送する。

具体的に、パケットの再送条件は三段階に分かれている。第一に、受け取ったパケットのリストが空であった場合、その経路には隣接する敵ノードが存在しないことになるため、パケットの再送を行う。また、すでにリストが空であるパケットを再送している場合は、それ以降のパケットの再送を行わない。これは、敵ノードが隣接しない安全な経路は一つで十分であるからである。第二に、受け取ったパケットのリストがノードに記録されているリストの新部分集合である場合、パケットの再送を行う。これは、以前受け取ったパケットよりも隣接している敵ノードが少ないことを示しており、それまでに再送したパケットの経路情報が不要であることを意味する。第三に、受け取ったパケットのリストとノードに記録されているリストに共通の敵ノードが存在しない場合、パケットの再送を行う。共通の敵ノードが存在しないため、これらの経路を用いることで安全な通信が可能となり、マルチパスでのネットワーク条件を満たす。

ME-MPAR では、これらの再送条件を各ノードが判断することで最小経路数を保証する。また、目的地ノードは一定時間リクエストパケットを受け取り、それらの経路情報から安全な経路の組み合わせを選択し、リプラ

<sup>†</sup> 首都大学東京 大学院 システムデザイン研究科, Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

<sup>‡</sup> 首都大学東京 システムデザイン学部, Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University

イパケットを送り返すことで経路を確立する。

#### 4. ネットワークコーディング

MPARでマルチパスによるデータ通信を行う際、ソースノードは元のメッセージ  $m$  と同等のビット列を持つ複数のメッセージ  $m_1, m_2, \dots, m_{k-1}$  をランダムに生成する。その後、 $m_k = m \oplus m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_{k-1}$  から  $m_k$  を求め、 $m_1, m_2, \dots, m_k$  をそれぞれ経路  $p_1, p_2, \dots, p_k$  を用いて転送する。これにより、敵ノードは  $m_1, m_2, \dots, m_k$  をすべて盗聴しない限り元のメッセージ  $m$  を復号できず、目的地ノードは受け取ったすべてのメッセージから容易に  $m$  を復号することができる。しかし、マルチパスによる通信では、複数のメッセージが同一の経路を使用することがある。そこで、本研究では、ネットワークコーディングを実装し、より転送コストを削減するME-MPAR-NCを提案する。

ネットワークコーディングは、中継ノードに集まった異なる情報を符号化して転送することでネットワークのスループットを向上させる技術である。中継ノードで次の転送先ノードが等しい  $n$  個のメッセージを受け取った場合、中継ノードは  $m_c = m_1 \oplus \dots \oplus m_n$  でメッセージを符号化して転送する。また、中継ノードで符号化されたメッセージ  $m_c$  を受け取った場合、同じ長さのビット列をランダムに  $n-1$  個生成し、 $m_n = m_c \oplus m'_1 \oplus \dots \oplus m'_{n-1}$  から  $m_n$  を求める。そして、各経路へ転送することで元のメッセージへの可逆性を失うことなく転送コストを削減できる。

#### 5. シミュレーション結果

ネットワーク上の敵ノードの割合を5%で固定し、ノード数を100から400まで増加させた際のメッセージ到達率を図3、フラッディングによる制御パケット数を図4、メッセージ転送時のトラフィック量を図5に示す。

図3では、ME-MPARがMPARと同等のメッセージ到達率を持ち、一度のフラッディングで安全な経路を発見できていることが示されている。また、シングルパスベースの回避ルーティングであるGreedy-AA [2]と比較して、どちらのプロトコルも高い到達率を保持しており、既存の回避ルーティングの欠点であった到達率の低さを改善している。

図4では、ノード数の増加と共に制御パケット数は増加しているが、MPARと比較してME-MPARは大幅に制御パケット数を削減していることが解る。これは、ノード数の増加によってルーティング機会も増加し、安全な経路を発見する確率が上がったためである。

図5では、MPARに比べてME-MPARのトラフィック量が低いことが解る。MPARはネットワークによって不要な経路を選択する可能性があるが、ME-MPARは最小経路数を常に保証しているため、トラフィック量が

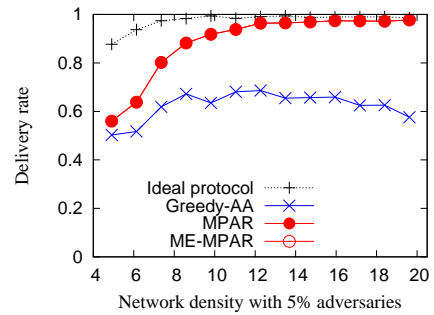


図3: メッセージ到達率

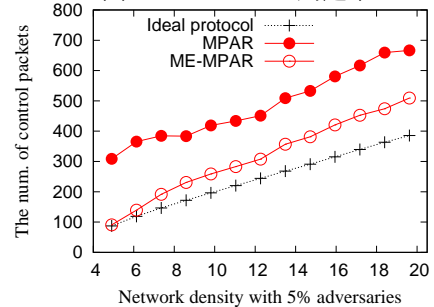


図4: 制御パケット数

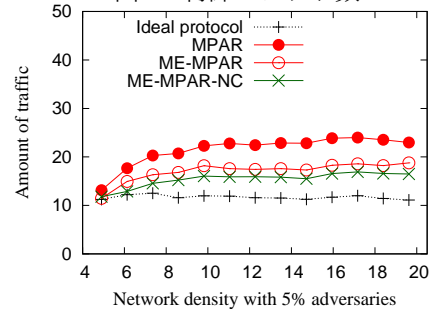


図5: トラフィック量

低くなる。また、ME-MPAR-NCはME-MPARよりもトラフィック量が低い。これは、メッセージ符号化による転送回数の減少のためである。

以上のことから、ME-MPARおよびME-MPAR-NCはMPARに比べて転送コストが低く、軽量な回避ルーティングプロトコルであると言える。

#### 6. まとめ

本稿では、MPARのメッセージ効率に焦点を当て、一度のフラッディングで安全な経路を発見するME-MPARを提案した。また、ネットワークコーディングを実装したME-MPAR-NCを提案し、ネットワークのスループットを向上させた。シミュレーション結果は、このアプローチがMPARの転送コストを改善するために効果的であることを示している。

#### 参考文献

- [1] Kazuya Sakai, Min-Te Sun, Wei-Shinn Ku, Jie Wu, and Ten H. Lai, "Multi-Path-Based Avoidance Routing in Wireless Networks," In ICDSCS, pp. 706-715, 2015.
- [2] Haim Zlatokrilov, Hanoch Levy, "Area Avoidance Routing in Distance-Vector Networks," in Infocom, pp. 47-48, 2008.