

大規模無線環境の自律的構築・管理処理に必要な計測情報流通機構に関する研究

妙 中 雄 三 東京大学情報基盤センター助教

1 背景

現在、無線 LAN は設置が容易で安価、さらに高い通信品質が得られるという利点から、家庭内や企業内などのプライベートな空間だけでなく公共の場でも広く利用されている。今後も無線 LAN の利用可能範囲は拡大し続け、あらゆる場所で無線 LAN の接続性が維持されたユビキタス無線 LAN 環境が実現する。具体的には、アクセスポイント間で通信を中継する無線メッシュネットワークが構築され、各々の無線 LAN エリアが適切に組み合わせることで、ユビキタス無線 LAN が構成される。また、このユビキタス無線 LAN 環境では、移動端末は常にネットワーク接続できることから、通信しながら移動することが想定される。そのため、ユビキタス無線 LAN では移動端末に高い通信品質を常に提供する必要がある。つまり、ユビキタス無線 LAN が任意の通信品質をあらゆる場所で維持提供出来る必要がある。以上より、ユビキタス無線 LAN 環境の実現のためには、無線 LAN エリアを組み合わせ、あらゆる場所で良好な通信品質を供給維持することが課題となる。

ユビキタス無線 LAN 環境では、無線 LAN エリアが広い範囲で重複する。そのため、この環境では多数の無線 LAN の混在による無線干渉が頻繁に発生し、移動端末の通信品質を低下させてしまう。このような品質低下を防ぐためには、品質低下を招く過度のエリア重複を避け、各無線 LAN エリアを適切に組み合わせる必要がある。しかし、無線 LAN は個別管理であることから、既存の企業内無線 LAN の設置のように共通の管理者が無線 LAN エリア内の品質を計測・調節し、品質低下を回避することは困難である。

そこで、我々はアクセスポイントが自律的に連携して無線 LAN エリアを制御する手法に着目した。具体的には、アクセスポイントが (1) 要求品質を満たした無線 LAN エリアの検出、(2) 検出した無線 LAN エリア情報の共有、(3) 品質低下エリアの検出、(4) エリア制御、を繰り返し実行する。これまでに、(1) に対して各アクセスポイントが無線 LAN エリア内の各地点での通信品質を調査するための品質計測基盤の設計と無線 LAN エリア検出をおこなった[1]。ユビキタス無線 LAN において移動端末は、必ずアクセスポイントを介して他の端末と通信をおこなう。この通信を移動端末の自発通信と呼ぶ。そして、アクセスポイントでは自発通信を受動計測し、移動端末が得る通信品質(供給品質)を取得する。また移動端末の位置情報と計測結果を対応付けることで位置に応じた供給品質計測をおこなう。しかしながら、先行研究では、アクセスポイントで計測する品質指標はシミュレーション上での調査のみに基づいており、実環境における通信品質の推定と要求品質を満たしたエリア検出の有効性は確認されていない。(2) で計測情報を共有するためには、計測する品質指標の特性に応じた設計が求められるため、シミュレーションで用いた品質指標の有効性の調査と特性調査が求められる。

実環境における無線計測を伴う研究はこれまでに数多くおこなわれている[2-5]。文献[2, 3]では、既設ネットワークの品質評価を実計測に基づいておこなっているが、ネットワークの性能評価に留まり、アクセスポイントから供給品質を判定する品質指標は検討されていない。また、文献[4, 5]では敷設した無線 LAN の品質評価及び無線 LAN エリア検出をおこなっている。しかし、文献[4, 5]では電波強度を基にした無線 LAN への接続性のみを対象とした無線 LAN エリア検出をおこなっているため、要求品質を満たした無線 LAN エリア検出を考慮していない。よって、本研究では要求品質を満たした無線 LAN エリアの検出に利用可能な指標を実環境において計測実験をおこない調査する。実験は、Linux 上に構築したアクセスポイントに計測機構実装し、移動端末の自発通信をアクセスポイントが実際に転送・計測する方法でおこなう。そして、この計測実験で得られた計測結果を用いて、品質指標の調査をおこなう。

2 関連研究

これまでに無線 LAN の品質計測を実施する研究は数多くおこなわれている[2-6]。文献[2]では、著者らが設置した無線ネットワーク上を計測することで、品質の評価を行うと共に、通信の時間変化に伴う各レイヤ

間での挙動の関連性の分析をおこなっている。また、文献[3]では、大学キャンパス内で広く敷設された無線 LAN 内において、無線通信を受動計測する計測システムを提案している。この研究では、計測機器を広い範囲内の異なる地点に設置し、設置場所近隣で送受信される無線通信を収集する。そして、収集した大量の情報をを用いて分析した結果から大規模な無線 LAN 環境下での通信が品質に与える影響を調査している。しかし、文献[2, 3]の研究では、既設のネットワークでの品質評価にとどまり、計測した通信品質が要求品質を満たしているかを判定する品質指標は検討されていない。

一方、文献[4, 5]では無線 LAN エリアを考慮した研究がおこなわれている。文献[4]では、都市部全域への無線 LAN 敷設を品質計測に基づいておこなっている。この研究ではまず、敷設エリア内の多数の地点において品質計測をおこない、その結果で電波伝播モデルを作成している。そして、作成した電波伝播モデルを基にアクセスポイント設置手法を検討している。また、文献[5]では、既設の大規模な無線 LAN エリア内において、任意に選択した地点での無線計測をおこない、その結果から無線 LAN エリアを検出している。この無線 LAN エリア検出は、計測した結果から得られた電波伝播モデルと地図情報から得られる障害物情報を組み合わせることで実現している。しかし、これらの方式では、計測に基づいて電波伝播モデルを作成しているため研究対象とした環境でのみしか有効でない[7]。さらに、無線 LAN エリア検出には電波強度による接続性のみを対象としており、通信品質は考慮されていない。

文献[6]では通信品質を維持して無線 LAN 間を移動するためのハンドオーバートリガーを品質計測を実施して調査している。品質計測では、移動端末に隣接した計測機器で移動端末とアクセスポイント間の通信を計測し、無線再送及び電波強度の変化による通信品質の変化を調査している。しかし、アクセスポイントによる品質計測はおこなわれていない。また、移動に伴う通信品質の劣化開始時の品質指標の変化を調査しているため、品質指標に基づいた供給品質の推定はおこなわれていない。以上より、本研究では実環境において、アクセスポイントを経由するトラフィックを利用して、各エリアの通信品質を判定するための品質指標の調査をおこなう。

3 アクセスポイント主導の品質計測基盤

3.1 品質計測基盤の概要

ユビキタス無線 LAN 環境ではどこでも無線 LAN 接続が可能であるため、多数の移動端末が移動しながら通信する事が想定される。このとき、各移動端末は近接するアクセスポイントに接続し、アクセスポイントを経由して通信する。よって、先行研究ではアクセスポイントが移動端末の自発通信を基に通信品質を計測する品質計測基盤を提案した。本節では先行研究で提案した無線計測基盤の概要を説明する。

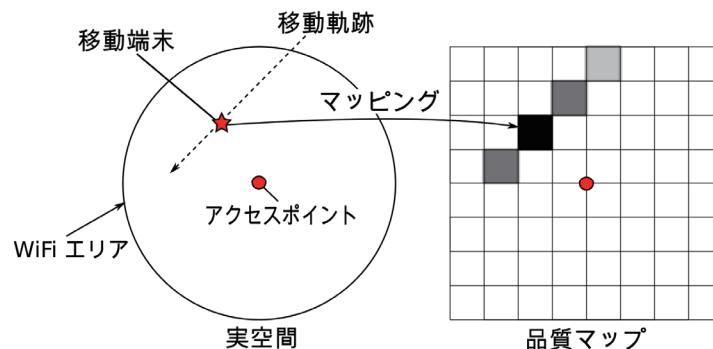


図1 品質計測の動作例

図1に品質計測基盤の動作例を示す。アクセスポイントは計測値を位置情報と対応づけて保存するために自身を中心としたグリッド形状の地図をあらかじめ作成しておく。これを品質マップと呼ぶ。アクセスポイントは移動端末の接続を新たに受け入れた時点から、移動端末の位置情報を一定間隔で取得する。移動端末の位置情報取得では、各移動端末が自身の位置情報を管理していると仮定し、APが移動端末へ位置情報を問い合わせる形態をとる。そして、移動端末はアクセスポイントを介して通信をおこない、APは移動端末からのフレーム受信時に得られる品質情報と、移動端末へ向けて中継するフレーム送信時に得られる品質情報を計測する。計測結果は品質マップ上で移動端末の位置に対応づけて保存される。アクセスポイントは全ての移動端末に対してこの手順を継続して実行することで、供給する無線 LAN エリア内の各地点での通信品質計測を実現する。

次に先行研究ではアクセスポイントで計測する品質指標を検討した。要求品質を満たす無線 LAN エリアを検出するためには、移動端末上のアプリケーションの通信品質をアクセスポイントで把握できる必要がある。一般に、アプリケーションの通信品質はスループットで表現されるが、エンド間の通信品質に影響される。しかし、アクセスポイントの供給品質を取得するためには、無線区間(移動端末とアクセスポイント間)での通信品質の変動を計測する必要がある。そこで、先行研究では受信時におけるフレームエラー率と受信電波強度、送信時におけるフレーム再送数を計測し、無線区間におけるアプリケーション性能の推定の取得に最適な品質指標を検討した。そして、これらの品質指標をシミュレーションで比較評価し、フレームエラー率を用いることで要求品質を満たした無線 LAN エリア検知が可能であることを示した。

3.2 品質計測基盤を用いたアクセスポイント主導の計測における要件

本研究では 3.1 節で説明した品質計測基盤を用いてアクセスポイント主導の計測に基づいてエリア検出に有効な品質指標の調査をおこなう。アクセスポイントでは移動端末の自発通信を転送しながら計測するため、アクセスポイントの転送機能を阻害しない計測処理が必要となる。そこで本節では、アクセスポイントの受動計測における計測の要件を説明する。要件は以下の 3 つに分別できる。

- a. **計測単位の要件:** アクセスポイントは移動端末の自発通信を転送する。この転送処理と同時に供給品質を計測するためリアルタイムに計測できる必要がある。よって、計測する品質指標はフロー単位やエンド間での解析を必要とせず、転送するフレーム単位で計測できることが求められる。
- b. **計測処理負荷の要件:** 前述の通り、アクセスポイントは移動端末の通信をリアルタイムで転送する必要がある。そのため、計測単位の要件に加えて、計測処理に掛かる時間及び負荷が軽量な手法で実現される必要がある。
- c. **計測指標の要件:** アクセスポイントは移動端末の通信を転送時に計測するため、計測する指標は受動計測が可能なものが求められる。具体的には、パケットロスや往復伝搬遅延といったエンドホスト間での通信を必要としない品質指標が求められる。

以上が計測可能な品質項目と計測に必要な要件である。実験ではこれらの要件を満たし、品質指標を計測可能な計測機構を実装し、計測実験をおこなった。次節では計測実験について説明をおこなう。

4 計測実験

本節では実装した計測機構の詳細とその実装によって取得できる品質指標を説明する。その後、実際に計測をおこなった環境及び実験結果を示し、計測結果に基づいてエリア検出に有効な品質指標を検討する。

4.1 実装の詳細

本節では実験に用いた計測機構の実装を説明する。実装には、Thinkpad X61 (CPU: Core 2 Duo 2.0 GHz、メモリ: 1 GB) を使用した。OS には CentOS5.4 (カーネルバージョン 2.6.18) を使用し、無線 LAN ドライバとして madwifi 0.9.4[8] をインストールしている。

実装では、フレーム単位での品質指標計測が必要となる。madwifi ドライバを用いてフレーム単位で計測可能な品質指標は PHY エラーの発生状態、CRC エラーの発生状態、フレームの再送状態、電波強度である。しかし、madwifi では再送回数はフレーム単位で取得できず、発生状況の確認にとどまっている。そこで品質指標の解析をより詳細におこなうために、フレーム単位の再送回数を取得する処理が必要になる。この品質指標を保存する機構を madwifi に追加した。madwifi にはフレームの状態を保持する ath_stats 構造体がある。この構造体にはフレームを送受信したときの状態が保持される。この構造体には再送回数別の送信数やフレーム単位での電波強度は保存されない。そこでフレームごとの再送回数を保持する変数の追加と、その回数を保存する処理を追加した。

再送回数を保持する変数の追加: ath_stats 構造体に 1 フレームを最初のフレーム送信で正しく再送できた回数、また 1 回から 7 回の間で再送がおこったフレーム数を保持する変数を追加した。この 7 回という再送回数は 802.11 の規則で定められており、再送処理はハードウェアでおこなわれる。

再送回数を数える処理の追加: madwifi では、フレーム送信処理が終了した際に ath_tx_processq() 関数が実行される。この関数内でフレーム送信にかかった再送回数を取得し、上で追加した変数を用いてフレーム数を数える処理を追加した。

上記の実装によりフレームごとに品質指標を取得することが可能になる。取得には madwifi に付属している athstats ツールプログラムを用いた。このツールプログラムでは athstats 構造体の各変数と、新たに追加した再送回数を保持する変数を出力するように改変した。なお、madwifi では未使用の変数が多数あるため、計測時には数値に変化のあった指標のみ出力している。この実装による取得可能な品質指標は以下の通

りである。

CRC エラーフレーム率: 受信したフレームにおいて巡回冗長検査をおこない、不整合が発生したフレーム数である。ここで受信した全フレーム数において CRC エラーフレーム数が占める割合を CRC エラー率と定義する。CRC エラー率の計算式を式(1)に示す。なお受信した全フレーム数とは正常に受信したフレームと CRC エラーが発生したフレーム、および PHY エラーフレームの合計値である。

$$\text{CRC エラー率} = \frac{\text{CRC エラーフレーム数}}{\text{受信した全フレーム数}} \times 100 \quad (1)$$

PHY エラー数: この指標は物理レイヤにおいて受信した無線信号に誤りが存在した数を示している。フレームの誤り確認はハードウェアでおこなわれており、madwifi にはその誤り確認の結果だけが通知される。ここで受信した全フレーム数において PHY エラーフレーム数が占める割合を PHY エラー率と定義する。エラー率の計算式を式(2)に示す。なお受信した全フレーム数は CRC エラーフレーム率のものと同じ計算をおこなう。

$$\text{PHY エラー率} = \frac{\text{PHY エラーフレーム数}}{\text{受信した全フレーム数}} \times 100 \quad (2)$$

1 パケットあたりのフレーム再送回数: 1 パケットを送信するにあたり、再送した数である。再送回数が 0 回は再送無しで正しく届いたことを示す。送信した全フレーム数において再送フレームが占める割合を再送率と定義する。再送率の計算式を式(3)に示す。

$$\text{再送率} = \frac{\text{再送フレーム数}}{\text{送信した全フレーム数}} \times 100 \quad (3)$$

フレーム受信時の電波強度: フレームを受信したときの電波強度である。ここで計測時間内で受信したフレームの電波強度の平均値を平均電波強度と定義する。

ACK が返ってこなかったフレーム数: 送信したパケットに対して、受信確認応答の ACK が返ってこなかったフレーム数である。

送信に失敗したフレームの割合: 全送信フレームにおいて、再送を 7 回おこなっても送信できなかったフレーム数である。このフレームは送信されないためパケットロスとなる。

4.2 実験手順

本節では実験時に使用するネットワーク構成および実験手順について説明する。要求品質を満たした無線 LAN エリアを検出するためには、アプリケーションが無線区間で得る品質(スループット)をアクセスポイントで推定可能な品質指標が求められる。この品質指標の調査のために、スループットが異なる状態で品質指標を計測し、その際の品質指標とスループットとの関係を評価する。

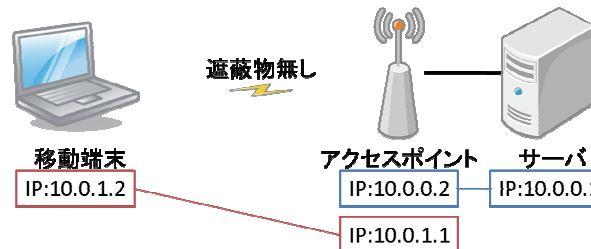


図2 実験トポロジ

実験トポロジを図2に示す。アクセスポイントは無線インターフェースと有線インターフェースを1つずつ持つ。有線側には、サーバをEthernetケーブルで直接接続し、無線側では移動端末と無線接続する。無線LAN通信にはRTS/CTSを有効にしたIEEE802.11gを用い、送信レートは54Mb/sに固定した。また、アクセスポイントは無線区間と有線区間で異なるIPサブネットに接続し、通信をルーティングする設定とした。なお、実験は周辺に遮蔽物の無い環境でおこなった。

実験では、移動端末とアクセスポイントの距離を変化させることでスループットを変化させて計測をおこなう。つまり、移動端末をアクセスポイントから1メートル刻みで離し、その各地点でスループットの計測およびアクセスポイント上の実装機構による品質計測をおこなう。これを1試行とし、今回は4回の試行をおこない計測した。計測にはインターネット上で一般的に使用されているTCPとUDPトラフィックを使用した。TCPでは、固定端末でApache httpd[9]によるhttpサーバを起動し、移動端末は固定端末から1GBのファイルをダウンロードする。実験ではダウンロードを始めてから1分間の計測をおこない、1分経過後に計測とダウンロードを終了する。この時のパケットサイズは1500バイトである。一方、UDPでは音声通信

を想定し、固定端末と移動端末の間でパケットを送受信し続ける。UDP 通信の生成には、Iperf[10]を用いて 200 バイトのパケットを双方向に 20 ミリ秒間隔で送受信する。計測時間は TCP と同様に 1 分間とした。

4.3 実験結果

まず TCP の試行実験において計測したスループットを図 3 に示す。図 3 において横軸はアクセスポイントから移動端末までの距離を表し、縦軸は計測期間内の平均スループットを示している。図 3 より、距離が離れるにつれて、スループットは低下し、この実験では 24 メートルまで計測可能であった。この実験ではアクセスポイントと固定端末が直接有線接続していることから、有線区間では品質の劣化がなく、図 3 に示すスループットは無線区間のアプリケーション品質であるといえる。

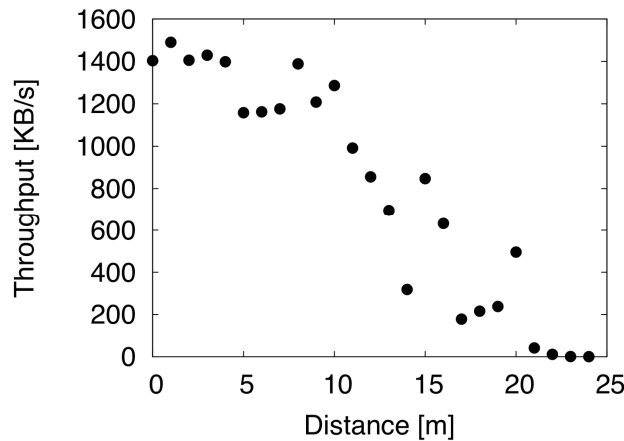


図 3 TCP スループット

次にアクセスポイント上で計測可能な品質指標からスループットと推定可能な指標を検討する。スループットとアクセスポイントで取得した品質指標の相関係数を表 1 に示す。なお、この品質指標とスループットは図 3 の実験時に得られた計測結果を使用している。表 1 中での相関係数より、無線 LAN 区間のスループットに対して、アクセスポイントで取得する品質指標では PHY エラー率と平均電波強度、CRC エラー率の順に相関が強いことがわかる。一方、信時の品質指標に着目する。送信時に得られる品質指標では、再送率が最も強い相関を持つことがわかる。

表 1 TCP 通信におけるスループットに対する相関係数

	品質指標	相関係数
受信時	CRC エラー率	-0.787
	PHY エラー率	-0.862
	平均電波強度	0.807
送信時	ACK が返ってこなかったフレーム数	-0.751
	再送が 1 回のフレームの割合	-0.758
	再送が 2 回のフレームの割合	-0.752
	再送が 3 回のフレームの割合	-0.771
	再送が 4 回のフレームの割合	-0.819
	再送が 5 回のフレームの割合	-0.687
	再送が 6 回のフレームの割合	-0.312
	再送が 7 回のフレームの割合	-0.654
	送信に失敗したフレームの割合	0.900
	再送率	-0.915

次に UDP 通信における品質指標の検討をおこなう。UDP の計測実験では TCP 通信のスループットの計測と同時に、アクセスポイントでの品質指標の収集は困難である。そのため、本実験では TCP 通信でおこなった実験の直後に同一地点において UDP を用いた実験をおこなった。そして、TCP の計測実験直後の同一の環境・位置で得られる品質はほぼ等しいと仮定し、直前の TCP 通信の計測で得られたスループットと UDP 通

信をアクセスポイントで計測した品質指標を比較評価する。TCP 通信で計測したスループットと UDP 通信により得られた品質指標との相関を表 2 に示す。表 2 の結果から、アクセスポイントの受信時に得られる品質指標では、CRC エラー率がスループットと強い相関があることがわかる。また、UDP は TCP とは異なり、PHY エラーや平均電波強度との相関が低いことがわかる。一方、送信時の結果から、TCP の結果と同様に再送率が最も強い相関を持つことがわかる。

表 2 UDP 通信におけるスループットに対する相関係数

	品質指標	相関係数
受信時	CRC エラー率	-0.700
	PHY エラー率	0.337
	平均電波強度	-0.259
送信時	ACK が返ってこなかったフレーム数	-0.751
	再送が 1 回のフレームの割合	0.960
	再送が 2 回のフレームの割合	-0.720
	再送が 3 回のフレームの割合	-0.763
	再送が 4 回のフレームの割合	-0.756
	再送が 5 回のフレームの割合	-0.775
	再送が 6 回のフレームの割合	-0.798
	再送が 7 回のフレームの割合	-0.902
	送信に失敗したフレームの割合	-0.818
	再送率	-0.960

以上の結果より、TCP 通信では CRC エラー率と平均電波強度、PHY エラー率、再送率、UDP では CRC エラー率と再送率がスループットと強い相関があることが得られた。しかし TCP で相関の強い PHY エラー率と平均電波強度は UDP 通信において相関が低くスループットを推定することが困難である。TCP と UDP のように全く違う通信方式をとる端末がいた場合を想定すると、同じ尺度でスループットの推定をする必要がある。このような場合では PHY エラー率での推定は困難であるため、CRC エラー率を用いて推定することが考えられる。一方、送信においては再送率が TCP および UDP のどちらの通信方式であっても強い相関がみられたため、スループットの推定に用いることができる可能性があると言える。

次に、CRC エラー率及び再送率によるスループット推定への有効性を調査する。そこで CRC エラー率とスループットの関係をさらに調べるため、散布図を作図した。スループットに対する CRC エラーの散布図を図 4 に、スループットに対する再送率の散布図を図 5 に示す。図 4 より TCP および UDP のどちらも同じ CRC エラー率のときに、同程度のスループットが計測されている。そのため CRC エラー率はスループットを推定する品質指標として使用することが可能である。一方、送信の品質指標として再送率が有力である。図 5 より再送率が 15%までは TCP および UDP のどちらも同程度のスループットが観測されている。しかし、再送率が 30%を超えると TCP と UDP の間でスループットに乖離がみられる。そのため再送率から一様にスループットを推定することは困難である。したがって再送率はスループットを推定するための品質指標として用いることが困難であると考えられる。

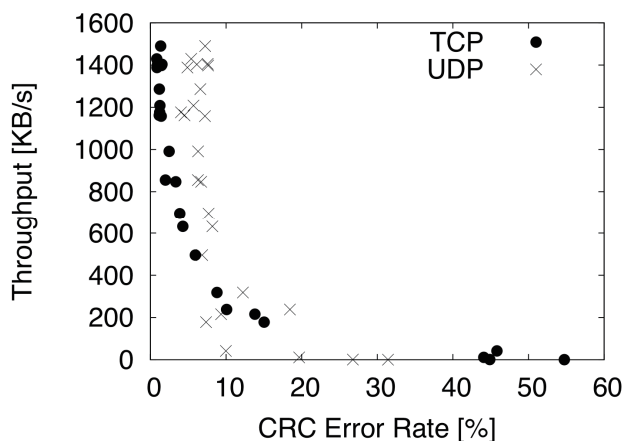


図 4 CRC エラー率とスループットの散布図

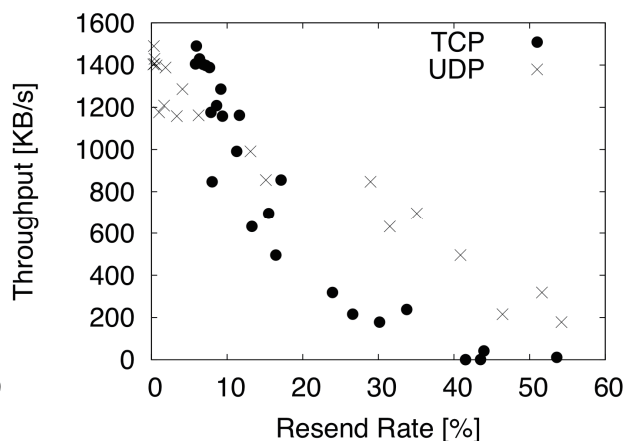


図 5 再送率とスループットの散布図

5 まとめ

本研究ではアクセスポイント側で良好な通信品質を保つエリア制御をおこなうための品質指標の調査を実環境でおこなった。調査のためには無線 LAN ドライバである madwifi を改変しアクセスポイントにおける品質指標を取得し、TCP と UDP のそれぞれについて実験をおこなった。実験をおこなった結果ではそれぞれの品質指標とアプリケーションの通信品質(スループット)関係を相関係数と散布図を用いて考察をした。アクセスポイントで受信時にスループットを推定する項目として、CRC エラー率が有効であることがわかった。しかし、アクセスポイントで送信時にもっとも相関の高かった再送率には、スループットを一様に推定できないことが散布図よりわかった。以上より、アクセスポイントにおける通信品質の推定には CRC エラー率が有効であると考えられる。今後の課題としてこの品質指標をアクセスポイント間で共有する手法の検討があげられる。

【参考文献】

- [1] Yuzo Taenaka *et al.*, "Wireless Measurement Framework to Survey an Area with Required Communication Quality", PAEWN 2009, May 2009.
- [2] Daniel Aguayo *et al.*, "Link-Level Measurements from an 802.11b Mesh Network", ACM SIGCOMM 2004, Aug. 2004.
- [3] Yu-Chung Cheng *et al.*, "Jigsaw: Solving the Puzzle of Enterprise 802.11 Analysis", ACM SIGCOMM 2006, Sept. 2006.
- [4] Joseph Camp *et al.*, "Measurement Driven Deployment of a Two-Tier Urban Mesh Access Network", ACM MobiSys 2006, June 2006.n
- [5] Joshua Robinson *et al.*, "Assessment of Urban-Scale Wireless Networks with a Small Number of Measurements", ACM MobiCom 2008, Sept. 2008.
- [6] Kazuya Tsukamoto *et al.*, "Experimental Evaluation of Decision Criteria for WLAN handover: Signal Strength and Frame Retransmission", IEICE Trans. on Comm., vol.E90-B, no.12, pp.3579-3590, December 2007.
- [7] Vladimir Brik *et al.*, "A Measurement Study of a Commercial-Grade Urban WiFi Mesh", IMC 2008, Oct. 2008.
- [8] Madwifi, <http://madwifi.org/>.
- [9] Apache httpd server, <http://httpd.apache.org/>.
- [10] Iperf, <http://sourceforge.net/projects/iperf/>.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
無線 LAN アクセスポイントにおける要求品質を満たしたエリア検出のための品質指標の調査	電子情報通信学会モバイルマルチメディア研究会	2010年7月