

アドホックネットワークルーティングにおけるグレーゾーン問題の検討

溝 口 和 寛[†] 北 須 賀 輝 明^{††}
中 西 恒 夫^{††,†††} 福 田 晃^{††}

無線 LAN IEEE 802.11b ネットワークではパケット到着率が急激に低下するグレーゾーンが存在する。グレーゾーンはマルチホップでネットワークを構成するアドホックネットワークに、より大きな悪影響を与える。アドホックネットワークルーティングで得られた経路にグレーゾーンが含まれると、TCP による通信がほとんどできないといった問題が起こる。本研究では実環境でのグレーゾーンの影響を測定した。その結果を元にアドホックネットワークでのグレーゾーン問題を、経路制御パケットのパケットサイズと伝送速度を変化させることで軽減することを提案する。

A Consideration of Gray Zone Problem in Ad-hoc Network Routing

KAZUHIRO MIZOGUCHI,[†] TERUAKI KITASUKA,^{††}
TSUNEO NAKANISHI^{††,†††} and AKIRA FUKUDA^{††}

In IEEE 802.11b wireless LAN, there are the area where packet delivery ratio drops away. The area is called a gray zone. The performance of ad-hoc network is affected by the gray zone. When a route discovered by ad-hoc network routing protocols contains gray zone, throughput of TCP connection is degraded extremely. In this paper, we measure the impact of the gray zone in an actual environment. Based on the results of experiments, we propose new mechanism which changes size and bit-rate of routing packets to reduce the effect of gray zone.

1. はじめに

現在、情報通信技術の発達により大容量のデータを素早く送信できるようになり、通信媒体も有線から無線へと変化している。しかし、現在の無線通信技術は携帯電話の基地局や無線 LAN のアクセスポイントなど、既存のインフラストラクチャがないと様々なサービスを受けることができない。そこで、これらのインフラがない場所でも無線携帯機器で動的にネットワークを形成する、アドホックネットワーク¹⁾が研究されている。各無線通信機器の通信範囲は限られているので、直接通信できない端末には間にある他の端末にパケットを中継してもらうことにより通信する。そのた

め、各無線通信機器はルーターとしての役割も担わなければならない。

アドホックネットワークでは主に無線通信でネットワークを形成する。無線ネットワークではノード間の距離が近い場合には通常通りの通信ができるが、ノード間の距離が離れるにつれてパケット到着率が下がり、最後には全く通信できなくなる。このパケット到着率が下がる範囲を本研究ではグレーゾーンと定義する。このグレーゾーンでは、既存のアドホックネットワークのルーティングプロトコルはうまく対応できずに、通信に大きな悪影響を与える。そのため、アプリケーションは想定された動作をしない場合がある。

本研究ではこのグレーゾーンの実環境での範囲と影響を計測し、その対策について検討する。そして、グレーゾーンを軽減するための手法を提案する。

2 章では関連研究を述べ、3 章でグレーゾーンとその問題について述べる。4 章で実験結果を述べ、5 章でグレーゾーンの軽減手法を提案し、6 章でまとめる。

[†] 九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School of Information Science and Electrical
Engineering, Kyushu University

^{††} 九州大学大学院システム情報科学研究院
Faculty of Information Science and Electrical Engineering,
Kyushu University

^{†††} 九州大学システム LSI 研究センター
System LSI Research Center, Kyushu University

2. 関連研究

本節ではグレーゾーン問題に関する先行研究として、参考文献²⁾の概要を述べる。この文献では通信グレーゾーン (Communication Gray Zone) として、本研究のグレーゾーンと同じ問題についての原因、解決方法を述べている。無線リンクは無線 LAN 802.11b³⁾で形成されることを前提としている。アドホックネットワークルーティングプロトコルの AODV では、定期的に HELLO メッセージをブロードキャストすることで、隣接ノードに存在を通知する。しかし、この HELLO メッセージを受信できる範囲には通信グレーゾーンが存在する。そこでは、HELLO メッセージは受信できるがデータパケットを交換することはできない。そのため、アドホックネットワークのルーティングプロトコルが提供する経路とデータ通信できる経路とは一致しない。

参考文献²⁾では AODV において、この通信グレーゾーン問題を解決するために 3 つの手法を提案、評価している。順に 3 つの手法を述べる。1 つ目の手法はブロードキャストされる HELLO メッセージに隣接情報を付加する方法である。これにより、双方向のリンクを判別しそのリンクのみを使用する。2 つ目の手法は HELLO メッセージを連続して複数回受信したリンクのみを使用する手法である。この手法は 1 つ目の手法と違い、HELLO メッセージに情報を付加する必要はない。3 つ目の手法は SNR (Signal to Noise Ratio) を用いて、SNR の小さいリンクを排除する。SNR が小さいならば、そのリンクがグレーゾーンである確率が上がるからである。

論文中の実験により、これらの 3 手法の中では 3 つ目の SNR を用いる手法が一番性能がよい。

3. グレーゾーン問題

3.1 グレーゾーン

アドホックネットワークは主に無線通信でネットワークを構成する。本研究では無線 LAN IEEE 802.11b でアドホックネットワークを形成した場合を考える。無線 LAN では送信したパケットが届いたり届かなかったりする範囲がある。無線通信ではノード間の距離が近い場合は通信できるが、距離が離れていって通信性能が劣化し、最後には全く通信できなくなる。この無線パケットのパケット到着率が急激に落ちる範囲を、本研究ではグレーゾーンと定義する。

図 1 を用いてグレーゾーンを説明する。図 1 はノード A のパケット送信可能範囲を示し、ドーナツ型の

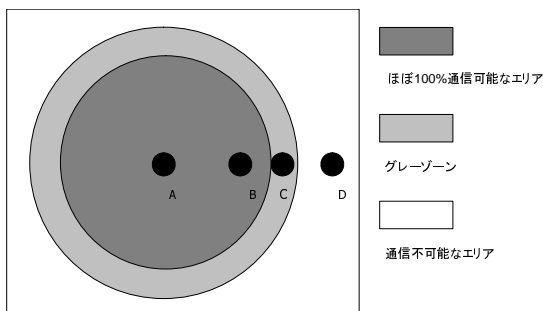


図 1 グレーゾーン

部分がグレーゾーンである。ノード A のパケット送信可能範囲の円のうち、内側の円はパケット到着率がほぼ 100% の範囲、外側の円はパケット到着率がほぼ 0% になる地点を表している。この内側の円と外側の円との間の範囲がグレーゾーンである。ノード B は内側の円の範囲にあり、ノード D は外側の円の外にいる。このとき、ノード A はノード B と正常に通信できる。逆に、ノード D とは全く通信することができず、ノード D の存在を知ることができない。

一方、ノード C は内側の円と外側の円の間に、つまりグレーゾーンにいる。このため、ノード A が送信したパケットは全てノード C に届くとは限らない。パケット到着率が 0% ~ 100% の間なので、ノード A がノード C にパケットを送信してもパケットが届く場合と届かない場合がある。また、ノード C が周囲にいるかどうか、正確に判断できない。このグレーゾーンは通信に様々な悪影響を与える。例えば、通信速度の劣化などである。さらに、このグレーゾーンの境界は刻々と変化する。例えば、無線 LAN では周囲の環境により、通信を行うことができる範囲が動的に変化するからである。そのため、図 1 のノード B やノード D もグレーゾーンに入る可能性がある。

3.2 アドホックネットワークへの影響

このグレーゾーンは特にアドホックネットワークでより大きな影響を与える。シングルホップの無線ネットワークでは、通信性能劣化などの悪影響は基本的にグレーゾーンにいるノードのみに影響する。一方、アドホックネットワークではマルチホップで通信を行うため、グレーゾーンが他のノードにも深い影響を与えることがある。グレーゾーンのリンクが経路上にある場合、そのリンクを使用して通信を行っている全ノードに影響を与えるからである。

また、ルーティングプロトコルにも悪影響を与える。アドホックネットワークのルーティングではブロードキャストで経路を発見、維持することが多い。しかし、

グレーゾーンがあるため経路制御によって得られた経路が実際の通信に使用できるとは断言できない。もし、パケット到着率が50%のリンクの場合、ブロードキャストされた経路制御パケットは2回に1回は届くことになる。しかし、そのようなリンクでは期待されるような通信は行うことができず、通信品質は著しく低下する。データパケットは経路制御パケットのように一度でも届けばいいわけではない。特にTCPでは送信パケットに対するACKが必要なのでより通信品質の低下が激しい。さらに経路制御パケットの方がデータパケットよりも送信可能範囲が広いと考える。それはパケットサイズと、無線LANの伝送速度によるものである。この2つについては4.2.3項で述べる。

このように、アドホックネットワークのルーティングプロトコルで使用されるルート探索で得られた経路で実際の通信ができるとは限らない。

4. 実環境でのグレーゾーンの調査

前章まででグレーゾーン問題のアドホックネットワークに与える影響について述べた。本章ではこのグレーゾーンが与える影響を、実環境で調査する。

4.1 実験環境

本実験では携帯端末にザウルス SL-B500 を使用する。OS は Linux(カーネル 2.4.18-rmk7-pxa3) である。それに無線 LAN IEEE 802.11b カードを挿して通信を行う。実験中ザウルスは三脚に高さ 80cm で固定する。

実験の目的は実環境でのグレーゾーンの範囲を測定することと、グレーゾーンでのパケット到着率などの変化を測定することである。そのために2台の携帯端末ザウルスを用意し、この2台の間で通信を行い、パケット到着率などの変化を測定する。

次に各実験の詳細を述べる。行った実験は、TCP パケットの送信と UDP パケットの送信である。それぞれ、伝送速度を Auto, 11Mbps に固定、5.5Mbps に固定した場合の6通りで計測を行う。

TCP パケットの送信では TCP スループットを測定する。送信側の携帯端末ザウルスから受信側のザウルスに1分間パケットを送信し、その間の平均スループットを算出する。

UDP でのパケット送信では、IP 電話を通信モデルとする。IP 電話ではコーデックとして G.729A を使用した場合、10 ミリ秒間に 10 バイトの音声データを圧縮し、それを 20 ミリ秒ごとに 1 パケット 20 バイトを送信する。また、RTP ヘッダが 1 パケットあたり 12 バイト付加されている。そのため本研究では、32 バ

イトのデータを UDP で 20 ミリごとに送信する。これを1分間双方向で行い、パケット到着率とジッターを計測する。

TCP, UDP どちらの実験中もノート PC で無線 LAN のパケットキャプチャを行う。また、ザウルスで受信パケット毎の受信シグナル強度を記録する。

4.2 実験結果

4.2.1 TCP スループット

図2は距離とTCPスループットの関係を示すグラフである。横軸は距離(m)、縦軸はスループット(Mbps)である。グラフのAuto, 11Mbps, 5.5Mbpsはそれぞれ伝送速度を自動切替, 11Mbps, 5.5Mbpsにした場合である。自動切替の場合、伝送速度は無線LANカード内のアルゴリズムに従って1Mbpsから11Mbpsまで自動的に変更される。

伝送速度をAutoにした場合、50mでは約4Mbpsのスループットが出ているが、60mから徐々に下がりはじめ、110mではほぼ0Mbpsになる。

一方、伝送速度を11Mbps, 5.5Mbpsに固定すると通信できる距離がかなり短くなっていることがわかる。また、70m, 80mでAutoよりも5.5Mbpsの方がスループットが高いのは、無線LANで伝送速度を変更するアルゴリズム ARF (AutoRate Fallback) と TCP の組み合わせによる影響であると考えられる。

この実験により、伝送速度を11Mbpsや5.5Mbpsに固定した場合よりも、伝送速度をAutoで変更した場合の方が遠くまで通信をすることができることが確認できた。しかし、低速通信の範囲も広がっていることが分かる。

4.2.2 UDP パケット到着率

図3は距離とUDPパケット到着率を表したグラフである。横軸は距離(m)、縦軸はパケット到着率(%)を表している。図中のAuto, 11Mbps, 5.5Mbpsは図2と同様にしたものである。

TCP スループットと違い、伝送速度を Auto にした場合が常に最も高いパケット到着率を出している。次に 5.5Mbps, そして 11Mbps が一番パケット到着率が低い結果となった。図2と同様、伝送速度を固定すると、通信範囲は狭くなる。

また、図2と図3を比較すると、TCP スループットと UDP パケット到着率の距離による通信劣化の速度が明らかに違う。UDP よりも TCP の方がより近距離で性能が劣化する。この理由は以下のように考えられる。

- TCP のフロー制御
MAC 層でのエラーが増加しパケット損失率が上

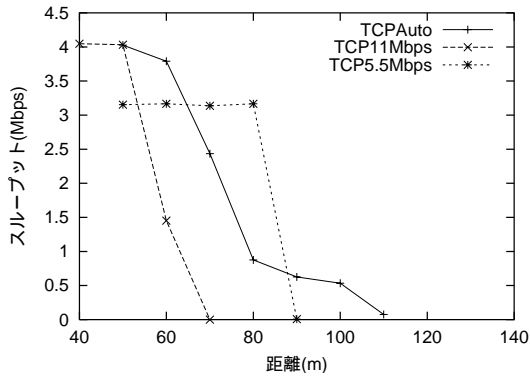


図 2 TCP スループット

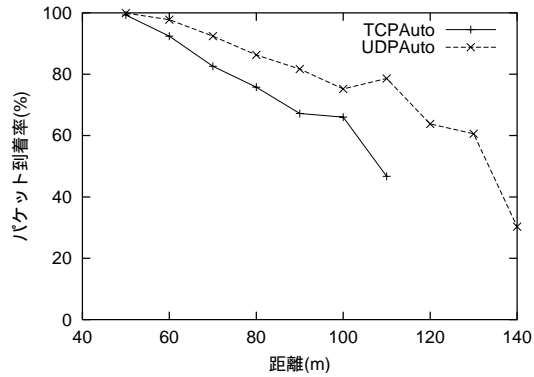


図 4 MAC 層パケット到着率 (TCP と UDP の比較)

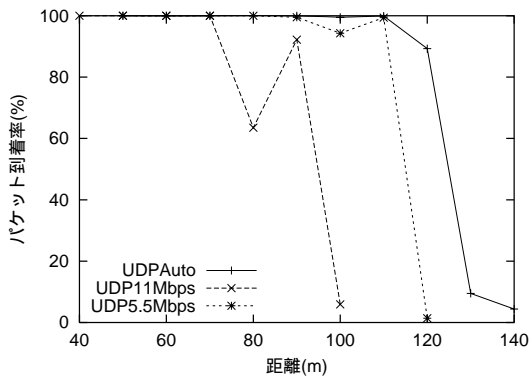


図 3 UDP パケット到着率

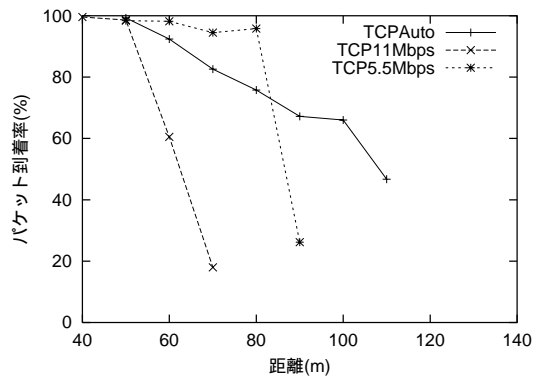


図 5 MAC 層パケット到着率 (伝送速度による違い)

がるにつれて、TCP は自動的にスループットを下げていく。本来はネットワークを公平に使用するための機能である。

● パケットサイズ

MAC 層での TCP パケットは 1536 バイト、UDP パケットは 96 バイトである。無線 LAN では、同じ伝送速度でパケットを送信してもパケットサイズが大きいほうがエラーになる確率が高くなる (4.2.3 項)。そのため、TCP パケットの方が UDP パケットよりも MAC 層でのパケット到着率が低くなる。

4.2.3 MAC 層パケット到着率

本項では MAC 層でのパケット到着率について述べる。図 4、図 5 は MAC 層のパケット到着率のグラフである。横軸、縦軸は図 3 と同様である。MAC 層のパケット到着率は次のように定義する。MAC 層で送信したパケットが届いた割合であり、パケットの再送は考慮しない。つまり、1 度目で届かず再送によって届いた場合、MAC 層でのパケット到着率は 50 % となる。

図 4 は TCP 通信と UDP 通信を比較したグラフである。同じ距離では常に TCP パケットの方が UDP パケットよりもパケット到着率が低い結果となった。この理由は両者のパケットサイズの違いによるものと思われる。今回の実験の MAC 層でのパケットサイズは TCP パケットは 1536 バイト、UDP パケットは 96 バイトである。無線 LAN では伝送速度、距離によって誤り率が異なる。ビットあたりの誤り率が等しい場合、パケットサイズが大きい方がパケットあたりのエラー確率が大きくなる。そのため、TCP パケットの方が UDP パケットよりもパケット到着率が低いと考える。仮に、UDP で今回の TCP パケットと同じ大きさのパケットを送信した場合、パケット到着率はほとんど同じになると推測する。

図 5 は TCP の伝送速度による MAC 層でのパケット到着率の変化を示すグラフである。伝送速度を 11Mbps、5.5Mbps に固定した場合の方が到着率が短い距離で急激に落ちていく。これは伝送方式の違いが理由である。無線 LAN IEEE 802.11b で伝送速度を 11Mbps にした場合、高速に通信できる反面、距離

が離れるとすぐに誤り率が上昇し、パケットのエラー率が上がる。

5. グレーゾーン軽減手法の提案

本章ではアドホックネットワークでのグレーゾーンの影響を軽減するための手法を提案する。

本章では、グレーゾーンの定義を、アドホックネットワークのルーティングパケットが届くが、TCP 通信が全く行えない範囲と改めて定義する。

5.1 グレーゾーンの原因

前章よりパケットサイズと伝送速度によるパケット到着率に差があることが確認できた。これによりルーティングパケットとデータパケットの送信可能距離に差ができ、グレーゾーン問題が起こる。つまり、グレーゾーン問題を軽減するにはルーティングプロトコルが提供する経路と、実際の通信可能な経路が一致すればよい。そのためには、ルーティングパケットとデータパケットの送信可能範囲の差をなくす、もしくは減少させる必要がある。送信可能範囲に差ができる原因であるパケットサイズと伝送方式を、実際の通信で使用する場合に近づけることでグレーゾーンを軽減する。

無線 LAN は IEEE 802.11b を想定する。なお、今回アドホックネットワークのルーティングパケットは AODV の RREQ パケットなどのブロードキャストされるパケットをモデルとする。AODV の RREQ パケットの場合、MAC 層でのパケットサイズは 80 バイトである。本実験で計測した UDP パケットがこのモデルに非常に近く、MAC 層でのパケットサイズ 96 バイト、伝送速度 Auto の場合がこのモデルに該当するものとする。MAC 層でのパケット到着率を使用する理由は、ルーティングパケットがブロードキャストされることが多いからである。無線 LAN ではユニキャストされた場合と違い、ブロードキャストされた場合はパケットの再送がない。よって MAC 層でのパケット到着率を使用する。伝送速度が Auto の場合、基本伝送速度の 1Mbps 以外でも通信するが、グレーゾーンが関係する遠距離ではほとんど 1Mbps で通信しているのものでそのまま採用する。また、データ通信は TCP 通信で伝送速度は Auto の場合をモデルとする。

図 6 に通常のルーティングパケットと TCP の性能のグラフを示す。横軸は距離 (m)、縦軸左は TCP スループット (Mbps)、縦軸右はルーティングパケットの到着率 (%) である。オリジナルルーティングパケット相当 (96Byte, Auto) のグラフが通常のアドホックネットワークのルーティングパケットの到着率にあたる。グラフを見ると TCP スループットは 110m で約

76Kbps になる。120m の場合は、計測不可能であった。

一方、通常のルーティングパケットは 110m で約 78% の到着率である。そして、140m の地点で約 30% である。仮に TCP で通信できる範囲を 110m、オリジナルルーティングパケット相当 (96Byte, Auto) のパケット到着率が 150m で 0% になると仮定すると、グレーゾーンは 110m ~ 150m の範囲となる。この範囲では通常のルーティングパケットが届くことがあり、リンクが発見される場合があるが、TCP での通信は全くできない。

5.2 グレーゾーンの軽減手法

5.1 節をふまえて、次の 2 通りの手法を提案する。

- (1) 伝送速度を 11Mbps, 5.5Mbps に変更
- (2) パケットサイズと、伝送速度を変更

以降で提案手法の有効性を議論する際に用いるパケット到着率は 4 章の実験で与えられた MAC 層パケット到着率を利用する。ルーティングパケットサイズが 96 バイトの場合は UDP 実験の結果を利用し、1536 バイトの場合は TCP 実験の結果を利用する。

5.2.1 伝送速度を変更

1 つ目の手法は伝送速度を変更する手法である。通常のルーティングパケットは基本伝送速度である 1Mbps でブロードキャストされる。本手法ではルーティングパケットを 11Mbps または 5.5Mbps でブロードキャストすることにする。

図 6 に、ルーティングパケットの伝送速度を変更した場合のグラフを示す。改良ルーティングパケット相当 (96Byte, 11Mbps)、改良ルーティングパケット相当 (96Byte, 5.5Mbps) は、それぞれルーティングパケットの伝送速度を 11Mbps, 5.5Mbps にした場合である。通常のグレーゾーンは 5.1 節で仮定したように 110m ~ 150m とする。

ルーティングパケットの伝送速度を 11Mbps に固定した場合、60m から徐々にパケット到着率が下がり始め、100m でほぼ 0% になる。つまり、ルーティングパケットが届く範囲全てで、実際の TCP 通信ができるということである。よって、グレーゾーンはないと言える。

ルーティングパケットの伝送速度を 5.5Mbps に固定した場合、120m でパケット到着率がほぼ 0% になる。よって、グレーゾーンは 110m ~ 120m の範囲となりグレーゾーンを軽減できる。

5.2.2 パケットサイズと伝送速度を変更

2 つ目の手法はルーティングパケットのパケットサイズ、伝送速度を共に変更する手法である。ルーティングパケットのパケットサイズを 1536 バイトにし、

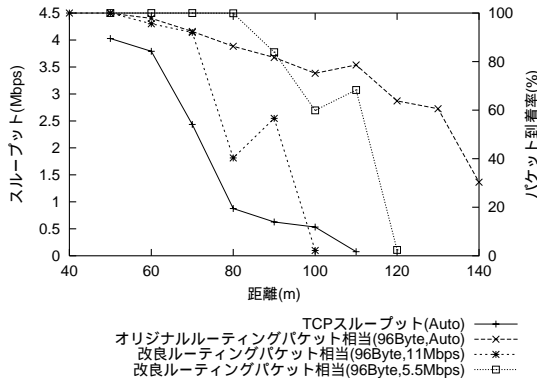


図 6 伝送速度を変更

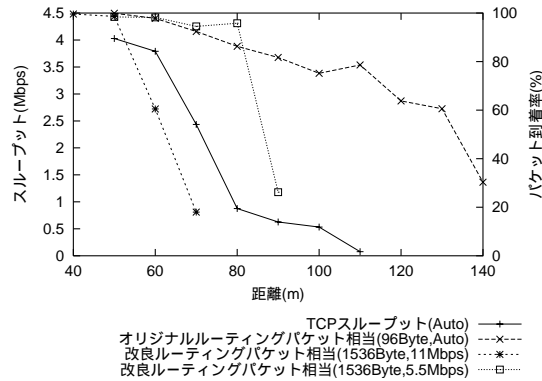


図 7 パケットサイズ, 伝送速度を共に変更

伝送速度を 11Mbps, 5.5Mbps のいずれかでブロードキャストする。

図 7 にグラフを示す。横軸, 縦軸は図 6 と同じである。改良ルーティングパケット相当 (1536Byte, 11Mbps), 改良ルーティングパケット相当 (1536Byte, 5.5Mbps) はルーティングパケットのサイズを 1536 バイトにしてそれぞれ伝送速度を 11Mbps, 5.5Mbps に固定した場合である。両者ともにパケット到着率が 0% の地点が計測できなかったため, 11Mbps の改良ルーティングパケットは 80m, 5.5Mbps の改良ルーティングパケットは 100m でパケット到着率が 0% になると仮定する。

通常のルーティングパケットの場合, グレーゾーンは 110m ~ 150m の範囲である。本項で提案している 2 種類のルーティングパケットは両方とも 110m 以前にパケット到着率が 0% になるため, グレーゾーン問題は完全に回避できたといえる。

しかし, ここで通信可能範囲が狭くなるという問題が発生する。例えば, 80m での TCP スループットは約 0.9Mbps であるが, 11Mbps の改良ルーティングパケットは 80m では全く届かない。そのためデータ通信できるリンクが利用できない。

6. 終わりに

本研究では無線ネットワークにおけるグレーゾーン, およびアドホックネットワークのグレーゾーン問題に取り組んだ。グレーゾーン問題とは, 経路制御によって得られた経路で実際のデータ通信ができない可能性があることである。このグレーゾーンが通信に与える影響を実環境にて測定した。そして, グレーゾーン問題を軽減, 回避する手法として, ルーティングパケットのサイズと伝送速度を変更する手法を提案し, 測定結果に基づいて提案手法の有効性を示した。

ただし, 伝送速度やパケットサイズを変更するルーティングパケットの選定には注意が必要である。他ノードとのリンクを発見, 維持するルーティングパケットには提案手法を使うことが非常に効果的といえる。一方, ノードやルートの切断を周囲に通知するルーティングパケットには提案手法を使用するべきではない。これらのパケットは多くのノードへ届いたほうがネットワーク全体の性能向上になり, 届かなかった場合は性能劣化となるからである。

今後の課題として以下のものが考えられる。

- 実環境でアドホックネットワークを構築し, 本手法の性能評価を行う。
- シミュレータに実環境のグレーゾーンを計測できるような改良を施し, シミュレーションによる性能評価を行う。
- IEEE 802.11a や 11b を用いて提案手法の評価, 更なる改良を行う。

謝辞 本研究の一部は, 総務省戦略的情報通信研究開発推進制度, および文部科学省科研費 (萌芽研究 15650004, 若手研究 (B) 15700062) による助成を受けている。

参考文献

- 1) C. E. Perkins et al., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley, 2001.
- 2) H. Lundgren, E. Nordstrom, and C. Tschudin, "Coping with Communication Gray Zones in IEEE 802.11b based Ad hoc Networks," ACM WoWMoM'02, pp.49-55, Sep., 2002.
- 3) ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Ed., "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," 1999.