

## マルチチャネル・マルチホップ無線 LAN システムにおける 経路制御方式

瀧本 栄二<sup>†1</sup> 榎山 武浩<sup>†2</sup>  
毛利 公一<sup>†1</sup> 滝沢 泰久<sup>†3</sup>

無線 LAN 技術とマルチホップ技術を組み合わせることで、サービス範囲を拡大することが可能である。一方で、複数無線インタフェースの利用により、スループットの向上が期待できる。このような環境下では、トラフィックの状態やチャネルの利用状況に応じた適応的な制御が必要である。そこで、本稿では、複数無線インタフェースおよびマルチホップ環境における自律分散型経路構築およびパケット分配制御方式について述べる。提案方式は、端末からアクセスポイントまでの経路における通信遅延に基づいて経路を構築する。さらに、各無線インタフェースの使用状況に応じてパケットを振り分けることで通信遅延を削減し、ひいてはスループットの向上を図る。

### A Route Management Method for Multi-Channel Multi-Hop Wireless LAN Systems

EIJI TAKIMOTO,<sup>†1</sup> TAKEHIRO KASHIYAMA,<sup>†2</sup>  
KOICHI MOURI<sup>†1</sup> and YASUHISA TAKIZAWA<sup>†3</sup>

Wireless service area can be enlarged by multi-hop techniques. Additionally, usage of prural wireless interfaces improve throughput. Under such environment, a communication control method which has adaptivity against traffic condition and channel utilization is needed.

In this paper, we propose an autonomous distributed path creation and packet distribution method. The proposed method creates a path based on communication delay between the node and a gateway. In addition, proposed method increase throughput by packet distribution technique based on utilization of each wireless interface.

#### 1. はじめに

無線 LAN システムは、アクセスポイント (AP) を経由したインターネットアクセスを提供するシステムであり、そのサービス提供範囲は AP と直接通信が可能な範囲である。マルチホップ無線 LAN システムは、アドホックネットワークで用いられるマルチホップ通信技術を応用し、サービス提供範囲を拡大することができる。また、近年の無線インタフェースの小型化と普及から、複数の無線インタフェースを 1 つの端末に搭載し、それらを効果的に使用することでネットワークのスループット向上を図る技術が注目され、またその有効性も報告されている。これらのことから、複数の無線インタフェースを持つ端末によってマルチホップ無線 LAN システムを構築することで、サービス提供範囲の拡大とスループットの向上を両立することが期待できる。複数の無線インタフェースを用いる場合、無線インタフェースごとに経路を作成することが可能である。このとき、最良のリンクメトリックとなる無線インタフェースを二者択一に採用したのでは、無線リソースの有効な活用ができない。

そこで、本稿では、複数無線インタフェースによるマルチホップアクセスネットワーク環境において、通信遅延の削減とスループットの向上を実現する自律分散型経路構築およびパケット分配方式を提案する。提案手法は、文献 1) のパケット分配特性に基づき、複数のアクセス経路からアクセス経路全体の平均遅延時間が最小となるアクセス経路を選択する。同様に、各無線インタフェースの平均遅延時間に基づいてパケットを分配することで、無線インタフェースを並列利用して通信性能の向上を図る。これらを組み合わせることで、同一のネットワーク負荷状況において、低遅延化を実現するとともにスループットを向上することが可能となる。

以下、本稿では、2 章で提案手法で想定する環境および複数無線インタフェース使用時のパケット分配特性について述べ、3 章で提案手法、4 章でそのシミュレーション評価による特性を示す。さらに、5 章で関連研究について述べたあと、最後に 6 章で本稿をまとめる。

<sup>†1</sup> 立命館大学 情報理工学部

College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University.

<sup>†2</sup> 立命館大学グローバルイノベーション研究機構

Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University.

<sup>†3</sup> 関西大学 環境都市工学部

Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University.

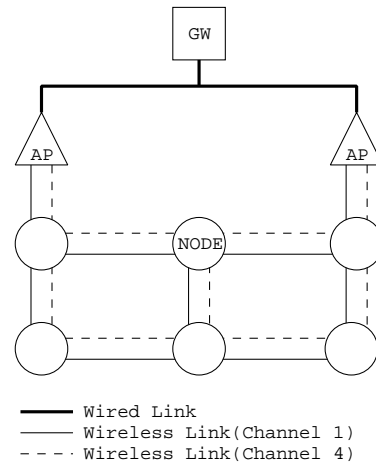


図1 想定環境

## 2. 想定環境とパケット分配特性

### 2.1 想定環境

本稿では、ゲートウェイ (GW)、AP、端末の3要素から構成される無線アクセスネットワークを想定する (図1参照)。APと端末は同数のIEEE802.11準拠の無線インタフェースを持ち、各無線インタフェースには互いに干渉しない異なる周波数チャンネルが割り当てられているものとする。GWとAP間は有線接続され、十分な帯域があるものとする。AP以下の無線通信部分はすべてアドホック型接続とし、使用されるBSSIDは適切に設定されているものとする。

### 2.2 パケット分配特性の概要

提案手法は、文献1)の低遅延と高スループットを実現するパケット分配特性に基づいている。本節では、このパケット分配特性について概説する (詳細は文献1)を参照)。

#### 2.2.1 リンクコスト

待ち行列理論に基づく、リンクの負荷はリンク内の平均待機パケット数として定量化できる。これをリンクコストとする。リンクコストは、無線インタフェースごとに定義でき、Littleの定理により次のように求まる。

$$d_i^x = F_i^x \cdot T_i^x \quad (1)$$

$d_i^x$  は端末  $i$  におけるリンク  $x$  のリンクコスト、 $F_i^x$  は端末  $i$  におけるリンク  $x$  のパケット到着率、 $T_i^x$  は端末  $i$  におけるリンク  $x$  の平均遅延時間である。遅延時間は、端末にパケットが到着もしくは発生してから送信完了するまでの時間であり、すなわちキュー内待機時間、メディアアクセス遅延時間、伝搬遅延時間を含んだ端末と隣接端末とのMAC層間の遅延時間の総和である。

式(1)から、一定の  $F_i^x$  において  $d_i^x$  が減少すると  $T_i^x$  も減少する。すなわち、リンクコストが小さくなると低遅延となる。また、同一のリンク容量 (すなわち  $d_i^x$  の最大値) において  $T_i^x$  が小さくなる場合、 $F_i^x$  を拡大できる。すなわち、遅延が減少することによりパケット量を増やすことができる。以上のことから、リンクコストを小さくすることで低遅延とスループットの拡大が期待できる。

これを端末からGWまでのマルチホップ経路について適用すると、その経路のコスト (経路コスト) はリンクコストの定義と同様に経路内の平均待機パケット数である。したがって、経路を構成する各端末のリンクコストの総和から経路コストを求めることができる。経路コストもリンクコストと同様の性質を持つため、経路コストを小さくすることで通信性能の向上が期待できる。

## 3. 提案方式

提案手法は、前章で述べた経路コストに基づき、端末からGWまでの経路を構築する。このとき、候補となる経路は複数存在するが、各経路の経路コストが最小となるものを選択する。その後、パケット分配のための分配比率を、リンクコストに基づいて算出する。以下、本章では、経路構築のためのリンクコスト・経路コスト算出と、分配比率の算出について述べる。

### 3.1 リンクコスト・経路コストの算出と経路の作成

提案方式におけるリンクコストとは、端末における「パケット受信 (または発生) から送信完了」までの時間である。複数の無線インタフェースを備えている場合、リンクコストは無線インタフェースごとに算出される。リンクコストの算出は、MAC層のキューへパケットを挿入してから宛先または中継端末からのACKを受信するまでの送信遅延時間をパケットごとに計測し、周期的にその平均をとることで行なう。ただし、ブロードキャスト時はACK応答がないため、計測はユニキャストパケットに限られる。

経路コストは、アップリンクの場合、当該端末から宛先 (想定環境では、無線区間であるGW) までの各リンクコストの平均の総和である。したがって、経路コストを算出する

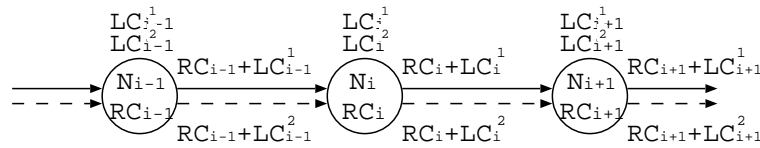


図2 経路コストの算出

ためには、AP までに通りうる経路上の全端末・インタフェースごとのリンクコストが必要である。提案方式では、各端末が周期的に当該端末のリンクコストと経路コストを含んだブロードキャストパケットを送信することで、これを実現する。このパケットは、他に GW のアドレス、送信元端末のアドレス、および送信元端末にとっての次ホップ端末のアドレスを含む。したがって、このパケットを周期的に受信することで、各端末は自身の隣接端末と GW のアドレスも同時に知ることができる。また、次ホップ端末のアドレスも広告することで、経路にループが作成されることを回避する。

ダウンリンクの経路を構築する場合は、GW に全端末の情報を集約する必要がある。そのため、ダウンリンク作成時には、アップリンクの経路が構築された後、経路情報を各端末から GW に通知する。これにより、GW は、全端末について、どの AP を経由して送信すべきかを決定することができる。

3 台の端末  $N_{i-1}$ ,  $N_i$ ,  $N_{i+1}$  が鎖状に配置されたトポロジにおけるリンクコストと経路コストの算出の様子を図 2 に示す。端末  $N_i$  における各無線インタフェースのリンクコストを  $LC_i$ 、図示された経路における経路コストを  $RC_i$  とする。各端末は、上述のとおり周期的にリンクコストと経路コストを隣接端末に広告する。この広告は無線インタフェースごとに行なわれるため、端末  $N_i$  はそれぞれ  $RC_{i-1} + LC_{i-1}^1$  と  $RC_{i-1} + LC_{i-1}^2$  を端末  $N_{i-1}$  から受信する。その後、端末  $N_i$  は、式 (2) によって経路コストを算出する。ここで、 $n$  は、無線インタフェースの数である。その後、端末  $N_i$  が自身の周期にしたがって広告を行うことで、後続の端末  $N_{i+1}$  以降へ経路コストが伝播していく。

$$RC_i = \sum_{k=1}^{i-1} \left( RC_k + \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n LC_k^m \right) \quad (2)$$

図 2 では、広告の伝播する方向を右方向で示しているが、実際にはブロードキャストであるため端末  $N_i$  は端末  $N_{i+1}$  からの広告も受信する。したがって、端末は、複数の隣接端末から広告を受信し、複数の経路を作成する。提案手法では、通信遅延を削減するために、

複数の経路から最小経路コストとなる経路を選択する。ここで、自端末のリンクコストを経路選択時に使用しないのは、リンクコストが該当する無線インタフェースを利用する際のコストであり、どの経路を選択しても必然的にそのリンクコストの影響を受けるためである。

### 3.2 パケット分配比率

前節の処理によって最小経路コストが作成されると、その経路に基づいて通信を開始することができる。このとき、最小のリンクコストを持つ無線インタフェースだけで通信を行なうと、無線リソースが有効利用できない。また、その無線インタフェースにパケットが集中するため、急激なリンクコストの増加が起きる。その結果、リンクコストの逆転が発生し他の無線インタフェースが選ばれることになるが、同様の現象により頻繁な無線インタフェース切替えが発生する。そこで、提案手法では、端末が搭載する複数の無線インタフェースにパケットを振り分ける。このとき、各無線インタフェースのリンクコストが均衡化されるようにパケット分配比率を調整する。

パケット分配比率は、各無線インタフェースのリンクコストに基づき、リンクコストが高い状態の無線インタフェースへの分配比率を小さくし、逆にリンクコストが低い状態の無線インタフェースへの分配比率を大きくする。したがって、無線インタフェースのリンクコストの逆数を、各無線インタフェースのパケット分配比率とする。ただし、ユニキャストパケットを送信回数がほとんどない初期状態では、正確なリンクコストが得られない。したがって、初期状態におけるパケット分配比率は、均等として扱う。

## 4. シミュレーション評価

提案方式の有効性を確認するために、シミュレーションによる評価を行った。今回の評価では、プロトタイプとしてアップリンクのみを対象とした。評価は、図 3 に示すネットワークポロジで行った。このトポロジでは、AP は 2 台あり、GW と AP 間には有線リンクで接続される。

シミュレーション諸元は、表 1 に示すとおりである。AP と端末は、IEEE802.11b 準拠の無線インタフェースを 2 つ持ち、相互に干渉しない周波数チャネルを割り当てた。また、見通し内通信環境を想定し、電波伝搬モデルとフェージングモデルを決定した。IEEE802.11DCF は、一般的に利用されていないことと、マルチホップ環境における不公平性が報告されている<sup>2)</sup> ことから使用しなかった。

シミュレーションは、800Kbps の CBR トラフィックを GW に送信する端末を 1 台～5 台まで変化させて行った。評価対象として、次の 2 通りの方式と比較した。ただし、経路構

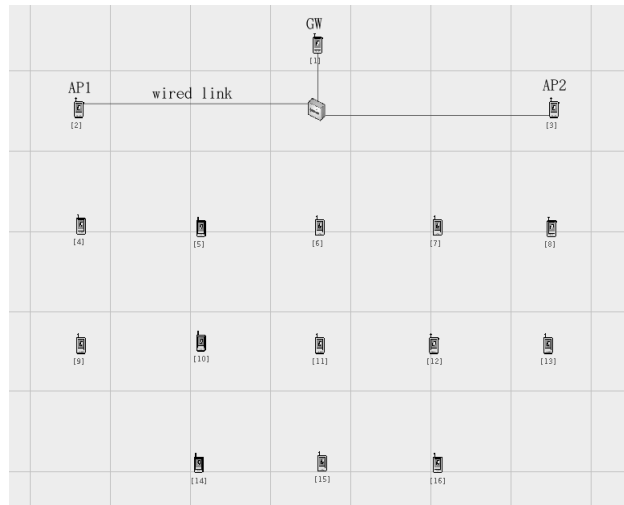


図3 ネットワークトポロジ

表1 シミュレーション諸元

パラメータ	値
シミュレーションエリア	750m 四方
端末構成	GW1 台, AP2 台, 端末 14 台
無線インタフェース数	2
通信方式	IEEE802.11b
通信レート	11Mbps
電波伝搬モデル	2 波モデル
フェージングモデル	Rice フェージング (ライス係数: $3\text{db}^3$ )
パケットサイズ (データ)	1024bits
コスト広告周期	1 秒

築についてはどの方式も提案方式と共通である。

- ラウンドロビン方式：パケット分配比率を 1 対 1 で固定。
- シングルリンク方式：リンクコストが低い無線インタフェースのみを使用。

図4に各トラフィック量におけるスループットを示す。トラフィック量が少ないときは、提案手法のスループットが他と比較して大きい。しかし、トラフィック量が増加するにつれて、提案方式とラウンドロビン方式との差がほぼなくなる。提案方式は、パケット分配比

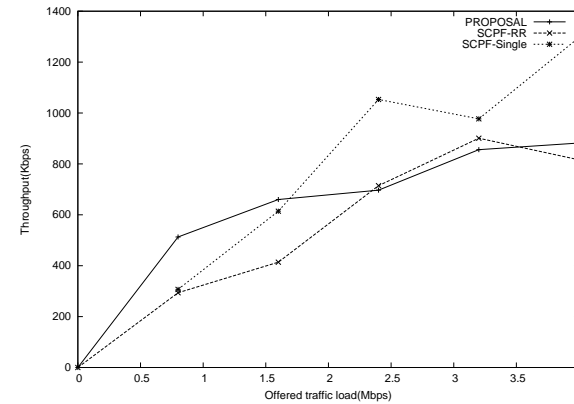


図4 スループットの変化

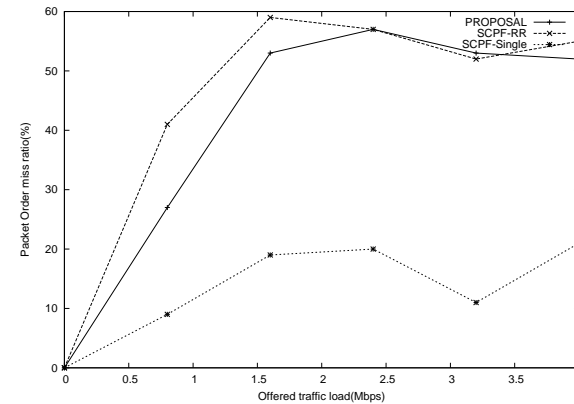


図5 パケット順序エラー率の変化

率が1対1のとき、5パケットずつ使用する無線インタフェースを切り替える。一方、ラウンドロビン方式では、1パケットごとに無線インタフェースを切り替える。そのため、トラフィック量が小さいときは、提案方式の方がパケット順序ミスが起こりにくく、結果としてスループットが高いという結果になっている。ラウンドロビン方式は、2つの無線インタフェースを平等に利用し、提案方式はキュー長が等しくなるよう動作する。しかし、今回のシミュレーションでは、同一の無線インタフェースを用いているため、提案手法の動作はラウンドロビンのそれと等しくなる。そのため、高負荷時における両方式の結果には、差が表れない。

一方で、高負荷時には、シングルリンク方式が最良のスループットを示した。これは、図5に示すパケット順序エラーが影響している。シングルリンク方式のパケット順序エラー率がほぼ20%以下で推移しているのに対し、それ以外の方式はトラフィック量が1Mbpsを越えると半数以上のパケットが到着順序エラーで破棄されている。

ここで、パケット到着率について着目する(図6参照)。トラフィックの増加によって低下するものの、提案方式のパケット到着率は高い値で推移している。ラウンドロビン方式も比較的高い値を示し、高負荷時には提案方式とほぼ同一であった。これは、上述のとおり高負荷時における両者の動作が一致するためである。これに対し、シングルリンク方式は、最良でも60%に満たない。しかし、スループットの観点では、シングルリンク方式が最良である。すなわち、複数無線インタフェースを使う環境では、パケット順序エラーがその通信性能に対して支配的であるといえる。

図7に端末・GW間における平均遅延の変化を示す。他の結果と同様、高負荷時においてはシングルリンク方式が最良という結果となった。平均遅延の算出は、CBRサーバによって正しく受信されたパケットを対象としている。そのため、パケット順序エラーの少ないシングルリンク方式の平均遅延が小さくなっている。したがって、パケット順序エラーが改善されれば、必然的に平均遅延も改善されると考えられる。

以上から考察すると、パケット到着率の観点では、提案手法は高性能であるといえる。しかし、複数の無線インタフェースを使用することと、経路切替えによりパケット順序エラー率が非常に高くなるという課題がある。この課題を解決することで、提案手法の性能を向上させることができる。また、今回のシミュレーションではUDP通信を行うCBRアプリケーションを用いたが、パケット順序エラーを修正する機能を持つTCP通信では、性能の向上が期待できると考えられる。また、本稿で想定する環境では、同一の無線インタフェースを利用したが、IEEE802.11bデバイスとIEEE802.11gデバイスのように通信速度が異なる

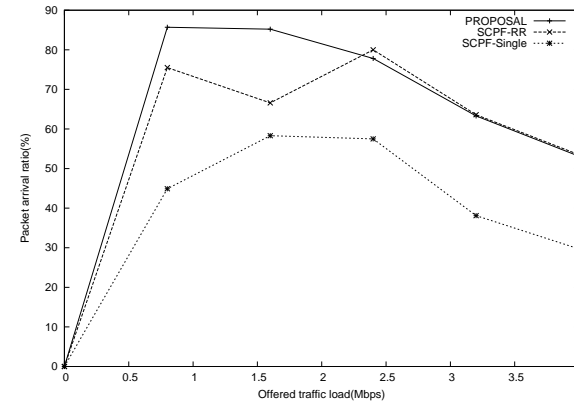


図6 パケット到着率

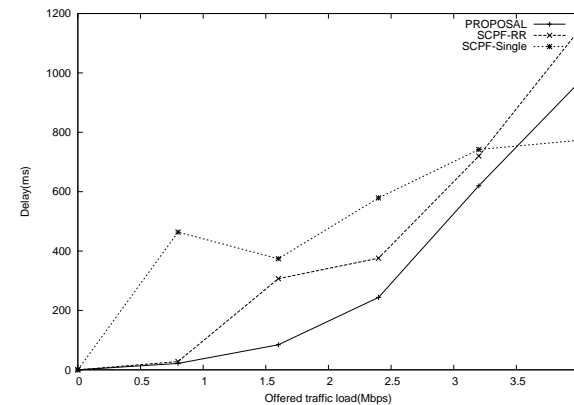


図7 平均遅延の変化

る無線インタフェースの組み合わせでは、パケット分配方式の利点が得られると考えられる。

## 5. 関連研究

複数の無線インタフェースを並列利用する研究として、EDPF<sup>4)</sup> (Earliest Delivery Path Fast) がある。EDPF は、複数かつ種別の異なる無線インタフェース環境において、各無線インタフェースの送信開始時間と送信遅延を見積り、それぞれの合計が平均化されるようにパケットのスケジューリングを行う。パケット分配の欠点はパケットの到着順序が入れ替わることであるが、EDPF では同じパケットサイズであれば入替りが発生する頻度が非常に小さくなる。ただし、EDPF が想定する環境は無線部分は 1 ホップであり、提案手法がマルチホップを前提としている点で異なる。マルチホップ環境では、端末から AP までの通信遅延を見積ることが難しい。そのため、EDPF をマルチホップ環境に適用してもパケット到着順序の改善は難しいと予想される。

無線アクセスネットワークをマルチホップで実現する研究として、マルチホップ無線 LAN システム<sup>5)</sup> と無線メッシュネットワークがある。両者とも複数の AP 間をアドホック接続することでそのサービスエリアを拡充しているが、前者は IP 層、後者は MAC 層でその処理を行っている。AP 間の通信に着目すると、ネットワークポロジは提案手法と同等であるが、複数無線インタフェースを必ずしも想定していないため、パケット分配に関する研究は少ない。提案手法は、マルチホップ無線 LAN システムと同じ IP 層で経路構築とパケット分配を行っているが、パケット分配を行う分提案手法が優位である。したがって、無線インタフェースを追加し、提案手法を適用することでマルチホップ無線 LAN システムの性能向上を図ることができると考えられる。

滝沢らは、提案方式と同じく文献 1) で示されたパケット分配特性に基づいたパケット分配制御方式を提案している。この方式は、IEEE802.11 と IEEE802.16 準拠の無線インタフェースを端末が備えていることを前提としており、通信速度の異なる複数インタフェースに適切にパケットを分配することで低遅延かつ高スループットを実現している。この方式では、経路制御およびパケット分配比率の決定を集中制御によって実現しており、提案手法は自律分散型の制御方式でこれを実現している。これは、提案手法は複数のアクセスネットワークが存在する環境において、それらを同時に利用することを想定しているためである。したがって、単一のアクセスネットワークのみが存在する状況では、滝沢らによる方式が優位であるが、複数のアクセスネットワークが存在する環境において、それらを相互に利用することを考えた場合提案手法が優位である。

## 6. おわりに

本稿では、複数の無線インタフェース搭載した端末で構成されるマルチホップ無線 LAN システムを想定し、スループットの向上と遅延時間の削減を目的とする経路構築およびパケット分配方式について述べた。提案方式は、パケット送信にかかる遅延から各無線リンクのリンクコストを計測し、端末・GW 間の合計リンクコストを最小化する経路を構築する。また、リンクコストに応じてパケットを分配することで、無線リンクを並列利用し、上記の目標を実現する。

ダウンリンクにおけるシミュレーションを行った結果、高いパケット到達率を達成した。しかし、パケット順序エラー率が高く、高負荷時におけるスループットと遅延が悪化することが分かった。この課題については、パケット順序エラーを改善することで解決できると考えられる。

今後は、パケット順序エラーを軽減する方式について検討する。また、今回のシミュレーションで行っていないアップリンクの評価を行い、さらにダウンリンクとアップリンクが複合したトラフィック環境についても評価を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) 滝沢泰久, 植田哲郎, 小花貞夫: IEEE802.11 と IEEE802.16 を用いた複合アクセス経路のパケット分配制御方式, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.12, pp.1506-1511 (2010).
- 2) 田井中智也, 増山博之, 笠原正治, 高橋豊: IEEE802.11 準拠マルチホップ無線 LAN におけるスループット不公平性の解析, 信学技報 NS2008-09, Vol.108, No.203, pp.81-86 (2008).
- 3) Choi, Y. and Choi, S.: LLC-Level FEC Scheme in IEEE 802.11 WLAN, *In Proceedings on IEEE APWCS '05* (2005).
- 4) Chebrolu, K. and Rao, R.: Bandwidth Aggregation for Real-Time Applications in heterogeneous Wireless Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.5, pp.388-403 (2006).
- 5) 大和田泰伯, 照井宏康, 間瀬憲一, 今井博英: マルチホップ無線 LAN の提案と実装, 電子情報通信学会論文誌 . B, 通信, Vol.89, No.11, pp.2092-2102 (2006).