

マルチホップ型次世代無線通信環境に適した基盤技術の研究

慶應義塾大学 環境情報学部 学籍番号 79958829

t99882mm@sfc.keio.ac.jp

平成 14 年 5 月 13 日

概要

近年、無線技術の発達や無線機器の低廉化により無線通信が普及してきている。そして現在、その場に居合わせたもの同士で自律的に構築されるマルチホップ型のアドホックネットワークというネットワーク形態の研究が進行している。次世代の無線通信環境では、このようなマルチホップ型無線ネットワークと無線基地局を必要とする従来の無線ネットワークが融合して、相互に通信可能な環境になると考えられる。このようなマルチホップ型無線通信環境においては中継端末が重要な役割を担うが、残存電力が少ない時には他人に経由されたくない、中継端末における盗聴やなりすましが容易である、各中継端末で宛先端末がインターネット上とアドホックネットワーク上のどちらににいるか判断するのは困難なため通信制御が煩雑になってしまうという問題が存在する。これらの問題を解決するために、本研究ではマルチホップ型次世代無線通信環境に適した 3 つの基盤技術を提案する。具体的には、アドホックネットワークとインターネットの相互接続性機能と、セキュリティを考慮に入れたネットワーク構築機構および効率の良い電力制御機構を持つアドホックネットワークシステムを提案する。これにより、人や機器の動的な移動を支援し、透過的なネットワーク接続性を提供する低コストでセキュアなマルチホップ型次世代無線通信環境の確立を目指す。

1 はじめに

現在無線通信は、キャンパスやオフィスでの無線 LAN や携帯電話を始めとする無線端末間の通信といった用途で利用されている。無線 LAN の標準規格でありキャンパスなどでの無線 LAN で一般的に使用されている IEEE 802.11b [3] の他にも、802.11b と同じ 2.4 GHz 帯を用いて 54Mbps を実現する 802.11g [3] や、消費電力が少なく通信速度は 500Mbps を実現する、位置測定・レーダー・無線通信の 3 つの機能を合わせ持っている UWB [11] など様々な新しい無線通信規格が登場している。同時に、無線機器の低廉化や小型化により無線端末が普及してきている。このような無線技術の発達や無線端末の普及により、無線通信はこれから益々キャンパスやオフィスに導入され、一般家庭や街中にも浸透してくると考えられる。

現在、その場に居合わせたもの同士で自律的に構築されるアドホックネットワークというマルチホップ型の新しいネットワーク形態の研究が進行している。アドホックネットワークには、家庭内で家電製品などを無線通信で結ぶホームネットワークの基盤としての利用や、既存のインフラが破壊された災害地における一時的な利用、クチコミネットワークや通行者への広告配信といった時間と位置に応じた情報の提供など様々な利用例が考えられる。

次世代の無線通信環境では、このようなマルチホップ型無線ネットワークと無線基地局を必要とする従来の無線ネットワークが融合して、相互に通信可能な環境になると考えられる。本研究ではこのような世界において、人や機器の動的な移動を支援し、ネットワーク環境を意識せずに周辺の機器や人と情報交換が可能なシステムを目標としている。こ

のようなマルチホップ型無線通信環境においては中継端末が重要な役割を担うが、残存電力が少ない時には他人に経由されたくない、中継端末における盗聴やなりすましが容易である、各中継端末で宛先端末がインターネット上とアドホックネットワーク上のどちらににいるか判断するのは困難なため通信制御が煩雑になってしまうという問題が存在する。

本研究は、これらの問題を解決する、マルチホップ型次世代無線通信環境における 3 つの基盤技術から構成される。まず、アドホックネットワークとインターネットの透過的な相互接続性を提案する。次に、セキュリティを考慮に入れたネットワーク構築機構および効率の良い電力制御機構を持つアドホックネットワークシステムを提案する。

本研究計画書の構成は、第 2 節で現在までの活動実績を述べ、第 3 節で問題意識を述べる。第 4 節で研究目的を述べ、第 5 節と第 6 節でそれぞれ卒業研究と修士課程における研究計画を述べる。第 7 節で政策・メディア研究科修士課程への進学希望理由を述べ、まとめる。

2 現在までの活動内容

私はコンピュータの勉強をするために AO 入試で慶應義塾大学環境情報学部に入學した。入学してからは、システムアーキテクチャやコンピュータネットワークの原理や動作といった知識の習得やプログラミングのスキルアップなどに力を入れ、コンピュータサイエンスに関する知識を自ら積極的に取得している。また、学部二年次春学期より情報処理 I 科目の SA を毎期行っている。

徳田研究室の ECN プロジェクトへの参加

学部二年次より、徳田研究室の Engineering approach to Computer Networks (ECN) [2] プロジェクトに参加している。同プロジェクトでは、無線通信に興味を持ち、学部二年次と三年次においてそれぞれ異なるテーマで研究を進めた。

学部二年次には、OS のカーネルプログラミングにより無線通信リンク上でパケット損失率などの統計値を取得する機能を実装した。また学部三年次には、アドホックネットワークにおける「効率の良い経路探索」をテーマに、HoWL (Hop-Wise Limited broadcast) というシステムを構築した。

2.1 成果物

ECN プロジェクトにおける成果として、2001 年 9 月に情報処理学会の全国大会において論文発表を行い [12]、今年の 7 月には DICO2002 シンポジウムにおいて論文発表を行う予定である [7]。また、HoWL のデモ用にアプリケーションを作成し、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスで開催されたオープンリサーチフォーラムなどにおいてデモを行った。さらに、N+I NETWORK Guide の 2001 年 11 月号に HoWL の記事が掲載された。また、インターネットプロトコルである TCP/IP についての専門書の翻訳に関わっている。

3 問題意識

本節では、現在までの問題意識について述べる。さらに、本研究が対象とするアドホックネットワークにおける現状での課題について述べる。

慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスでは、無線 LAN がキャンパス全域に敷設されており、建物外においても無線アクセスによるネットワーク接続が可能である。このような無線 LAN 環境を体験し、また、携帯電話などの無線端末の普及を目の当たりにして、無線通信がこれからのネットワーク環境に必要な不可欠であると感じた。そして、ECN プロジェクトにおいてネットワークについて勉強するうち、無線通信の新しい利用形態として研究が進められているモバイルアドホックネットワークに興味を持った。

図 1 に、現在一般的に利用されている携帯電話網と無線 LAN で使用されているネットワーク形態を図示する。ノートパソコンなど携帯型情報機器の多くが採用している近距離無線通信技術の赤外線通信などの例外は存在するが、従来の無線通信技術の多くは無線基地局を必要とする。

これに対してアドホックネットワークは、無線基地局を必ずしも必要としない。アドホックネットワークは移動可能な無線端末間で自律的かつ動的に構築されるネットワークであり、各無線端末の移動によるネットワーク構成の変化に適応して経路制御を行うという特徴を持つ。もう 1 つの大きな特徴として、アドホックネットワークでは、電波が届かず直接通信できない無線端末間においては途中の端末がデータを中継することによりマルチホップ通信を可能にする。アドホックネットワークの利点は、通信相手が近くにいる場合は無線基地局を経由する必要がないことやインフラの敷設が困難な場所でインフラなしに利用可能なことやマ

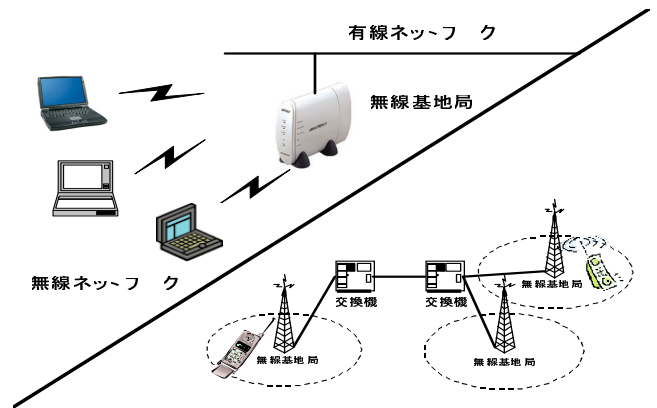


図 1: 無線基地局を必要とする従来の無線通信

ルチホップすることによりネットワークへの接続性を持つ領域が広がることなどである。

アドホックネットワークの具体的な利用例としては、携帯電話が圏外の時に無線基地局に接続可能な人を経由して基地局へ接続することや、一定の領域内に存在する友達同士でのチャットなどが挙げられる (図 2)。図 2 の点線で示されている円は、それぞれの無線端末の電波到達範囲 (セル) である。従来の無線通信環境ではセル内の無線端末とのみ通信可能なシングルホップ無線通信技術が用いられていたが、アドホックネットワークではセル内の無線端末を中継端末としたマルチホップ無線通信によりセル外の無線端末とも通信可能である。

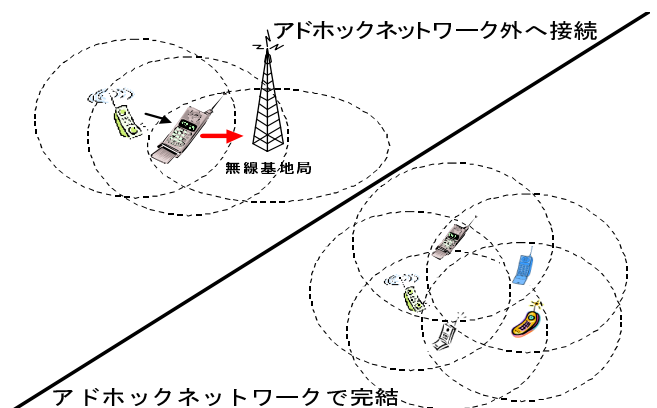


図 2: モバイルアドホックネットワークの利用例

現在、インターネットにおける標準化団体である IETF の Mobile Ad-hoc Networks (MANET) Working Group [8] において、DSR [5] や AODV [1] などの様々なモバイルアドホックネットワーク用のルーティングプロトコルが提案されている。しかし、これらの多くは移動する端末間での通信の継続性を主な目的としており、アドホックネットワークがユーザにとって容易に利用可能な環境になるまでには多くの課題が存在する。

アドホックネットワークにおける基盤技術に関する現状での課題を以下に述べる。

- **インターネット相互接続性が必要である**

既存研究の多くはアドホックネットワーク内で完結する通信形態のみを想定しているが、無線基地局と直接通信不能な場合にマルチホップ通信により基地局にアクセスする場合など、アドホックネットワーク外に接続する通信も存在するため、インターネット相互接続性を提供する必要がある。

- **経路探索にかかるオーバーヘッドが高い**

アドホックネットワークでは通信経路が絶えず変化する可能性があり、必要に応じて再度経路探索を行うので、効率の良い経路探索が必須である。

- **電力が制限されている**

マルチホップ型のネットワークでは中継端末が重要な役割を担うので、固定端末と比べて電力が制限されている携帯端末に対して効率の良い電力制御を行う必要がある。

- **有線環境よりも盗聴やなりすましが容易である**

無線環境では有線環境よりも利用者間の盗聴やなりすましが容易であり、悪意を持つ端末がネットワーク内に存在する可能性があるため無線端末を中継することにより更に危険性が高まる。そのため、認証機能や暗号化機能などを持つセキュリティ機構が必要である。

- **スケーラビリティを考慮する必要がある**

ネットワークを構成する無線端末の数が増えるほど通信制御が煩雑になるため、スケーラビリティについて考える必要がある。

4 研究目的と概要

本研究では、前節に示した課題を解決するために以下の4つの機能を実現する。これにより、透過的なネットワーク接続性、最小限のネットワーク構築コスト、安全なネットワークを実現する。

- **インターネット相互接続性機能**

本機能は、アドホックネットワークとインターネットの両方にアクセス可能な端末をゲートウェイとして用いたアドホックネットワークとインターネットの透過的な相互接続性を提供する。また、アドホックネットワークで採用しているアドレス方式がインターネットのIPアドレスと異なる場合は、ゲートウェイが発信元のプロキシ端末となる。これにより、透過的なアドホックネットワークとインターネットとの融合を実現する。

- **効率の良い経路探索機構**

本機能では、宛先端末の現在の位置を推測することにより効率の良い経路探索を実現する。具体的には、宛先端末までの通信経路が切断する前に使用していた経路のホップ数の履歴を基に経路探索範囲を制限することにより、経路探索する必要のないネットワーク部分の電力や帯域を節約し、経路探索完了までにかかる遅延を短縮する。これにより、経路探索時のネットワークにかかるオーバーヘッド軽減を可能にする。

- **残存電力を考慮に入れた効率の良い経路制御機構**

本機能は、ネットワーク接続性を保持するネットワーク

領域の最大化を目的とする。ここで、一定領域以内に存在する端末のうち、中継端末が存在しないために通信不能な端末を到達性がない端末と呼ぶ。中継端末が少ないほど到達性がない端末が発生する可能性が高いため、残存電力が多い端末を優先的に経由することにより各端末の活動時間を最大限にすることを目指す。具体的には、複数経路が存在した場合に残存電力が多い無線端末を経由する経路を選択する。例えば、店先の固定端末など電力供給が行われている端末を優先的に経由する。また、遠方へ送信するほど送信電力がかかるので、発信元と受信先の距離に応じて送信電力を変更することにより必要最小限の電力消費を可能にする。各無線端末の電力制御を行うことにより、ネットワーク接続性を保持するネットワーク領域の最大化を可能にする。

- **セキュリティを考慮に入れたネットワーク構築機構**

本機能は、アドホックネットワーク上から悪意を持つ端末を排除することを実現する。具体的には、ネットワークに参加する端末を特定するための「ネットワーク参加時の認証機能」、なりすまし対策としてパケットに発信者を特定する情報を暗号化して付加する「パケット単位での認証機能」、データの盗聴を防ぐための「データの暗号化」などを実現する。これにより、ユーザに安全なネットワークを提供する。

また本研究では、インターネットで用いられているネットワーク上の全端末への経路を把握しているプロアクティブ方式に対して、通信する必要性が発生してから宛先端末までの経路を探索するリアクティブ方式を採用する。リアクティブ方式は通信する必要がある端末への経路制御のみ行うので、スケーラビリティを考慮した方式と言える。リアクティブ型のルーティングプロトコル上に上述の4つの機能を実装することにより前節で示した課題を解決して、人や機器の動的な移動を支援し、透過的なネットワーク接続性を提供する低コストでセキュアなマルチホップ型次世代無線通信環境を実現する。

5 卒業研究

本節では卒業研究について述べる。卒業研究では、前節で提案したマルチホップ型次世代無線通信環境における「インターネット相互接続性機能」と「効率の良い経路探索機構」の実装と評価を行う。

5.1 想定環境

図3は卒業研究における想定環境である。アドホックネットワーク内に、インターネット接続性を持つゲートウェイが少なくとも1台存在することを想定している。ネットワークを構成する無線端末は2台～200台程度を想定しており、無線端末の移動速度は移動しないものから車の速度程度を想定している。例えば、キャンパスや街中など人が集まる場所を想定している。図3に示すセルは、それぞれの無線端末の理論上の電波到達範囲であり、実際には送信電力や障害物の有無などによりセルの大きさは変化する。また、セル内の無線端末を中継端末としたマルチホップ無線通信により

セル外の無線端末とも通信可能である。

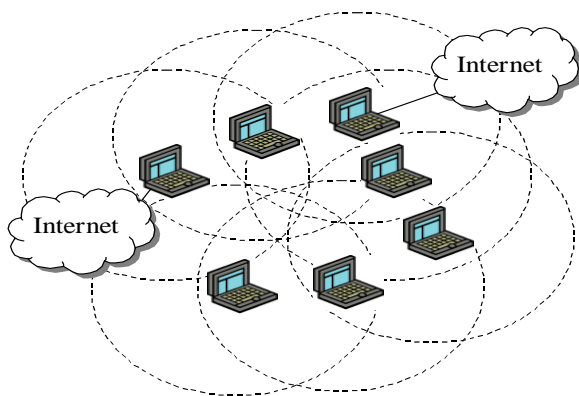


図 3: 想定環境

5.2 研究概要

マルチホップ型次世代無線通信における通信には、アドホックネットワーク内で完結する通信とアドホックネットワーク外に接続する必要がある通信の 2 通り存在する。それらを区別して、インターネットに接続する必要がある場合は透過的に「インターネット相互接続性機能」を提供するゲートウェイを実装する。また、動的にネットワークの構成が変化するアドホックネットワークにおいて、通信している無線端末間のホップ数の履歴を考慮に入れた「効率の良い経路探索機構」の実装と評価を行う。

本研究が提案するマルチホップ型次世代無線通信環境における 2 つの独立した機能の概要図を図 4 と図 5 に示す。次に、「インターネット相互接続性機能」と「効率の良い経路探索機構」の具体的な内容について説明する。

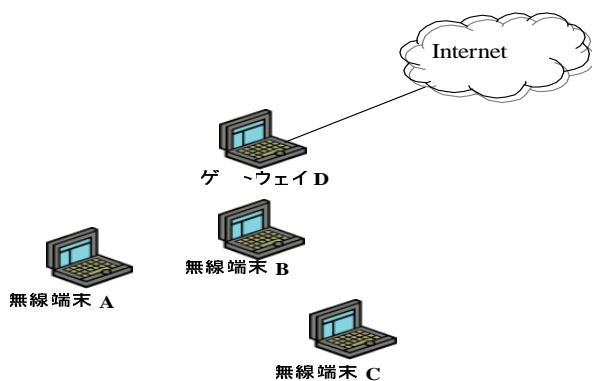


図 4: インターネット相互接続性

インターネット相互接続性機能

ユーザにとって容易に利用可能な環境を実現するためには、インターネットに接続する必要がある場合に透過的にインターネット相互接続性を提供する機構が必須である。本機能では、アドホックネットワークとインターネットの両方にアクセス可能なゲートウェイを用いてこれを実現する。

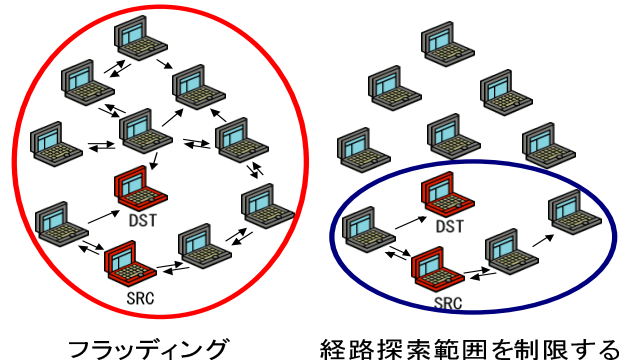


図 5: 効率の良い経路探索

本機能を具体的に説明する。本機能では宛先端末がアドホックネットワーク上に存在しない場合はインターネット上に存在すると仮定する。例えば図 4 において、アドレス「A」、「B」、「C」以外のアドレス「Z」に宛てたパケットをゲートウェイが受信した場合、ゲートウェイは「Z」がインターネット上に存在すると判断する。ゲートウェイがインターネット上においてホスト「Z」を探索し、「Z」に対してホスト到達不可というエラーメッセージを受信した場合、「Z」には以下の 3 通りの可能性が考えられる。

1. インターネット上に存在するが、一時的に稼働していない。
2. アドホックネットワーク上に存在するが、一時的にネットワークを離れているまたは接続性が途絶えている。
3. 元々存在しない。

本機能では、以上 3 通りのそれぞれの実現度を検討して、ホスト到達不可エラーを受信したホストに対するアクセス禁止期間やアクセスを試行可能な回数の上限を決定する。

また、インターネットとアドホックネットワークで採用しているアドレス方式が異なる場合は、ゲートウェイがプロキシ端末となり、パケットの発信元アドレスにはゲートウェイのアドレスを挿入する。さらに、ネットワーク上に複数のゲートウェイが存在する場合は、ゲートウェイにかかるオーバーヘッドを分散するために、アクセス可能な各ゲートウェイへのホップ数や各ゲートウェイがその時点で処理している通信数をもとに利用するゲートウェイを決定する。また本システムでは、インターネットにアクセス可能なアドホックネットワーク内の端末はすべてゲートウェイとして機能することが可能なので、残存電力を基にゲートウェイを選出するアルゴリズムを考案する。

この機構を実機上に実装し、評価ではインターネットにアクセスするのにかかる遅延とゲートウェイにかかるオーバーヘッドを測定する。また、関連研究 ([9]) との比較評価として、実装コストやスケーラビリティを評価基準とした定性的な比較を行う。

効率の良い経路探索機構

アドホックネットワークでは全ての端末が無線ルータとなって他の端末へのパケット転送を行うという特徴を持つ。

この特徴を利用して、想定するネットワーク内の全ての端末にパケットを転送する手法をフラッディングと呼ぶ [4]。アドホックネットワーク用に提案されたいくつかのルーティングプロトコルでは、経路探索時にフラッディングを行って宛先端末を見つける。しかし、フラッディングは宛先端末の位置を考慮しない単純な方式であるために、電力や帯域などのネットワークにかかるオーバーヘッドが高い。

本機構では、特定の端末と通信している際に使用経路の通信リンクが切断して再度経路探索を行う際に、使用経路のホップ数の履歴を基に経路探索範囲を制限する。例えば、使用経路のホップ数が 3 ホップ、4 ホップ、5 ホップと変化してきた場合、遠ざかっている可能性が高いので、経路探索範囲を 6 ホップに制限する。実際には、制限した経路探索範囲内に宛先端末が存在しないという事態を避けるために範囲に α ホップ分余裕を持たせる。また、制限した範囲内に相手が存在しなかった場合は範囲を β ホップ分広げて再度探索を行う。 α や β の値はシミュレータを用いて最適な値を求める。

この機構をシミュレータ上で実装し、評価では経路探索範囲を制限する関連研究 ("LAR" [6] や "Distance-Based Scheme" [10]) との比較を行う。まず定性的評価として、実装コストやアルゴリズムの単純度を評価基準とした性質面での比較を行う。次に定量的評価として、ネットワークにかかるオーバーヘッドと経路探索完了までにかかる遅延を評価項目に用いた比較を行う。

6 修士課程における研究計画

修士課程における研究は以下に示す 3 段階で進行する。また、各段階で研究成果を学会での論文などを通じて発表する。

ネットワーク構築機構の確立

卒業研究で行う「インターネット相互接続性」に加えて、「セキュリティを考慮に入れたネットワーク構築機構」の研究を行う。ユーザに対する透過的なネットワーク接続性とユーザが安心して利用可能なセキュアなネットワークを実現することにより、ユーザにとって容易に利用可能なネットワークを構築する。評価方針としては、実装コストや使用するアルゴリズムの計算量を評価基準に用いた関連研究との定性的な比較評価を行う。

通信経路制御機構の確立

卒業研究で行う「効率の良い経路探索機構」に加えて、「残存電力を考慮に入れた効率の良い経路制御機構」の研究を行う。これらにより、電力や帯域の消費を抑える効率の良い経路制御機構を構築する。評価方針としては、各無線端末の消費電力や送信された経路制御パケットの総バイト数を評価項目とした関連研究との定量的な比較評価を行い、本機構による通信効率の改善を実証する。

マルチホップ型次世代無線通信環境の確立

以上を統合して、透過的なネットワーク接続性を有する低コストでセキュアなマルチホップ型次世代無線通信環境

を構築する。また、統合システムを多角的に評価し、実用に耐え得るシステムであるか検討する。

以上の成果をもとに修士論文を執筆する。また、これらの成果物はインターネットや学会発表などを通じて広く世界に公開する。

7 まとめ

本研究計画書では、修士課程終了までの私の研究テーマである「マルチホップ型次世代無線通信環境に適した基盤技術の研究」について述べた。

本研究が提案する次世代無線通信環境は、アドホックネットワークとインターネットが融合した世界を想定している。本研究ではこのような世界において、人や機器の動的な移動を支援し、ネットワーク環境を意識せずに周辺の機器や人と情報交換が可能なシステムを目標としている。

アドホックネットワークは、ネットワークを構成する各端末同士の助け合いにより成立する技術である。そこで、マルチホップ型次世代無線通信環境を実現するためには、技術的な問題以外にも倫理的な問題や法律の問題やビジネスモデルの考案といった課題が存在する。政策・メディア研究科には幅広い分野を専攻する人達があり、本研究を進行する上で学ぶべきものが多い。また、政策・メディア研究科には実証実験用ネットワークを始めとするコンピューティング環境が整っており、研究を行うに当たって最適な環境である。さらに、本研究は政策・メディア研究科の先輩方に多くのアドバイスを指導を頂いている。以上の理由により、政策・メディア研究科への進学を強く希望する。

参考文献

- [1] Elizabeth M. Royer Charles E. Perkins and Samir R. Das. Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Internet-Draft [Work in Progress], March 2001.
- [2] Engineering approach to Computer Networks (ECN) Project. <http://www.ht.sfc.keio.ac.jp/ecn>.
- [3] IEEE 802.11 Standard (IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee). *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, June 1999.
- [4] C. E. Perkins J. Manner, M. Kojo, et al. Mobility Related Terminology. IETF Internet-Draft [Work in Progress], May 2002.
- [5] David B. Johnson Josh Broch and David A. Maltz. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. IETF Internet-Draft [Work in Progress], March 2001.
- [6] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya. Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks. In *Proceedings of ACM MOBICOM'98*, June 1998.
- [7] Minematsu, Saito, Aida, Tokuda. Hop-Wise Limited broadcast (HoWL) for Mobile Ad hoc Networks. In *DICOMO2002*, July 2002.
- [8] Mobile Ad-hoc Networks Working Group (MANET). <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>. Charter [Work in Progress], 1998-11-29.
- [9] C. E. Perkins R. Wakikawa, J. T. Malinen, et al. Global Connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks. IETF Internet-Draft [Work in Progress], November 2001.
- [10] Yuh-Shyan Chen Sze-Yao Ni, Yu-Chee Tseng and Jang-Ping Sheu. The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. In *Proceedings of ACM MOBICOM'99*, August 1999.
- [11] UWB. <http://www.uwb.org/>.
- [12] 峰松, 斉藤, 間, 徳田. モバイルアドホックネットワークにおけるリミテッドブロードキャストの測定と評価. 情報処理学会 第 63 回 全国大会, September 2001.