

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

無線アドホックネットワークにおける
パケット転送制御方式の研究

Study on Packet Transmission Control Scheme
for Wireless Ad Hoc Networks

申 請 者

山本 嶺

Ryo YAMAMOTO

国際情報通信学専攻
情報通信ネットワーク研究Ⅱ

2013年7月

近年，スマートフォンなどの無線機器を搭載した移動可能な小形の端末が普及してきている．これに伴い，端末のみで自律分散的にネットワークを構築可能な技術である無線アドホックネットワークが注目されている．無線アドホックネットワークでは，端末がルータとしての役割を併せもつことで，互いにデータの中継を行うマルチホップ通信を実現し，無線基地局からの電波が到達しない端末との通信を可能にしている．一方，無線アドホックネットワークでは，無線通信を用いてデータの送受信を行うことや，端末が移動する場合には通信環境が不安定となることから，種々の問題が生ずる．

無線アドホックネットワークで発生する問題の一つとして，高いデータ損失率が挙げられる．これは，他端末からの電波によって干渉が発生することや，端末が移動する場合リンクが切断しやすいことに起因している．無線アドホックネットワークでデータ損失が発生した場合，一般的にはデータリンク層でリンクごとの再送制御が行われ，トランスポート層でエンドエンド間の再送制御が行われる．しかし，データリンク層での再送制御が失敗し，リンク上でデータ損失が発生した場合には経路切断と判断され，送信元端末から経路再構築が行われた後，トランスポート層による再送制御が実行されるため，遅延の増加などにより通信効率が大きく低下する．

更に，データ損失は信頼性だけでなく，データ通信に一般的に用いられるTCP (Transmission Control Protocol) の通信効率低下も同時に招くことになる．一般に，TCPはデータ損失を輻輳検知に用いているため，損失が頻発する無線アドホックネットワークでは，輻輳以外の要因によってTCPの輻輳回避制御が行われ，通信効率低下の要因となる．そのため，帯域推定などを用いて輻輳制御をよりの確に行う手法なども提案されているが，通信環境が随時変化する無線アドホックネットワークでは，動的に適切な制御を行うことは困難である．

その他の問題として，無線アドホックネットワークの自律分散制御に起因する負荷集中がある．無線アドホックネットワークでは，通信環境の優れたリンクを通信経路として優先的に使用するため，特定のリンクの使用頻度が高くなり，負荷集中が発生する．

本論文は，これらの問題を解決し，無線アドホックネットワークで高信頼・高効率な通信を実現するため，データリンク層，トランスポート層，及びクロスレイヤ制御を用いた通信方式に着目し，検討を行ったものである．

以下，各章ごとに概要を述べ，評価を加える．

第1章は「序論」であり，研究の背景，目的，概要について述べている．

第2章は，「アドホックネットワーク」と題し，無線アドホックネットワークの概要，通信特性，及びそれらに付随する問題について述べている．無線アドホックネットワークでは，自律分散的に通信制御が行われるため，無線基地局を用いた通信と比較して，通信効率や信頼性が低下する．そこで無

線アドホックネットワークで高効率、高信頼な通信を実現するため、本論文で取り扱う課題について述べている。

第3章は、「近傍端末を用いた自律分散再送制御手法」と題し、リンクでの信頼性及びエンドエンド間での通信効率向上に関し、データリンク層において経路近傍の端末を用いて自律分散的に再送を行う手法について検討を行っている。通常、無線アドホックネットワークのデータリンク層では、リンク間でのフレーム損失時に自動再送要求 (ARQ: Automatic Repeat Request) によって損失フレームの回復が行われる。しかし、再送を行うためには、タイムアウト時間まで待機する必要があることや、利用不能なリンクに対しても繰り返し再送が行われることから、遅延の増加やトラヒックの増加が問題となる。

本章では、この問題に対し、無線通信の特徴である通信の同報性を利用し、経路近傍の端末がフレーム送信を漏れ聞くことによって、リンク利用の可否、及びフレーム損失の有無を判断し、自律的に再送制御を行う手法について検討を行っている。これにより、リンク間でのフレーム損失回復時間を短縮することで、エンドエンド間の遅延低減を達成し、通信効率の向上を実現している。更に、通信経路の安定性を向上させ、経路再構築に伴う遅延やオーバーヘッドの増加を低減している。これらは世界に先駆けたアイデアであり、高く評価できる。

第4章は、「適応形トランスポートプロトコル」と題し、エンドエンド間の信頼性確保、及び無線資源活用のため、トランスポート層において再送及び送信速度制御を行う手法について検討を行っている。無線アドホックネットワークでは、端末移動や障害物などの影響によって、一般的な無線通信と比較して、伝送途中に損失が発生する確率が高くなる。そのため、セグメント損失を輻輳の発生としてウィンドウ制御を行っている TCP Reno などの通信方式では、不要なウィンドウサイズの縮小が行われ、エンドエンド間のスループット低下の要因となる。また、選択的確認応答 (SACK: Selective Acknowledgement) を用いていない TCP 通信の場合、ACK を受信したセグメントから損失セグメントまで再送が行われるため、冗長な再送制御となり、ネットワーク負荷が増加する要因となる。

この問題に対し、本章では経路上の通信状態を往復遅延時間 (RTT: Round Trip Time) によって評価し、ウィンドウ制御を行う手法について検討を行っている。これにより、セグメント損失の有無に関わらず、通信状態に応じた送信速度制御が可能となり、限られた無線資源を有効に利用することを実現している。また、セグメント損失時には、必要なセグメントのみ再送を行うよう再送制御を改良したことにより、不要なセグメント送信の抑制を実現している。更に、同一リンク上に複数の TCP フローが存在する場合に、端末間、及びプロトコル間の公平性を確保した通信が実現可能であることを示している。これらは、データ通信で頻繁に利用される通信プロトコルである

TCP を，無線アドホックネットワークにおいて効率良く実現する上で有効な手法であり，高く評価できる．

第 5 章は，「送信速度制御を用いた負荷分散手法」と題し，自律分散的なネットワーク構築から生じる通信負荷集中を分散するための手法について検討を行っている．前述したように，無線アドホックネットワークでは，端末同士が互いに連携してネットワーク構築を行うことから，通信環境が優れているリンクや端末を優先的に利用することにより，安定した経路構築を行っている．そのため，そのような箇所や端末に流れるトラフィック量が相対的に増加することになり，ネットワーク内の公平性が低下することや通信環境の悪化が問題となる．従来，無線アドホックネットワークでは，主に空間的に負荷分散を実現する手法が提案されていた．しかし，これらの手法では，短い周期で変動する通信環境に対応することが困難であることや近傍の端末密度によって負荷分散性能が劣化するという問題があった．また，これらの手法では，経路上のみの通信状態を評価し，負荷分散制御を行っているため，経路近傍の端末に経路上の通信が与える影響が考慮されていなかった．

そこで，本章では，経路近傍の通信状態を，漏れ聞きを利用して評価し，経路上の負荷，及び経路近傍の端末に与える影響に基づいた負荷分散手法について検討を行っている．更に，本章では，従来の空間的負荷分散ではなく，送信速度制御を利用して時間的に負荷分散を実現する手法について検討を行い，通信環境が随時変動する無線アドホックネットワークで効率的な負荷分散を実現可能であることを示している．これらは，データリンク層のネットワーク状況を活用してトランスポート層でフロー制御を行うことにより無駄な処理を抑えながらより効率良く無線アドホック通信を実現する有効な手法であり，高く評価できる．

第 6 章は「結論」であり，本論文で得られた成果をまとめ，考察を行っている．

以上要するに，本論文は，無線アドホックネットワークの効率を向上するために，データリンク層，トランスポート層，及び各層間の連携というそれぞれ異なった方向から新しい制御手法を提案し，多角的に効率向上の検討を行ったものである．無線アドホックネットワークは災害時の活用を含むさまざまな面で重視されており，本論文の成果は国際情報通信学の発展に寄与するところ大である．よって，本論文は博士（国際情報通信学）の学位論文として価値あるものと認める．

2013 年 7 月 3 日

審査員

主任	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	田中良明
	早稲田大学教授	工学博士（東北大学）	嶋本 薫
	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	津田俊隆
	早稲田大学教授	Ph.D.（イリノイ大学）	中里秀則