

## パケットモニタリングに基づく無線リンクの品質評価手法を利用したメッシュアクセスポイント配置手法の一検討

安本直史<sup>†1</sup> 藤田 祥<sup>†1</sup> 江崎 浩<sup>†1</sup>

Wireless Mesh Network(WMN)は、設置コストの掛かる有線リンクの代わりに、無線リンクを中心に構築された費用対効果の高いネットワークである。WMNの特徴として、通信方式によってのみ性能が決まる安定した有線リンクと比較し、WMNを構成する無線リンクの性能はノードの配置や、周波数チャネル・送信パワー・伝送ビットレートなどの無線パラメータによって大きく変わることが挙げられる。そのため、WMNの構築には、適切にこれらの無線パラメータを決定する仕組みが求められる。本研究では、無線リンクの確立に必要な無線パラメータを、周囲の無線パケットをモニタリングすることで得られた情報をもとに迅速かつ体系的に設定する手法を提案する。実空間において、複数の無線インターフェースを備えたアクセスポイントを用いて実験を行い、測定された無線リンクの評価値がネットワークの性能を十分に反映していることを確認した。

### An Approach to Placement of Mesh Access Points Considering Monitoring-based Evaluation of Link Quality

TADASHI YASUMOTO,<sup>†1</sup> SHO FUJITA<sup>†1</sup> and HIROSHI ESAKI<sup>†1</sup>

Wireless Mesh Network(WMN) is a cost-effective network since its connections are mainly wireless links, which are easier to construct than wired links. One of the characteristics in WMN is that the quality of wireless link is highly subject to the location of APs and their Radio Frequency(RF) parameters, such as radio frequency channel, transmission power, and bitrate. Therefore, the mechanism of AP placement and configuration of RF parameters is essential to build or expand WMN. We proposed a systematical approach of selecting good RF parameters based on locally available information of link quality by monitoring surrounding RF packets. Our experiment on the testbed showed those metrics of link quality are appropriate to evaluate the network performance.

#### 1. はじめに

無線移動通信は移動性と即時性という2つの大きな利点により携帯電話やPDAなど小型移動端末の相互接続に利用されるなど、今後も急速に普及していく事が予想される。なかでも、単一のノードに複数のネットワークインターフェース(NIC)を搭載し、複数の周波数チャネルや伝送方式を利用する事でより高速なデータ通信を可能にするための技術が近年注目されている。無線端末によって無線バックボーンの構築に必要な基盤技術の研究開発が盛んにおこなわれており、IEEE 802.11のタスクグループSでは無線バックボーンを有する無線メッシュネットワーク(WMN)の標準化をすすめている。

本研究ではマルチチャネル・マルチインターフェースを用いるWMNについて議論を行う。マルチチャネ

ル・マルチインターフェースのWMNではさまざまなリンク評価手法やパス評価手法が提案されており、より高品質の通信パスを決定する経路制御手法が提案されている??。これらの研究は多くのリンクやパスの中からより高品質なものを取り出すことは出来るが、そもそも品質の悪いリンクしかなければWMNの性能を向上させることができない。またリンクの性能は、無線の伝搬特性や無線インターフェースの送信出力、通信チャネル、通信レートのようなパラメータ設定に大きく依存している。したがってWMNは、リンク層やネットワーク層などの上位層だけでなく、物理層を含めた設計を行う必要がある。

本研究では、メッシュアクセスポイントの配置、周波数チャネル・伝送ビットレート・送信パワーを含む無線パラメータの設定を行い、WMNの迅速かつ体系的な構築を目標とする。チャネル間の干渉特性や無線の減衰特性などを考慮した上で、各アクセスポイントは周囲の無線パケットを観測しノード間の無線リンクの品質を評価することで通信に必要な無線パラメータ

<sup>†1</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
The University of Tokyo

を決定する。確立されたリンクの性能評価から実際にユーザーの要求を満たすかどうかの判別をし、もし要求に合わなければ再帰的にパラメータを調整する仕組みを提案する。

本論文は以下のように構成されている。まず2章では本研究の背景と要素技術について述べ、続く3章では本研究が想定するネットワーク環境とそこに内在する問題点を明確にする。次に、4章で提案手法を述べ、5章でこれまでに行った実験の測定結果を示した上で考察を加え、最後に6章でまとめと今後の展望を述べる。

## 2. 背景と要素技術

本章では、無線リンクの性能評価手法及び無線リンクを確立するために必要な無線パラメータの決定手法について、既存研究とそれらの手法が想定する環境を述べる。

### 2.1 無線リンクの性能評価

無線ネットワークにおける無線リンクの性能評価手法は、WMNの分野を始め、これまで数多く提案されている<sup>1)-3)</sup>。但し、いずれの手法においても、ネットワークは既に構築済みであり、性能を測定する対象の無線リンクは既に確立されていることを前提としている。そのため、ここで述べるリンクの性能評価値はトポロジーの構築に用いられることは考えられておらず、物理層よりも経路選択などの上位のレイヤーで利用されることになる。

#### 2.1.1 SINR 値

SINR 値は無線パケットを受信する側のノードが通信電波の受信強度を測定する際に、受信された信号強度に加えて、無線の干渉及び周囲の環境により発生する雑音の信号強度を考慮した性能評価値である。SINR 値を用いたネットワークモデルは Qualnet<sup>4)</sup> や ns-2<sup>5)</sup> などの代表的な無線ネットワークエミュレーターでも取り入れられている標準的なモデルの一つである。ここで、SINR 値は下式のように定義され、 $I(x, t)$  は干渉を  $N_{env}$  はノイズを表している。

$$SINR(x, t) = \frac{S(x, t)}{I(x, t) + N_{env}}$$

こうして算出された SINR 値により、受信端末は送られてきた信号を正常に受信できるかどうかの判定を行うことができる。この判定によりビットエラーレート (BER) を見積もること、SINR 値と BER の相関関係が得られる<sup>6),7)</sup>。ここで重要な事は、BER をある値以下に抑えるために必要な SINR 値は伝送ビットレートが低いほどより小さな値で実現できる点である。つまり低い伝送ビットレートで通信することで、受信する電波強度  $S(x, t)$  が小さくても BER が抑えられ、正常にパケットを受信する確立が高くなる。

#### 2.1.2 Expected Transmission Count(ETX)

次に、Expected Transmission Count(ETX)<sup>1)</sup> と呼ばれる無線リンクにおけるパケット損失率を用いて定義された無線リンクの品質評価手法について述べる。

ETX 値の算出は下記の通り行われる。2つのノード  $(x, y)$  間のリンクの双方向のパケット損失率をそれぞれ  $p_f$  と  $p_r$  とする。そのリンクにおけるパケット送信に失敗した割合  $p$  は下記の通りとなる。

$$p = 1 - (1 - p_f) * (1 - p_r)$$

次に、あるパケットの送信に成功するまでにパケットを送信した回数を  $k$  とすると、 $k$  回目にパケット送信に成功する確率  $s(k)$  は、

$$s(k) = p^{k-1} * (1 - p)$$

と表される。最終的に、 $x$  から  $y$  (もしくは  $y$  から  $x$ ) へパケットの送信に成功するために必要な再送回数の期待値として、下記のように ETX 値が定義される。

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k * s(k) = \frac{1}{1 - p}$$

ETX 値の測定手法は、導出に必要なとなるパケット損失率を測定する方法により2つに分類される。

##### プローブを用いた評価

プローブと呼ばれるパケット交換を用いる手法は、プローブの送信をブロードキャストによって行うかユニキャストによって行うかの2通りがある。いずれの手法も、隣接ノードに対してプローブパケットを送信してその応答を観測する事でパケット損失率を算出し、ETX 値を求める。

ブロードキャストによってプローブの交換を行う手法は、Broadcast-based Active Probing(BAP) と呼ばれる。BAP は定期的にブロードキャストを行うため、データ転送に伴う通信の有無にかかわらず継続的に低帯域の通信を行う必要がある。また、実際のデータ通信に用いられるビットレートとは異なるビットレートでリンク評価を行うため、評価値が必ずしもデータ通信で用いるリンクの性能に一致しているとは限らない。

プローブの交換をユニキャストによる測定で行う手法は、送信に成功した比率をユニキャストによるプローブの交換で測定する。データ転送に用いる伝送ビットレートと同様のレートでプローブの交換を行うため、BAP と比較して高い精度で評価できることが特徴として挙げられる。その反面、リンクローカル層における再送制御がされる事により隣接ノードの増加に伴いプローブの交換によるメッセージの占める帯域が指数的に増加してしまう。

##### モニタリングによる評価

プローブ交換を用いずに周囲のパケットをモニタリングし、受信した無線パケットが再送制御により送信されているかどうかの判定を行うことでパケットの損失率を概算する手法がある<sup>3)</sup>。この手法はメッセー

ジ交換によるオーバーヘッドが少ない反面、周囲にパケットがほとんど観測されないような環境下ではその精度が大幅に低下してしまう。

## 2.2 無線パラメータの設定

一方、無線ネットワークにおけるトポロジーの構築では無線パラメータを設定することで個々のリンクを確立する必要があるが、その際、最適な周波数チャンネル、伝送ビットレート、そして送信パワーを動的に選択する手法が求められる。個々の無線パラメータの選択を行うための様々な手法が提案されている。

### 2.2.1 周波数チャンネル選択

まず、マルチチャンネルを利用した無線ネットワークにおいて、チャンネル間の電波干渉や生活無線による電波干渉を考慮した最適なチャンネルの割り当てを行う手法について説明する。

802.11においてチャンネル間干渉しないとされる複数の周波数を用いてネットワーク上の任意の端末間のスループットを向上するためのチャンネル割り当て手法が提案されている<sup>8)-10)</sup>。

Ramachandran らの手法<sup>8)</sup>では、チャンネル割り当てサーバー(CAS)と呼ばれるノードが定義されており、CASが他のメッシュアクセスポイントにより観測された周辺の無線パケットによる情報を収集して、定期的に解析を行う事で最も干渉の少ないチャンネルを決定し、他のメッシュアクセスポイントに伝える。干渉を最小限に抑えるチャンネルの導出には、Multi-Radio Conflict Graph(MCG)に基づくアルゴリズムが用いられている。この手法は、データ通信に使用するチャンネルを決定して割り当てる仕組みがすべて単独のCASにより行われており、ネットワーク上に複数のゲートウェイが存在するような環境は想定されていない。

一方、Kysanurらは端末毎に備え付けられているNICの数が互いに干渉を引き起こさないとされる周波数チャンネルの数よりも少ない状況下において、隣接するリンク間で異なったチャンネルを用いて通信するように使用するチャンネルをインターフェース毎に割り当てる手法を提案している<sup>9),10)</sup>。この手法は、各ノードが必ず2つ以上のNICを保持するという前提の下で、事前に各ノードにおいて受信を行うインターフェースが用いるチャンネルを割り当てている。実際に通信を開始する際には、パケットの送信を行うインターフェースで使用するチャンネルを宛先のノードから取得する処理を行っている。

### 2.2.2 伝送ビットレート選択

次に、無線通信を行う際に必要となる伝送ビットレートの選択手法について述べる。これは、適応レート選択と呼ばれ、これまで数多くの手法が提案されているが標準化には至っていない。また、これらの研究も端末とアクセスポイントはインフラストラクチャー型の接続をしており、アクセスポイント側が、各端末とリンクを確立する際に伝送ビットレートを優先して

決定することに注意したい。

Receiver Based Auto Rate(RBAR)<sup>11)</sup>は、RTS/CTSを修正する事で後述するSignal to Noise Ratio(SNR)値を見積もり、あらかじめ用意されたレートとSNR値の評価関数からレートを選択する手法である。この手法の長所は、隠れ端末問題によるフレームの衝突を回避できることであるが、802.11に準拠しておらず、またRTS/CTSによるオーバーヘッド増加などの短所がある。

SampleRate<sup>12)</sup>はMAC層におけるプローブ交換を定期的に行うことで、各ビットレートにおいて、ある通信を完了するのに必要な時間を測定し、最小時間で通信可能と予測されたレートを選択する手法である。この手法は、移動に伴う周囲の環境変化への適応性に優れているものの、プローブの処理が失敗した時に精度が急激に悪化すること、またプローブによりオーバーヘッドが増加するなどの欠点が挙げられる。

Link Adaptation(LA)<sup>7)</sup>では、まず無線フレームをモニタリングすることでRSSI値を測定し、その値からSNR値を見積もる。その後、無線フレームの再送回数をカウントし再送回数が多ければSNR値のしきい値を下げ、より低いビットレートを選択するように調節する。この手法は、ビットレート選択に必要となるRSSI値が取得しやすという利点があるものの、ノード間が片方向通信であっても検知してしまうこと、またRSSI値からSNR値の見積もりが容易でないことが欠点として挙げられる。

### 2.2.3 送信パワー選択

送信パワーは、上述した伝送ビットレート選択におけるRSSI値を決定する要因の1つである。送信パワーを上げることでRSSI値は向上するが、それに伴う性能向上は消費電力量とのトレードオフとして関わってくる。消費電力の低減や平滑化に関する研究も数多くなされている<sup>13),14)</sup>が、本研究では消費電力による制約は考えないものとする。

## 3. 想定する環境と問題点

本章では具体的に本研究が想定する無線ネットワーク環境の特徴と制約条件を述べる。その上で、問題点を明確にする。

### 3.1 想定する環境の特徴と比較

無線リンクにより構成されたネットワークにはWMNやMobile Adhoc Network(MANET)などが挙げられる。WMNはメッシュアクセスポイントと呼ばれる無線基地局によって構成されるメッシュネットワークをバックボーンとして、Stationと呼ばれる端末がMPを介して通信を行う。これに対して、MANETは全てのノードが等しく扱われ、あるノードとノードの通信は別のノードが中継を繰り返す事で実現する。それぞれの無線ネットワークの特徴を表1に示した。

表 1 WMN と MANET との比較

ネットワークの種類	ノードが得られる情報	使用する無線装置	ノードに対する制約条件
本研究	ローカルに収集可能な情報	安価な無線 LAN	予測可能、バッテリー駆動
WMN	地理情報、ローカルに収集可能な情報	指向性、長距離アンテナ、中長距離型無線	静止、バッテリー無限大
MANET	位置情報、ローカルに収集可能な情報	安価な無線 LAN	予測不可能、バッテリー駆動

これらの無線ネットワークに対して本研究が想定するネットワークは、以下のような特徴があると言える。

- 無線ネットワークを構成するノードは、バックボーンを構築するアクセスポイントとアクセスポイントに接続する端末に区別される。
- 各アクセスポイントはユーザに制御された予測可能な移動を行う。
- 各アクセスポイントは無指向性の安価な NIC を複数備えている。
- 各アクセスポイントは周囲の環境から観測された情報だけを用いて隣接するアクセスポイントとのリンクを確立する。

本研究の目的はアクセスポイントを順次配置する事で無線リンクで構成されたバックボーンの構築を行う事であった。想定する無線ネットワークの制約条件を明確にした上で、内在する問題点を整理する。

### 3.1.1 制約条件

無線バックボーンを構築する際に用いるアクセスポイントの配置をするにあたり、roofnet<sup>15)</sup>のように指向性アンテナを用いて最適な地理的位置や方位を調整できず、更に事前に周囲の情報（既に使用されている無線の周波数チャネルなど）が取得不可能な環境を想定する。

また、無線バックボーンの構築にあたっては他のネットワークへのゲートウェイとなるルートアクセスポイント（ルート AP）が存在し、全てのアクセスポイントはルート AP を上流とするような通信が行われるものとする。具体的には、図 1 に示すように、構成するネットワークはルート AP から直線上にアクセスポイントが配置され、1つずつ接続されるようなトポロジーとなる。中継するアクセスポイントは2つの隣接するアクセスポイントとリンクを確立することになるが、隣接する無線リンク同士が引き起こすフロー内干渉については、2つの異なる周波数帯域の伝送方式を用いる事で回避できるものとする（付録参照）。

このようなネットワークの適応例として、被災現場のように人間が立ち入れないような環境にネットワークを構築したり、有線インフラストラクチャーが存在しないビル内に無線バックボーンを構築するような状況が考えられる。

このような状況では、局所的な情報を用いずにルート AP から順次に被覆領域を広げていくことで、MANET のような完全なアドホックによる恣意的なノード配置ではなく、最低限の情報を用いることでコストを抑え、

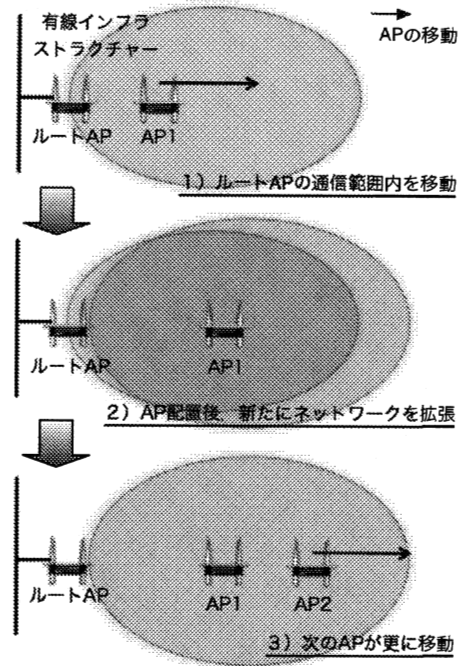


図 1 想定するネットワークのモデル

バックボーンとして機能する安定したネットワークを構築することが求められる。

更に、想定する環境下ではアクセスポイントの設置からネットワーク構築までに長い時間をかけられないことが予想されると同時に、アクセスポイントを人間が自由に設置できない状況では設置にかかるコストが高く、一度設置したアクセスポイントは固定されるものとする。

### 3.2 問題点

以上のような制約条件から、本研究では以下の問題を扱うことになる。

- (1) リンク品質を測定し、測定した値をもとにアクセスポイント間の距離や通信に必要な無線パラメータを決定する。
- (2) 上記の処理を、計算にかかる時間や品質測定に必要なオーバーヘッドなどのコストを抑えた上で行う。

#### 4. 提案手法

提案手法では3章に述べた制約条件の下で無線パラメータの決定を行う。つまり、周波数チャンネルをはじめ送信パワーや伝送ビットレートなどの無線パラメータの取りうる値はそれぞれ有限個数ではあるものの自由度が高く、それらを組み合わせることで候補となるパラメータセットが爆発的に増加してしまう。本章では、これらの無線パラメータの選択を行うフレームワークとそれに必要なリンク品質測定手法について述べる。

##### 4.1 リンク品質測定手法

リンク品質の測定手法であるが、WMNにおけるメッシュポイントとは異なり、アクセスポイントは移動を伴うため周囲の環境の変化による影響は静止している場合と比べて受け易くなる。周囲の環境変化がリンク品質に及ぼす原因は様々であるが、無線の伝搬特性から Received Signal Strength Indicator(RSSI)のばらつきが顕著になる事が考えられる。一方、SINRモデルにおいて干渉を表す要素  $I(x, t)$  は3.1.1節の通り、隣接するリンクにおいて異なる周波数帯域を用いる事で近似的に無視できるものとする。以上から、移動を伴うアクセスポイントの配置時におけるリンク品質の評価についてはSNR値を短時間で測定し、実時間に近い状態でリンクの性能を見積もることが可能とされる。周囲の無線パケットをモニタリングすることでRSSIとノイズ、そして再送回数を取得する手法を用いる。

他方、一度配置されたアクセスポイントはそれ以降固定された状態であるため、移動に伴う影響は無視できる。そこで、上記のモニタリングによる手法に加え、プローブ交換による品質測定手法もその候補として適用可能と考えられる。

##### 4.1.1 モニタリングによる測定

###### SNR 値

SNR値の測定に必要な値は、RSSI及び周辺環境のノイズ値であり、これはIEEE 802.11のMACフレーム内に定義されているRADIO\_TAPヘッダーに記述されている。本手法では、802.11MAC層で使用されるBeaconフレームを毎5秒間キャプチャし、その平均値を算出する。

###### 再送回数によるETX値

802.11の仕様では、ユニキャストによって送信されたDataフレームは輻輳や衝突によって宛先からのAcknowledgementが受信できない場合、リンクローカル層において標準仕様で7回の再送制御が行われる。図2に示す通り、再送されたDataフレームの数をカウントすることでそのリンク内で発生するパケット損失率が得られ、その値をもとにETX値を計算する(再送ETX値)。

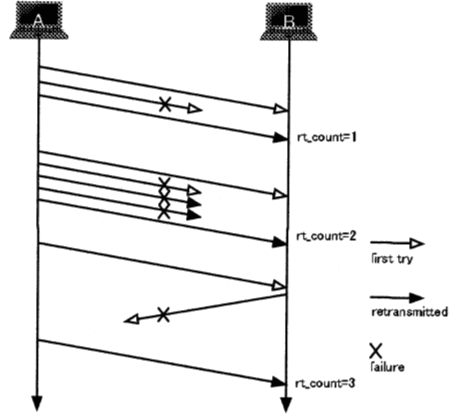


図2 再送回数によるETX値の算出

##### 4.1.2 プローブ交換による測定

###### プローブ交換によるETX値

一方で、リンク品質を測定するノード自身が他のノードにプローブと呼ばれる小さなパケットを送信する手法は、そのパケット自体が利用可能なネットワーク帯域を消費するという欠点がある一方、周期的に常に安定した精度でリンク品質を計算することができる(図3参照)。本手法では、5秒毎に50個のプローブをブロードキャストし、その応答を観測することでパケット損失率を求める。各アクセスポイント同士で得られたパケット損失率は、同じく5秒毎に送信されるメッセージにより隣接するアクセスポイントに伝えられる。

##### 4.2 再帰的なフレームワーク

次に、4.1節で述べたリンク品質測定手法を用いて実際にどのように無線パラメータを決定するかのフレームワークについて述べる。3章の通り、想定する環境において、アクセスポイントの配置には移動を伴い、パラメータの決定は短時間で行う必要がある。そのため、変化する周囲の環境に適応しつつも、短い間隔で周期的にリンク品質測定とパラメータ決定を再帰的に行う仕組みが必要となる。図4に示す通り、アクセスポイントは3つの動作を繰り返し行う。第一に、周囲の無線電波状況をモニタリングすることで上流のアクセスポイントとのリンク品質を測定する仕組み。第二に、測定されたリンク品質に基づき適切な無線パラメータを決定する仕組み。最後に、一度決定された無線パラメータを周囲の環境の変化に伴い変更する仕組みである。

###### 4.2.1 測定段階

まず測定段階では、新たに設置されるアクセスポイントが隣接するアクセスポイントとのリンクの品質測定を周期的に行う。ここでリンクの品質測定には4.1.1

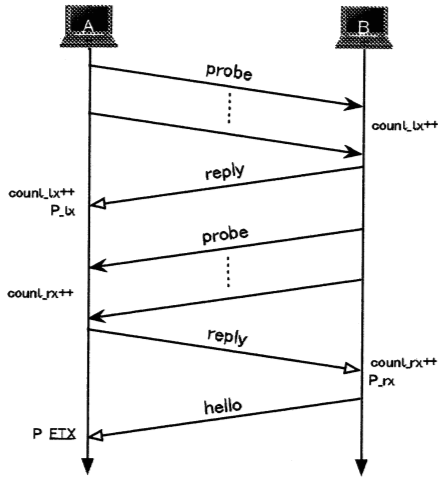


図 3 プロープ交換による ETX 値の算出

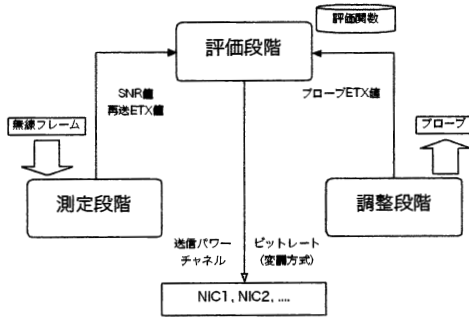


図 4 提案手法のフレームワーク

節のモニタリングによる SNR 値と再送 ETX 値を用いる。モニタリングによる測定は周囲に無線フレームが存在するような環境では測定開始から終了までの時間が短く、移動を伴うアクセスポイントの設置に適していると言える。測定段階では得られた測定結果を評価段階に伝える。

#### 4.2.2 評価段階

測定段階から得られた結果をもとに、ある時間における実現スループットとパケット損失率などを見積もる。この見積もりにはあらかじめ実験で得られた実測値を用いることになる。その後、評価段階ではこうして見積もった値からネットワークの性能を判断し、評価関数によって NIC に必要な物理パラメータを設定する。

#### 4.2.3 調整段階

調整段階では、設置されたアクセスポイントが周囲の環境の変化やアクセスポイントの状態変化に即して

無線パラメータを再設定する。環境の変化に応じて、隣接ノードとのリンクの品質も変化するためリンク品質の測定を行う必要があるが、調整段階ではプロープ交換による ETX 値を算出することで行う。定期的にプロープ交換による品質測定を行う事で、環境への適応性や耐故障性のあるネットワークを維持する。

## 5. 実験

本章の実験の目的は、4章で述べた提案手法のなかで、リンク品質を測定することで得られた評価値が実際にネットワークの性能に反映されているのかどうかを検証すると同時に、どのような相関関係があるのかを理解することである。

### 5.1 実験環境と機器

実験は、表 2 で構成されるアクセスポイントを用いて行った。各アクセスポイントには silex 社の 2 つの NIC が備えられている。実験は建造物の単一のフロア内で行った。データの宛先となる有線バックボーンに接続されたアクセスポイント (ルート AP) が設置されており、そのアクセスポイントと接続するアクセスポイントの位置及び無線パラメータを変化させて、SNR 値と再送 ETX 値、そして実現スループットを測定した。

アクセスポイントは 2 つの NIC を備えており、片方のインターフェースは隣接するアクセスポイントとの通信に、他方は周囲の無線パケットをモニタリングするために用いられる。そのため、自身のアクセスポイントが送信する無線パケットを外部から受信した無線パケットのように観測することが可能となる。これは送信インターフェースで自身が送信したパケットをモニタリングする際に、リンクローカル層で再送処理された無線パケットを観測するためである。

### 5.2 結果と考察

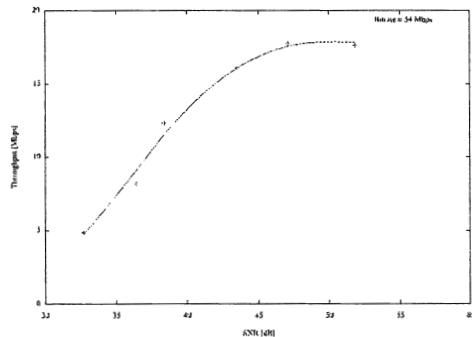


図 5 SNR 値とスループットの関係

図 5 は、隣接アクセスポイント間の距離を 20[m] とした時の平均の SNR 値と実現スループットを表して

表 2 実験に用いたアクセスポイント

CPU	AMD Geode LX 500MHz
メモリ	256MB DDR SDRAM
WLAN NIC	silex miniPCI SX-10WAG (2枚)
チップセット	Atheros AR5414
アンテナ	無指向性アンテナ
OS	GNU/Linux Ubuntu カーネル 2.6.22

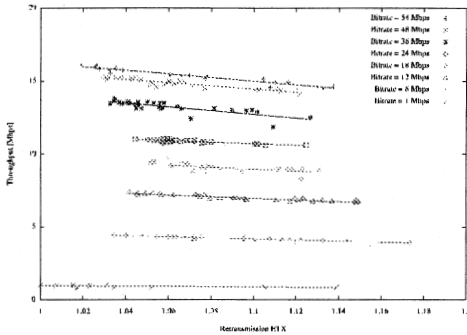
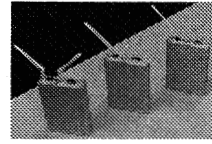


図 6 再送 ETX 値とスループットの関係 (距離 = 20m)

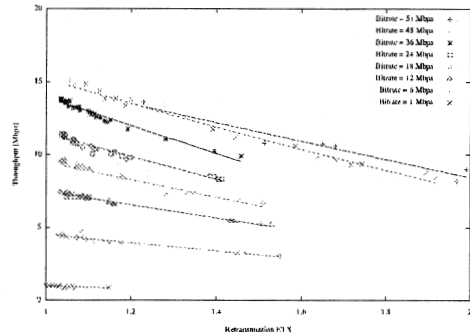


図 7 再送 ETX 値とスループットの関係 (距離 = 30m)

おり, SNR 値が増加すると共にスループットが上昇している事が分かる. このことから SNR 値はネットワークの性能を示す指標の1つであるスループットを見積もるのに有効であると考えられる. 次に, 図6及び図7は, 隣接アクセスポイント間の距離をそれぞれ 20[m], 30[m] とした時の再送 ETX 値と実現スループットを表している. 距離が 20[m] の時に比べて, 30[m] とした時に再送 ETX 値の増加に伴う実現スループットの低下が顕著であることが分かる. つまり, 距離が離れる程, 再送 ETX 値はネットワークの性能を評価するのに有効であると予測できる.

## 6. おわりに

本研究では, アクセスポイントを配置する際に周辺の無線パケットをモニタリングすることで得られる情報をもとに, 無線バックボーンを迅速かつ系統的に構築する手法を提案した. また, アクセスポイントを配置する際に設定される無線パラメータを決定するために無線リンクの品質を表す評価値が必要である事を述べ, 実験により, 定義された評価値が実際のネットワークの性能を反映していることを示した. 今後, アクセスポイントの配置後に行うプローブ交換によって得られるリンク品質の評価値が実際にネットワーク性能に反映されるのかを検証する. また, ある評価値に対する実現スループットに加えて, パケット損失率やパケット到達遅延時間を測定し, ネットワークの性能を維持するために必要となる無線パラメータの値を得るための評価関数を定義する.

## 参考文献

- 1) Couto, D. S. J. D., Aguayo, D., Bicket, J. and Morris, R.: A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, *Proceedings of ACM MobiCom* (2003).
- 2) Draves, R., Padhye, J. and Zill, B.: Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, *Proceedings of ACM MobiCom* (2004).
- 3) Kim, K.-H. and Shin, K.G.: On Accurate Measurement of Link Quality in Multi-hop Wireless Mesh Networks, *Proceedings of ACM MobiCom* (2006).
- 4) Simulator, *QualNet.N.*: <http://www.qualnet.com/>.
- 5) *ns-2 Network Simulator*: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- 6) Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G. and Morris, R.: Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network, *Proceedings of ACM Sigcomm* (2004).
- 7) del Prado Pavon, J. and Choi, S.: Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement, *Proceedings of IEEE ICC* (2003).
- 8) Ramachandran, K. N., Belding, E. M., Almeroth, K. C. and Buddhikot, M. M.: Interference-Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks, *IEEE INFOCOM* (2006).
- 9) Kyasanur, P. and Vaidya, N.H.: Routing and Link-layer Protocols for Multi-Channel Multi-

Interface Ad-Hoc Wireless Networks, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, pp.31-43 (2006).

- 10) Chereddi, C., Kyasanur, P. and Vaidya, N.H.: Design and implementation of a multi-channel multi-interface network, *International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp.23-30 (2006).
- 11) Holland, G., Vaidya, N. and Bahl, P.: A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks, *Proceedings of ACM MobiCom* (2001).
- 12) Charles, B. J.: Bit-rate Selection in Wireless Networks, *Master's Thesis*, Massachusetts Institute of Technology (2005).
- 13) Kozat, U.C., Koutsopoulos, I. and Tassiulas, L.: Cross-Layer Design for Power Efficiency and QoS Provisioning in Multi-Hop Wireless Networks, *Proceedings of IEEE WC* (2006).
- 14) Cruz, R. and Santhanam, A.: Optimal Routing, Link Scheduling and Power Control in Multi-hop Wireless Networks, *Proceedings of IEEE INFCOM* (2003).
- 15) roofnet: <http://pdos.csail.mit.edu/roofnet>.

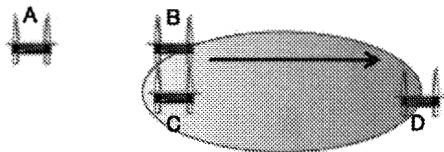
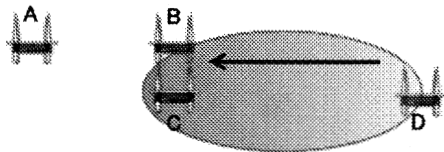
## 付 録

ここでは、同一の周波数帯域を用いた隣接する2つの通信において、たとえチャンネルが十分に離れていても、チャンネル間干渉が発生してしまうことを実験によって確認した。観測は以下のように行った。まず、4つのアクセスポイントを下記の図8に示す通り配置した。ノードAとノードBが全く通信を行わない環境(b),そして2ノードがマルチキャストによって断続的に通信を行っている環境(a)のそれぞれにおいて、ノードCからノードDへ1秒間にマルチキャストによって送信された ping パケットの総数 ( $\alpha$ ), 逆にノードDからノードCへ1秒間にマルチキャストによって送信された ping パケットの総数 ( $\beta$ ) をノードCで観測したデータを示す(表3).

表3 2つの環境における ping の受信回数

測定環境	受信パケットの総数 ( $\alpha$ )	受信パケットの総数 ( $\beta$ )
環境 a	941	320
環境 b	499	166

同一帯域幅における通信なし



同一帯域幅における通信が発生

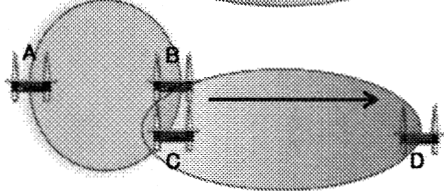
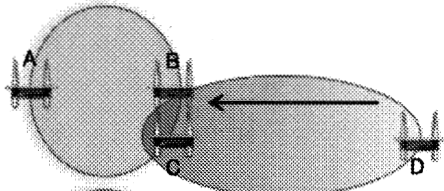


図8 チャンネル間干渉の観測に用いた実験環境