

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700076

研究課題名(和文)アドホックネットワークにおける統合通信制御方式

研究課題名(英文)Integrative transmission control mechanism for ad hoc networks

研究代表者

山本 嶺(Yamamoto, Ryo)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：90581538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：小型の無線端末の普及に伴って、端末のみで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。しかし、端末の移動性や無線通信の特徴などから、インフラを用いた通信と比較して安定した通信環境を構築することが困難である。この問題に対し、数多くの提案がされてきたが、それらの多くは単一レイヤでの制御、つまり限定的な範囲での制御であった。本研究では、より綿密な制御を実現するため、無線アドホックネットワークの不安定な通信環境を克服するため、複数レイヤを統合して制御を行うクロスレイヤ制御を用いた通信方式を提案し、多方面にわたる情報に基づく制御によって通信効率の向上を実現した。

研究成果の概要(英文)：With the rapid spread of wireless terminals, ad hoc networks that enables distributed and autonomous network establishment have attracted a lot of attentions. However, terminals' mobility or vulnerable nature of wireless communication make it unstable compared with the one with fixed infrastructure. As concerns this problem, a lot of methods under a specific layer have proposed. That is, the methods only covers limited range of transmission controls. This research focuses on cross-layered mechanism to overcome the unstable communication nature of ad hoc networks. With the mechanisms proposed in this research, transmission efficiency has improve by controlling traffic using broad information from multiple layer.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 計算機システム・ネットワーク

キーワード：無線アドホックネットワーク クロスレイヤ 負荷分散 ルーティング 再送制御

1. 研究開始当初の背景

無線 LAN などの無線通信デバイスを搭載した端末の急速な普及に伴って、デバイスの利便性向上や災害時など既存のインフラ設備を用いた通信が途絶した場合の一時的な通信手段確保のため、デバイスのみで自律分散的にネットワークを構築することが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。しかし、無線アドホックネットワークでは、端末の移動によってネットワークトポロジーが時間に伴って大きく変化することや、障害物や干渉などによって非常に多くのデータ損失が発生する。無線アドホックネットワークのこの通信特性に対し、経路制御技術やデータ転送制御技術など数多くの技術が提案されており、一定の通信効率改善を達成している。一方、想定されている無線アドホックネットワークでの通信制御は、従来のインターネットなどと同様に、レイヤ構造に基づく制御が行われている。しかし、それらの環境とは大きく特性が異なることなどから、必ずしも適切な制御とならない場合が存在する。

2. 研究の目的

前述したように、無線アドホックネットワークでの通信に従来のレイヤ構造に基づく通信方式を利用した場合、必ずしも適切な制御とならない場合が存在する。これは、従来の制御が基本的には単一レイヤ、つまり限定された適用範囲内の性能向上を目的としているため、改善が限定的となるためである。また、無線アドホックネットワークでの通信は、他の通信形態と比較すると非常に不安定な環境下であり、単一レイヤでの制御では対応できない状態となる可能性がある。これに対し、従来、複数レイヤを連携させ、制御を行うクロスレイヤ制御が提案されており、単一レイヤでの制御と比較して高い改善効果を示している。そこで、本研究の目的として、複数のレイヤを協調動作させるクロスレイヤ制御を用い、無線アドホックネットワークの通信特性を考慮した通信制御方式の提案を行う。

3. 研究の方法

本研究では、前述の目的を達成するため、以下の三つの事項に関する検討を実施した。(a) 無線アドホックネットワークでの通信特性の解析、(b) 単一レイヤでの制御手法の特性と制約の解析、(c) クロスレイヤ制御手法による性能向上についての検討。(a) の通信特性の解析では、コンピュータシミュレーションを用い、ネットワークトポロジーやアプリケーション、トラヒックモデルなどを変化させ、様々な環境下での性能評価を実施した。(b) ではまず、(a) で示したシミュレーションによる解析を従来の単一レイヤでの制御手法にも適用し、特性や性能分析を実施した。その後、得られた結果から単一レイヤ

で実現可能な課題と実現不可能な課題を抽出し、(c) に示すクロスレイヤ制御の設計に反映させる。(b) で得られた結果から、複数レイヤを協調動作させることで解決することが可能な問題に対し、(c) でより詳細な検討と具体的な方式の提案を行った。また、特定の通信環境下だけではなく、より一般的な通信環境下での性能向上を図るため、(a) で得られた結果を基に検討を行った。

4. 研究成果

本研究によって得られた成果は主に、送信速度制御による負荷分散、高い移動性に対応するルーティング及びパケット伝送方式、信頼性確保のための転送制御方式である。以下では、それぞれについて詳細に述べる。

(1) 負荷分散手法

無線アドホックネットワークでは、自律分散制御によって通信が実現されるという特徴から、ネットワーク内の通信状態を一元的に管理することが困難である。そのため、端末密度が高い場合などの通信環境が安定している箇所や端末ほどトラヒック集中が発生しやすく、ネットワーク内における通信の公平性を低下させる要因となりうる。この問題に対し、経路制御によって負荷分散を実現する手法や TCP 制御の効率化によって通信効率を向上させる手法が提案されている。端末の移動性が高い無線アドホックネットワークでは、時間経過とともにネットワークトポロジーが大きく変化するため、一般的にはオンデマンド形(リアクティブ形)のルーティングプロトコルを利用した経路構築が行われる。しかし、一般的なリアクティブ形ルーティングプロトコルでは、通信環境が安定している経路を優先的に利用した経路構築が行われるため、通信環境が安定している箇所や端末に通信負荷が集中することとなる。そのため、それらの箇所や端末などでは他と比較してより多くの送受信や転送が行われることとなり、無線資源や電力などをより多く消費することとなる。つまり、ネットワーク内の公平性低下の一要因となりうる。

これらの問題に対し、従来より無線アドホックネットワークにおける負荷分散手法についての研究が実施されており、それらは大きく二種類に大別することができる。一つは、空間的負荷分散手法であり、もう一方は時間的負荷分散手法である。ここで、空間的負荷分散手法とは、主に経路制御によって直接的に負荷分散を実現する手法である。代表的な手法として、LBDSR (Load balanced dynamic source routing) や LBPSR (Load balance routing using packet success rate) が提案されている。また、これら空間的負荷分散手法には、遅延形 (Delay-based)、トラヒック形 (Traffic-based)、ハイブリッド形 (Hybrid-based) の3種類が存在する。遅延形負荷分散手法では、計測した通信遅延などから負荷を算出し制御を実施する。トラヒック

ク形負荷分散手法では、トラヒック量や待ち行列長を基に制御を行い、ハイブリッド形負荷分散手法では、遅延形とトラヒック形を組み合わせた制御が実施される。それぞれの負荷分散手法において様々な手法が提案されているが、遅延形負荷分散手法では、経路間でホップ数が異なる環境やパケット損失が多く発生するような環境において正確な負荷見積もりが困難であるという問題がある。また、ハイブリッド形負荷分散手法では、多数のパラメータを利用した制御が必要となることから、計算負荷の増大などが問題となる。そこで、本研究では、空間的俯瞰分散手法として、前述した LBDSR や LBPSR などのトラヒック形負荷分散手法に焦点をあて、検討を行った。また、他のトラヒック形負荷分散手法として、中継機能交換によって転送パケット数の均一化を図る手法 (LBRN) についても検討を実施した。

一方、空間的負荷分散手法に対して、時間的負荷分散手法に関する検討が数多く実施されている。時間的負荷分散とは、バースト的なトラヒックを抑制することで、時間的に特定の箇所に負荷が集中することを抑制する仕組みであり、空間的負荷分散手法と比較して、即応性が高いという特徴がある。代表的な手法として、TCP などの送信速度制御がある。無線アドホックネットワークでの TCP 制御については、従来より数多くの研究が実施されており、伝送系路上の残留パケット数に基づく送信速度制御や下位層でのスロット割当の最適化などを実現する手法が提案されている。本研究では、無線アドホックネットワークの高い移動性に適応する負荷分散手法について検討を行うため、空間的負荷分散に基づく手法の提案を実施した。

前述したように、空間的負荷分散手法では、経路制御による負荷分散が実施されるため、ネットワーク環境の変化に追従することが困難であるという問題がある。また、時間的負荷分散手法では、通信効率の最大化を目的としているものが多く、ネットワーク全体の負荷分散を達成するのは困難であると考えられる。そこで、本研究では、通信経路上の端末だけでなく、経路近傍に存在する端末の通信状態も考慮した送信速度制御を行うことで、通信環境の変化により柔軟に対応可能な負荷分散手法を提案した。

通信経路上で負荷が集中している箇所では、単位時間当たりのトラヒックが多くなるため、無線通信環境では衝突が発生する可能性が高くなる。また、大量のパケット送信が行われるため、中継端末上の待ち行列長が増加する。そこで提案手法では、通信経路上の負荷を衝突発生回数と待ち行列長を用いて検出する。ここで、衝突発生回数は物理層からの情報を基に測定し、待ち行列長はネットワーク層から情報を取得することとする。提案手法では、自端末の衝突発生回数と待ち行列長を Hello メッセージに付加してプロ

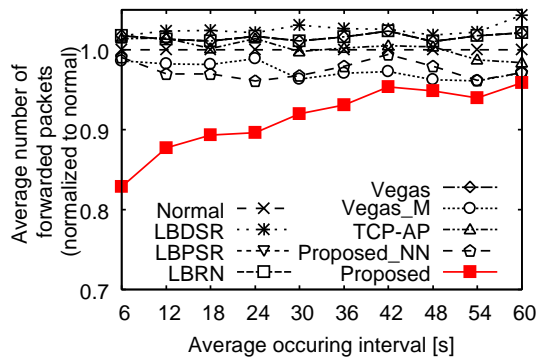


図1 転送パケット数

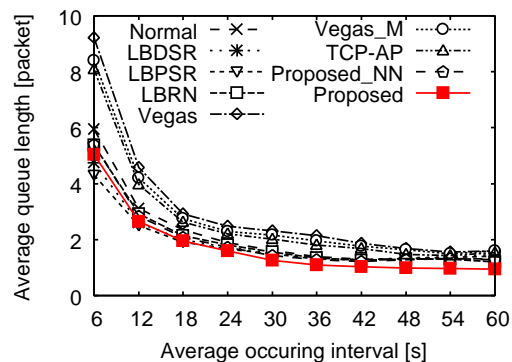


図2 待ち行列長

ドキャストすることで、定期的に自端末の状態を近傍端末へ通知する。通信経路上の中継端末は、他の中継端末から受信した Hello メッセージ内の衝突発生回数と待ち行列長の情報を基に、Hello メッセージを受信することに自端末の次ホップ端末に対する通信負荷の相違度を算出する。

次に、提案手法では、負荷分散制御のために経路の近傍にある端末の通信状態把握を行う。アドホックネットワークでは無線通信によってパケット送信が行われるため、実際の受信端末以外に電波範囲内にある端末へも電波が到達し、衝突の発生を引き起こす可能性がある。また、データリンク層において個々の受信パケットのあて先を判別したり、衝突によって損失したパケットを再送する必要があるため、新たな負荷が発生する可能性もある。そのため、自端末が近傍端末よりも多くのパケットを送信している場合には、自身の通信によって近傍端末へ負荷を与えることとなる。反対に、自端末よりも近傍端末がより多くの通信を行っている場合には、自身の通信によって与える負荷と比較して、近傍端末によって与えられる負荷が相対的に増加する。そこで提案手法では、近傍端末が送信したパケットの漏れ聞きを行い、自身の通信状態と比較することで、近傍の通信状態を評価する。

前述の手順によって得られた評価値を利用し、提案手法では、通信負荷相違度と近傍端末に対する評価値の平均を算出する。その後、これらの値に応じて TCP のウィンドウサ

イズ上限値を制限することとで、単位時間当たりに出送されるパケット数を制限し、過剰なトラフィックの発生を抑制する。これにより、バースト的なトラフィックの発生などを回避することが可能となり、衝突発生の低減や待ち行列長を低減することが可能となった。

次に提案手法の有効性を確認するため、コンピュータシミュレーションによる評価を実施した。評価は、平均転送パケット数、平均待ち行列長について評価を実施した。シミュレーション結果を図1、図2に示す。シミュレーション結果から、提案手法では、従来手法と比較して効率的な負荷分散を実現することが可能であることを示した。また、他のシミュレーション結果からも、提案手法が他の手法と比較して効率的に負荷分散を実現するが分かった。

以上のように、無線アドホックネットワークにおける負荷分散手法においては、下位層から得られた情報を用いて上位層の制御を実施するクロスレイヤ制御を用いた手法を提案した。

(2) 移動性に適応したルーチング及びパケット伝送手法

前項でも述べたように、無線アドホックネットワークでは、各端末が移動することによってネットワークトポロジーが大きく変化し、安定した通信経路を構築することが困難である。この問題に対し、従来より様々なルーチング方式及びパケット伝送手法が提案されてきたが、多様なネットワーク形態に適応することは困難である。そこで、より柔軟にネットワーク内の通信環境に適応可能なオポチュニスティックルーチング (OR: Opportunistic routing) やブロック伝送手法に焦点をあて、研究を実施した。

無線アドホックネットワークにおけるルーチング手法は、従来より数多くの研究が実施されており、マルチパスルーチングやORなどの冗長ルーチングによる信頼性向上を図っていた。しかし、マルチパスルーチングでは、通信開始前に構築した経路が時間経過に伴って利用できなくなる可能性がある。また、ORでは事前に経路選択のための情報を取得する必要があるため、高い移動性に適応することが困難であるという問題がある。しかし、ORでは、パケット転送ごとに中継端末を選択するという特徴から、中継端末選択の仕組みを変更することによって高い移動性に適応可能なポテンシャルを有することとなる。そこで、本研究では、端末の移動性が高い環境において適切に中継端末選択を行い、高い通信効率、信頼性を達成する手法についての検討を行う。

前述のように、ORでは、パケット転送ごとに中継端末選択を行う。つまり、従来のルーチングとは異なり、通信開始前に特定の経路を構築する必要がなく、実際にパケットを転送する時点で適切な経路を選択することが可能となる。しかし、中継端末選択のための

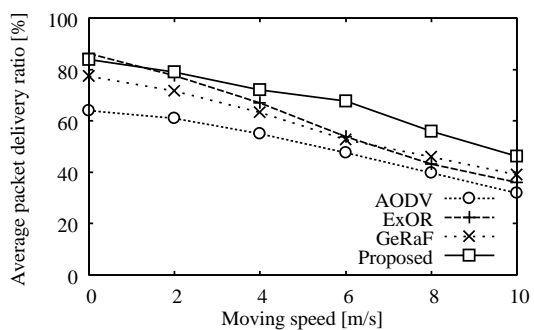


図3 パケット配信率

パラメータなどを事前に取得する必要があるので、高い移動性に適応することが困難であった。代表的なORとして、ExOR (Extremely opportunistic routing) や GeRaF (Geographic random forwarding) がある。これらの手法では、転送リストを用いた優先度設定や物理距離を使った中継端末選択が行われているが、前述のように事前の情報取得が必要不可欠である。そのため、移動性が高い環境では性能が劣化するという問題がある。そこで、本研究では事前の情報取得をできる限り少なくし、高い移動性にも適応可能な手法に関する検討を実施した。

提案手法では、中継端末選択のために事前に他の端末などから情報を取得するのではなく、クロスレイヤ制御によって下位層と連携し、端末が自律的に自身を評価し、中継を行う。そのため、各端末は各あて先に対する転送履歴及び推定ホップ数を管理し、データパケット受信ごとに自身の転送への貢献度を算出することで、転送を行うかの判断を行う。これによって、通信成功率などの情報を事前に取得することなく中継端末選択が可能となるため、移動性の高い環境においても高い通信効率、信頼性を達成することができる。

提案手法の有効性を確認するため、コンピュータシミュレーションを実施した。シミュレーション結果として、パケット配信率を図3に示す。シミュレーション結果より、提案手法では、移動性が高い環境においても従来手法と比較して高い配信率を達成することを確認した。

次に、ORと同様に経路の冗長化によって通信成功率を向上させる手法として、ブロック伝送手法に関する検討を行った。ブロック伝送とは、通常フレーム単位に送信の可否を確認するのに対し、複数をもとめてブロックとして管理し、ホップごとに転送管理を行う手

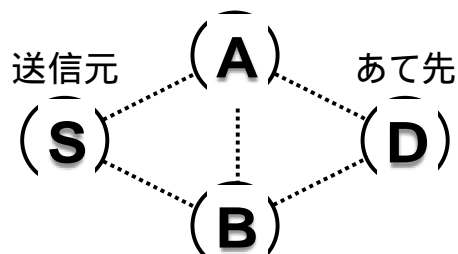


図4 トポロジー

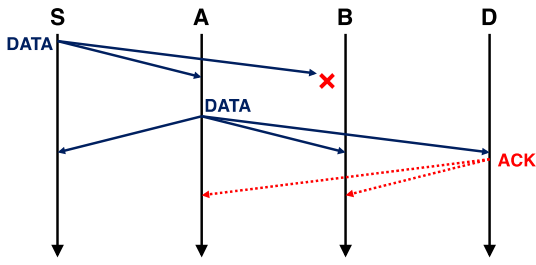


図5 OR

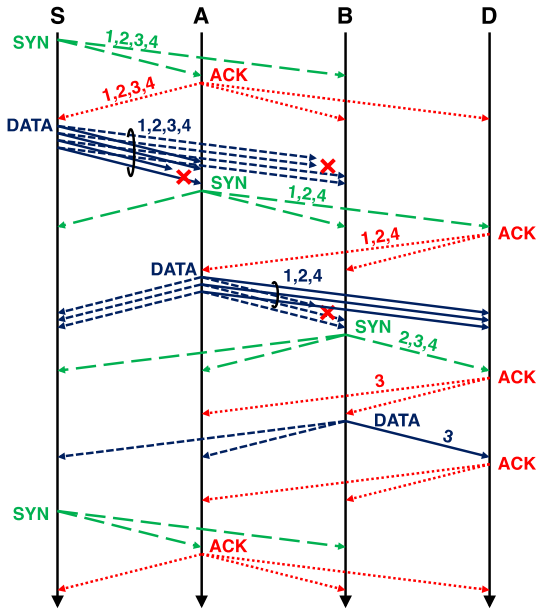


図6 ブロック伝送

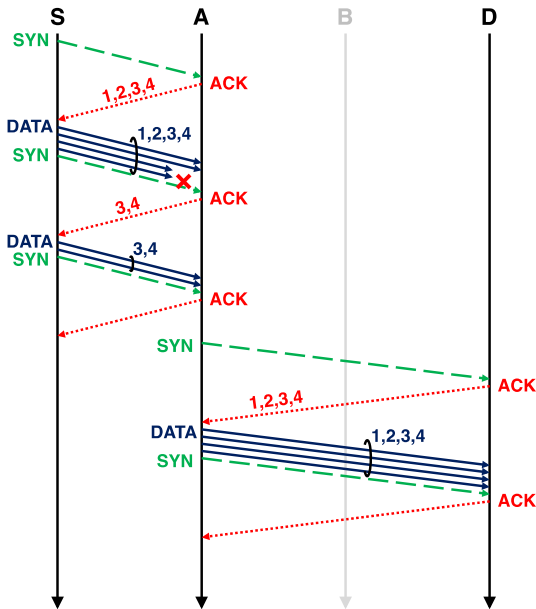


図7 提案手法

法のことである。ブロック転送は主にデータリンク層で制御が実施される。図4におけるOR、ブロック転送シーケンスを図5~図6に示す。図に示すように、ORではBを利用した転送が可能である一方、ブロック伝送では、利用せずに転送が実施されている。そのため、

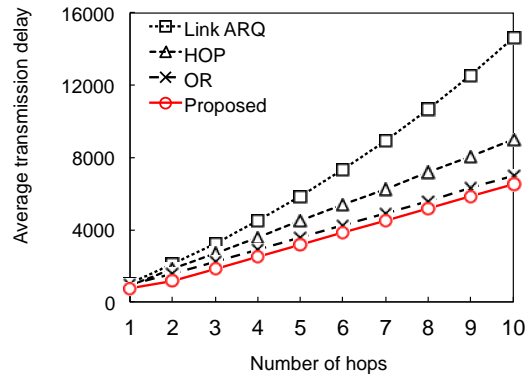


図8 通信遅延

S-A間やA-D間で損失が起きた場合、損失を回復するために再送制御が必要となる。そこで、ORとブロック転送の考え方を融合し、2ホップ間で信頼性確保を行う仕組みについて提案を行った。提案手法におけるパケット転送シーケンスを図7に示す。

提案手法の有効性を確認するため、コンピュータシミュレーションによる評価を行った。シミュレーション結果を図8に示す。結果から、提案手法では冗長性を保ったブロック転送を行うことによって、従来手法と比較して通信遅延の低減を達成した。これは、データ損失を回復するために実施される再送を低減したことが主な要因となる。つまり、信頼性を向上させたことによって通信効率向上を実現している。

以上のように、ルーチング及びパケット伝送方式に関する検討では、ORの考え方をいより効率的、自律的に制御を実施する手法に関する検討を行った。また、移動性に適応したORやブロック伝送方式に関する拡張についての提案を行った。

(3) 近傍端末を利用した転送制御方式

無線アドホックネットワークでは、障害物や衝突などによって一時的に通信経路が切断されることが発生する。通常、このような切断が発生した場合、経路切断と判断され、経路再構築が実施される。しかし、経路再構築には経路探索パケットのフラッディングなどが必要であり、ネットワーク資源を浪費する一要因となる。そのため、一時的な経路切断に対し、経路の近傍端末があて先端末に対して再送制御を実施することで、切断を回復する手法が提案されている。しかし、これらの手法では、パケットごとに再送制御を行うという特徴から、遅延やオーバーヘッドの増加が問題となる。

この問題に対し、ORと再送制御を組み合わせたクロスレイヤ制御を用いたパケット転送方式について検討を行った。提案手法では、通常のルーチング手法と同様に経路要求パケットを送信し、あて先からの応答を受信することで通信経路を確立する。一方、この経路探索の際に、近傍端末が経路応答パケットを漏れ聞き、自身が通信経路の近傍に位置することを認識する。この近傍端末は、データパケットを漏れ聞いた際、自身もあて先端末

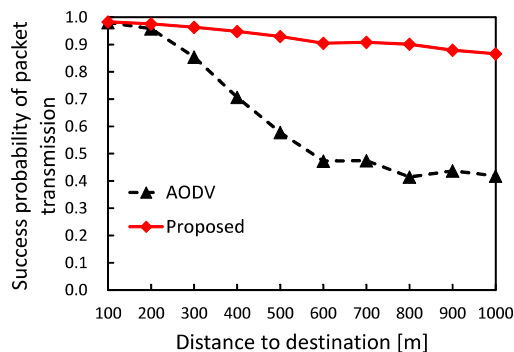


図9 通信成功率

に対して転送を行う。その際、経路上の端末の転送優先度と比較して優先度を低くし、近傍端末を補助的に用いる。つまり、ORでのパケット転送とは異なり、近傍端末は補助的な役割となる。

提案手法の有効性を評価するため、コンピュータシミュレーションを実施した。シミュレーション結果を図9に示す。結果から、提案手法では従来のルーチングと比較して非常に高い通信成功率を達成した。つまり、近傍端末による補助的な転送、再送制御によって信頼性の向上を達成した。

以上のように、本研究では無線アドホックネットワークにおけるクロスレイヤ制御に着目し、手法の提案を行い、研究目的である通信効率の改善を達成した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

山本嶺、三好匠、田中良明，“アドホックネットワークにおける送信速度制御を用いた近傍トラフィック適応形負荷分散手法”，電子情報通信学会和文論文誌(B), vol.J96-B, no.7, pp.782-792, 2013, 査読有, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-b_7_782&category=B&year=2013&lang=J&abst=

〔学会発表〕(計14件)

荒木涼太郎、山崎託、山本嶺、三好匠，“アドホックネットワークにおける経路の近傍ノードを利用したパケット転送方式”，電子情報通信学会総合大会，2014/3，新潟大学

Tatsuya Shirai、Ryo Yamamoto、Takumi Miyoshi、Yoshiaki Tanaka，“A Reliable Routing Method Using Local Repair for Ad Hoc Multicasting”，IEICE General Conference, 2014/3，新潟大学

山本嶺、山崎託、三好匠、田中良明，“アドホックネットワークにおける転送履歴に基づく Opportunistic Routing”，電子情報通信学会総合大会，2014/3，新潟大学

山崎託、山本嶺、三好匠、朝香卓也，“アドホックネットワークにおける2ホップ信頼性制御を用いたブロック伝送方式”，電子情報通信学会 NS 研究会，2013/12，香川

白井達也、山本嶺、三好匠、田中良明，“アドホックマルチキャストにおける局所回復経路制御手法”，電子情報通信学会 NS 研究会，2013/12，香川

山本嶺、山崎託、三好匠、田中良明，“アドホックネットワークにおける端末移動に基づく Opportunistic Routing”，電子情報通信学会ソサイエティ大会，2013/9，福岡工業大学

山崎託、山本嶺、三好匠、田中良明，“アドホックネットワークにおけるブロードキャストを利用したブロック伝送方式”，電子情報通信学会ソサイエティ大会，2013/9，福岡工業大学

山本嶺、三好匠、田中良明，“伝搬遅延推定に基づく Opportunistic Routing”，電子情報通信学会 NS 研究会，2013/3，残波岬ロイヤルホテル

Tatsuya Shirai、Ryo Yamamoto、Taku Yamazaki、Takumi Miyoshi，“Alternate Route Construction Method Using Node Mobility Prediction for Ad Hoc Multicasting”，IEICE General Conference. 2013/3. 岐阜大学

山本嶺、山崎託、三好匠、田中良明，“アドホックネットワークにおける伝搬遅延に基づくオポチュニスティック経路選択”，電子情報通信学会総合大会，2013/3，岐阜大学

山崎託、山本嶺、三好匠，“アドホックネットワークにおける近傍ノード協力形再送制御方式”，電子情報通信学会 NS 研究会，2012/12，愛媛大学

Ryo Yamamoto、Takumi Miyoshi、Yoshiaki Tanaka，“Neighbour traffic-aware load balancing method in ad hoc networks” Forth International Conference on Intelligent Network and Collaborative System, 2012/9. ブカレスト(ルーマニア)

山本嶺、三好匠、田中良明，“アドホックネットワークにおける近傍端末の通信状態に基づく経路制御手法”，電子情報通信学会ソサイエティ大会，2012/9，富山大学

山崎託、山本嶺、三好匠，“アドホックネットワークにおける近傍ノードを利用した連続再送制御”，電子情報通信学会ソサイエティ大会，2012/9，富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本嶺 (YAMAMOTO, Ryo)

早稲田大学大学院国際情報通信研究科助手
研究者番号：9058153