

## 3-6 アクセス網における通信品質を考慮した資源利用・割当制御技術

### 3-6 *QoS-aware Resource Allocation and Utilization Technology in Access Networks*

古閑宏幸 福田 豊 原口浩朗 鶴 正人 尾家祐二  
KOGA Hiroyuki, FUKUDA Yutaka, HARAGUCHI Hiroaki, TSURU Masato,  
and OIE Yuji

#### 要旨

無線 LAN やセルラー網などのアクセス技術の多様化に伴い、多種多様なアクセス網が相互に重なり合い配置されるユビキタス環境が整備されつつある。そのような無線アクセス網は高速コア網よりも品質の変動が激しいため、エンドツーエンド通信の品質に与える影響が大きい。そこで、我々はアクセス網においてアプリケーションが要求する品質を満たすような動的適応的な資源利用・割当制御技術の研究開発に取り組んでいる。本稿では、単一ドメイン内制御技術と複数ドメイン間制御技術の両側面から提案手法を紹介する。

Future pervasive ubiquitous networks will be constructed by various access networks such as wireless LAN and cellular networks. Such wireless access networks have a variety of capacity and dynamics compared with core networks, so that they have a significant impact on end-to-end communication in terms of quality of service. Therefore, we focus on the QoS-aware resource allocation and utilization technologies in access networks. In the present paper, we introduce our proposed intra-domain and inter-domain schemes to improve communication quality.

#### [キーワード]

資源利用・割当, 無線アクセス網, ドメイン内制御, ドメイン間制御, ユビキタス環境  
Resource allocation and utilization, Wireless access networks, Intra-domain technique,  
Inter-domain technique, Pervasive ubiquitous networks

## 1 はじめに

無線通信技術の急激な発達とともに、様々な速度・特性を持つ無線網が広く展開し、いつでもどこでもインターネットアクセスが可能なユビキタス環境が整備されつつある。例えば、高速な通信が可能な無線 LAN や低速ではあるがカバー範囲が広いセルラー網などは既に利用されており、今後更に多種多様なアクセス網が登場することも予想されている。一方で、インターネット上で利用されるアプリケーションも多様化してきており、様々な特性を持つトラフィックが高速なコア網や多様なアクセス網を横断し、また要求される通信品

質も従来より多様化してきている。このような背景から、高品質なエンドツーエンド通信を公平かつ効率よく実現することが今後の多様化したインターネットでは大変重要な課題となる。特に、無線アクセス網は従来の有線アクセス網や高速コア網よりも品質の変動が激しく、そのレンジも広いため、エンドツーエンド通信の品質に与える影響が大きい。そのため、アクセス網においてアプリケーションが要求する品質を満たすような動的適応的な資源利用・割当制御技術が必要であるといえる。その際、利用者側からはその時々状況に応じた資源の使い分けに関する要求があり、また提供者側からは効率的かつ公平な資源の割当て

に関する要求があるため、双方の要求を満たす資源利用・割当制御技術を確立しなければならない。

そこで、本研究では利用者側に近い有線、無線を含んだ多様なアクセス網を対象とし、その中でエンドツーエンド通信の品質や限られた資源の利用効率の向上を目的としている。その目標を達成するために、我々はある管理組織が運営する単一ドメインのアクセス網内での通信品質を考慮した資源利用・割当制御技術や、さらに複数ドメインのアクセス網が同時に利用可能なユビキタス環境におけるドメイン間の資源利用・割当制御技術の両側面から取組を行っている。本稿では、単一ドメイン内の制御技術に関する研究課題として無線 LAN アクセス網におけるアクセスポイント選択手法について **2** で紹介し、複数ドメイン間の制御技術に関する研究課題としてアクセス網選択手法について **3** で紹介する。

## 2 無線 LAN におけるアクセスポイント選択手法

本章では、会社や大学等といった一つの組織が管理するインターネット/イントラネットへの無線 LAN アクセス網に焦点を当て、それらの無線 LAN 資源を公平かつ効率的に利用するための提案手法について紹介する。

### 2.1 無線 LAN における AP 選択

無線 LAN の普及に伴い、より多くの場所で無線 LAN を利用したいという要求が高まっている。しかし 1 台の無線 LAN Access Point (AP) が提供する無線通信資源は、その AP に接続する端末 (Station、STA) によって共有されるため、接続する STA 数が増加するにつれ、STA1 台当たりのスループットは低下していく。一般には 1 台の AP につき STA20 台程度が限度といわれている。また、AP の電波が到達する範囲は屋外で 150m、障害物が少ない屋内で 50m 程度といわれており、より広い範囲での通信を提供するためには複数の AP で無線 LAN を構築し、通信範囲を拡大する必要がある。よって、利用者の要求に応えるためには、複数台の AP を設置した無線 LAN を構築し、通信容量を拡充していく必要がある。

このように複数の AP により構築された無線 LAN における AP 選択方式としては、STA 側が獲得した情報を基に自律分散的に AP を選択する方式と、無線 LAN 側で STA を最適な AP へと割り当てる集中制御方式が考えられる。集中制御方式では、無線側から集めた情報を基に、何らかの指標を最適化するように AP と STA を組み合わせることが考えられる。しかし、現在の IEEE 802.11 標準では、STA を特定の AP に組み合わせる機能は定義されておらず、既存の無線 LAN 端末との相互接続性が問題となる。一方自律分散型では、各 STA が何らかのアルゴリズムに基づいて AP を選択する。既存の無線 LAN では、STA は受信電波強度のみを指標として接続先の AP を自律分散的に決定している。しかし多くの場合、STA はソファや机などの物理的な位置に従って特定の位置に偏在するため、この AP 選択戦略では特定の AP に STA が集中してしまう。その結果、STA が良好な電波状況より高いスループットを期待してその AP に接続しても、STA1 台当たりのスループットは低下してしまい、無線資源を有効かつ公平に利用できなくなる [1]–[4]。

そこで我々は、既存方式との親和性や実装の容易さを考慮し、無線 LAN 側から得られる情報を基に STA 自身が自律分散的に AP を選択する方式を提案している [5]。その AP 選択戦略は、STA は最も高いスループットを期待できる AP に接続することである。本稿ではこれまでに調査した提案方式の基礎的な特性について述べ、提案方式が既存方式よりも無線資源を有効かつ公平に利用できることを示す。

### 2.2 分散型 AP 選択機構

提案する自律分散型の AP 選択機構は、STA が AP を選択するためのアルゴリズムと、そのアルゴリズムを定期的に行うとその目的に最も適した AP を動的に選択する機構の二つから構成される。本節では各機能について概略を述べる。

#### 2.2.1 AP 選択アルゴリズム

既存方式のように受信電波強度を AP 選択の指標とすると、STA の AP 接続は物理的な位置に依存してしまい、特定の AP に STA が集中しスループット特性は低下する。そこで各 STA が無

線 LAN に参加する際、AP ごとに獲得可能な想定スループットを予測し、最も高いスループットを期待できる AP に接続する AP 選択アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは、自 STA のスループットを最大化するように動作することから、Maximizing Local Throughput (MLT) アルゴリズムと定義する。MLT では、想定スループットを次のように求める。文献[6]より、衝突と伝送誤りがない理想的な場合に、あるパケット [bits] を送信するために必要な時間  $t_T$  は次式より求まる。

$$t_T = RTS + CTS + \frac{Data(bits)}{Rate(b/s)} + ACK + DIFS + 3SIFS \quad (1)$$

ここで STA と AP 間の無線リンクの Packet Error Rate (PER) が  $P$  である場合、一つのパケットを正しく送受信するために必要な平均送信時間  $T_w$  は次式より求まる。

$$T_w = t_T + \sum_{i=1}^{\infty} p^i * (1-P) * i * t_T = \frac{t_T}{1-P} \quad (2)$$

STA 間の衝突の影響を無視できるとすると、AP が提供する無線資源は  $N$  台の STA により平等に利用されるため、各 STA のスループット  $\theta$  は次式で求まる。

$$\theta = \frac{Data}{T_w} = \frac{Data * (1-P)}{t_T * N} \quad (3)$$

各 STA が送受信するパケットの大きさは等しいとすると、式 (3) は次のように表すことができる。

$$W_{MLT} = \frac{(1-P)}{N} \quad (4)$$

式 (4) の  $P$  で表される PER は、受信電波強度から求めることができる。 $N$  はその AP と接続して通信を行っている STA 数を示している。この  $N$  を各 STA へ通知するために、AP は Probe Response 及び Beacon フレームに接続 STA 数情報を追加する必要がある。STA はスキャンングプロセスを通して、この  $N$  の情報を得ることができる。なお、既存の端末は付加された情報を無視するため、既存の端末に新たな変更は必要ない。

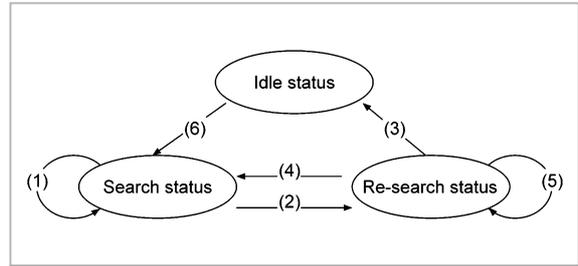


図1 動的 AP 選択機構

STA は式 (4) を重み関数とし、この重み関数が最大となる AP を選択する。このようにして各 STA は自身のスループットを最大にするように AP を選択する。

### 2.2.2 動的 AP 選択機構

各 STA は無線 LAN に参加する際、前述の MLT アルゴリズムに従って AP を選択する。しかし新たな STA の参加や無線環境の変化により、最初に選択した AP が最適ではなくなる可能性がある。提案 AP 選択方式ではこの状況の変化に対応するために、動的 AP 選択機構により AP 選択アルゴリズムを定期的に行い、変化に応じて最適な AP を再選択し、ローミングを行う。

ここではその概要を図 1 に示す状態遷移図を用いて説明する。提案する動的 AP 選択機構では、search、re-search、idle の三つの状態を遷移する。まず STA は Search Interval 間隔で全 AP に対する重み関数を計算する (1)。現在接続中の AP ではない新たな AP<sub>new</sub> の重み関数が一番大きくなった場合、STA は re-search 状態に遷移する (2)。その状態では、Backoff Time 後に再び全 AP に対して重み関数を計算する。この Backoff Time は [0 ~ 1] 秒の間でランダムに選択される。再計算の結果、再び AP<sub>new</sub> が最適な AP として選択された場合、STA は AP<sub>new</sub> へとローミングを実行し、idle 状態へ遷移する (3)。現在接続中の AP が選択された場合は、STA は search 状態に戻る (4)。また、別の新たな AP が最適な AP として選択された場合は、STA は re-search 状態にとどまる (5)。そして新たな AP を AP<sub>new</sub> とし、STA は Backoff Time 後に再び全 AP に対して重み関数を計算する。新たな AP<sub>new</sub> へとローミングした STA は、ピンポン効果を防ぐため Idle Time 待った後に search 状態に戻る (6)。

## 2.3 性能評価

本稿では、40 台の STA が 4 台の AP を介して Source と通信を行っているモデルを用いてシミュレーション評価を行った。無線 LAN は IEEE 802.11b により構築されるとし、AP 間で干渉することのないように無線チャンネルを設定して、図 2 のように配置した。シミュレータとしては VINT プロジェクトの NS-2 を IEEE 802.11b に拡張したのを用い、無線区間のエラーモデルには shadowing モデルを採用した。送信側 Source は、TCP パケットを 40 台の STA へ Router と 4 台の AP を介して送信する。TCP は SACK オプションを利用し、そのセグメントサイズは 1,500 バイトとする。各 TCP フローは無限のデータを連続してファイル転送するものとした。Source と Router 間の有線リンクの帯域は 10Mb/s、遅延は 10usec、また Router と各 AP 間の有線リンク帯域は 100Mb/s、遅延は 1usec とした。

特定の AP への STA の不均衡な集中をシミュレーション上に反映させるために、STA は図 2 で示すように、30m×30m の範囲内に均等に配置するとした。これにより既存の RSSI で AP を選択する場合、AP-1 と AP-2 に STA が集中し偏りが発生しやすくなる。40 台の STA は 10 秒間で任意に配置するとした。このとき各 STA は AP 選択アルゴリズムに従って AP を選択する。その AP 選択アルゴリズムとしては提案する MLT と、既存の RSSI を利用する Received Signal Strength (RSS) を用いた。なお、配置後 STA は位置を移動しないものとする。

表 1 にスループットを示す。表 1 より、MLT では最小スループット、平均スループット共に大きく改善されていることが分かる。各アルゴリズムの詳細な挙動を調べるため、図 3 に平均スループット別 STA 存在確率を示す。図 3 より、RSS は最頻値が MLT よりも低いことが分かる。これは、受信電波強度のみを指標として AP を選択した結果、特定の AP に端末が集中してスループットが低く抑えられているためである。一方 MLT では、各 STA が自スループットを最大化するように AP を選択するため、最頻値、最小値共に RSS よりも高い値をとっている。これらの結果から、提案する自律分散型 AP 選択機構は既存方式よりも無線 LAN 資源を効率的に利用できること

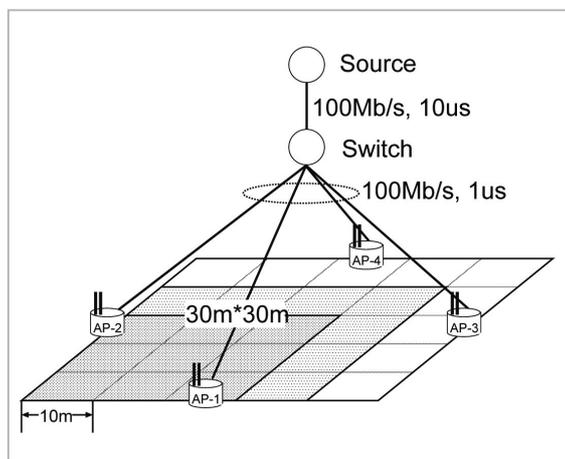


図2 シミュレーションモデル

表1 スループット

	最小スループット	平均スループット
RSS	154.73 [Kb/s]	13.07 [Mb/s]
MLT	271.50 [Kb/s]	15.05 [Mb/s]

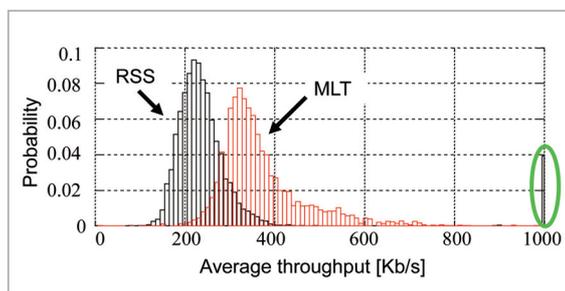


図3 平均スループット別 STA 存在確率

が分かる。

本節では、一つの組織が管理しているインターネット/イントラネットへの無線 LAN アクセス網に焦点を当て、各端末が提案した自律分散型 AP 選択機構を利用することで、無線 LAN 資源を公平かつ効率的に利用できることを示した。しかしながら、現在多くの無線アクセスネットワークが重複して提供されるようになってきており(例、PHS と 3G ネットワーク)、こういった複数の通信媒体を利用した通信機構の提供が必要となってきている。続く 3 では、このような複数ドメインのアクセス網が同時に利用可能なユビキタス環境におけるドメイン間の資源利用・割当制御技術について述べる。

### 3 ドメイン間におけるアクセス網選択手法

本章では、対象とする環境を少し拡張し、多種多様なアクセス網が相互に重なり合い配置され、ユーザが同時に複数のアクセス網を利用可能なマルチホーム環境に焦点を当てる。このような環境において高品質かつ高効率な移動通信を実現するためには、移動ホストは複数の通信メディアを持ち、そのネットワーク状況や通信フロー特性に応じて最適な通信メディアを選択し、通信を切断することなく独立的にそれらの通信メディアを利用可能なことが要求される。関連する既存の方式としては、Mobile IP (MIP)<sup>[7]</sup> や Mobile Stream Control Transmission Protocol (Mobile SCTP)<sup>[8]</sup>、Host Identity Protocol (HIP)<sup>[9]</sup> などが提案されている。これらの方式はそれぞれモビリティ機能やマルチホーム機能を提供するが、共通する問題として通信品質 (Quality of Service, QoS) を制御する機構を備えていないという点がある。そこで、我々は利用可能な帯域や要求される遅延特性などのネットワーク状況やフロー特性に応じて、適した通信メディアを選択し、利用するための機構として、Media Optimization Network Architecture (MONA)<sup>[10]</sup> を提案している。

#### 3.1 Media Optimization Network Architecture (MONA)

まず、本機構が提供する通信メディア最適化の概念を図4に示す例を用いて説明する。この例では、三つのホスト  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  がそれぞれインターネットを経由して接続されている。このような環境において、アクセス網はコア網よりも比較的帯域、高遅延であり、また安定性が低いため、通信品質はアクセス網の特性で決定されることになる。つまり、これらのアクセス網の選択は通信品質の向上にとって重要な点となるが、従来の機構ではホストが複数の通信メディアを持っていたとしても通信開始時に利用したメディアを使い続けなければならない、また同時に一つのメディアしか利用できないという問題がある。そこで、MONA では図の例のように、通信フローごとにそのフロー特性やアクセス網の状況に応じて、適したメディアを選択し、利用するための仕組みを

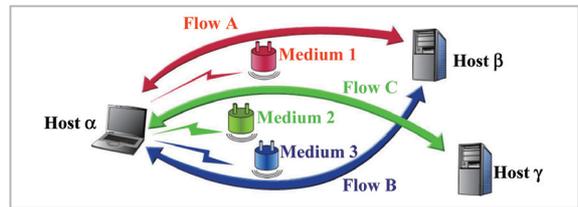


図4 通信メディア最適化の概念

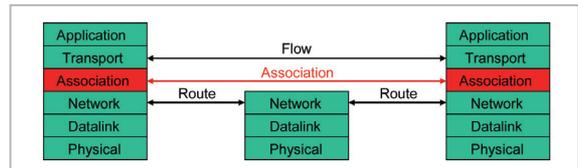


図5 ネットワーク階層におけるアソシエーション層

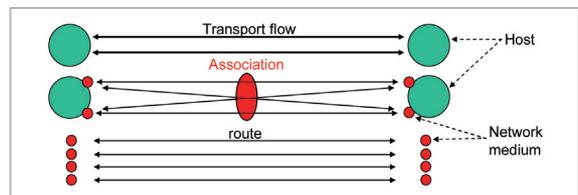


図6 各通信層間の関係

提供する。実際に、各通信ホストが通信中でも動的に適したメディアを選択し、切り替えるためには、各フローやメディアの状態を継続的に管理する必要がある。また、受信フローに関して、受信メディアを選択するためには、通信相手にその情報を通知しなければならない。そのため、MONA ではそれらの情報をまとめて管理するための新しい通信層をアソシエーション層として既存のネットワーク階層構造へ追加する。

このアソシエーション層は図5に示すようにトランスポート層とネットワーク層の間に挿入される。通信フローごとに利用する通信メディアを選択するという事は、トランスポート層 (第4層) で管理される通信フローごとに、ネットワーク層 (第3層) で管理される実際に通信に用いられるIPアドレスを選択することになるため、これらの間へ第3.5層として挿入している。そうすることで、既存の通信層への変更を必要としないため、従来のアプリケーションがそのまま利用可能であり、また今後新たなトランスポートプロトコルや無線アクセス技術が登場してもその対応が容易であるという利点がある。

次に、アソシエーション層の動作概念を説明する。図6は各通信層間の関係を示している。アソ

シエーション層は各ホストが持つ通信メディア、すなわち IP アドレスの組合せから生成される仮想的な通信路の集合をアソシエーションとして管理する。この例では、各ホストはそれぞれ二つのメディアを持っているため、アソシエーション内には四つの経路が存在する。このアソシエーション内の適した経路にホスト間のトランスポートフローがそれぞれ割り当てられることになる。その際、各ホストが移動などの理由により利用可能なメディアの数が増減した場合や、また IP アドレスやネットワーク状態が変化した場合でも、通信中に動的にアソシエーションを更新できるように、アソシエーション層はトランスポート層識別子(フロー識別用)とネットワーク層識別子(パケット送受信)を分離し、その間で調整を行う。このホスト間アソシエーションを用いることで、ネットワーク中に特別な機構を必要とせず、通信メディア最適化を実現する。

また、アソシエーション層はホスト間アソシエーションの確立・管理を行うために、Association Management Protocol (AMP) を用いてアソシエーション層識別子やメディアアドレス及びフローごとのメディア優先度などの必要な情報を通信ホスト間で交換する。アソシエーション識別に必要な最小限の情報は、AMP ヘッダとしてアソシエーションを利用するすべてのデータグラムの IP ヘッダとそのペイロード間に挿入されるが、それ以外の情報はアソシエーションパケットとしてデータフローとは独立して送られる。そのため、ヘッダオーバーヘッドを小さく抑えることができ、また MONA 機構がない従来のホストとも通常の TCP/IP、UDP/IP を用いて通信が可能となる。

### 3.2 性能評価

本節では、本提案機構 MONA の有効性・実現性の検証のために行ったコンピュータシミュレーション及びプロトタイプ実装を用いた実証実験の結果を示す。まず、シミュレータには、NS-2 にアソシエーション層及びプロトコルを実装したものをを用いた。また、対象とした環境は図7に示すような移動ホスト (MH) が通信相手 (CH) とセルラー網や無線 LAN を経由して接続しているモデルである。各リンクはそれぞれ図中に示した帯域と伝搬遅延時間を持つとし、各ノードにおけるバ

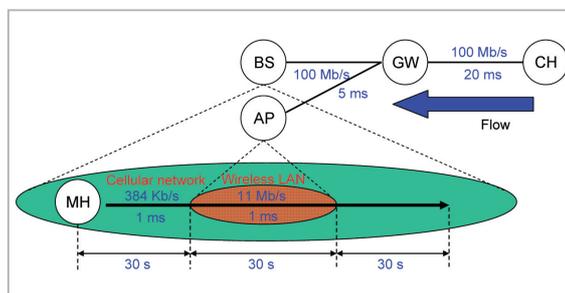


図7 シミュレーションモデル

ッファサイズは 50 パケット分とする。ただし、無線リンクで生じる干渉や伝送誤りは考慮していない。また、MH は CH から 2 フローを受信すると仮定する。それらは IP 電話を想定した 64Kb/s の UDP フローと、無限長ファイルを受信する TCP フローである。各パケットサイズは UDP が 200 バイト、TCP が 1,000 バイトとし、TCP アルゴリズムには SACK を用いる。MH はシミュレーション開始から 30 秒後に無線 LAN エリアに入り、その 30 秒後に出ると仮定する。したがって、MH は 30 秒間マルチホーム環境を利用する。この時の TCP スループット特性と UDP 伝送遅延時間特性をそれぞれ図 8、9 に示す。図中、MONA とは無線 LAN が利用可能なときに、通信メディア最適化により TCP フローだけが無線 LAN を利用する場合である。なぜなら、一般に、TCP フローは広帯域を要求するが、UDP フローは広帯域なリンクよりも輻輳が生じていないリンクを要求するためである。また、Original とは比較のためのアソシエーション機構を用いない場合の結果であり、常にセルラー網を利用し続けることになる。これらの図から、MONA は異種のアクセス網が利用可能な場合において、それらのアクセス網を効果的に使い分けることにより、高い TCP スループットを獲得し、UDP の伝送遅延時間も大きく減少させることが可能であることが分かる。

次に、プロトタイプ実装を用いた実証実験の結果を示す。今回、MONA の基本機能として、通信メディアの IP アドレスが変化した場合や通信メディアを切り替えた場合にも通信が継続可能な機構を Linux カーネルに実装した。対象とした環境は、有線 LAN と無線 LAN の 2 つの通信メディアを持った MH がルータを介し CH と接続し

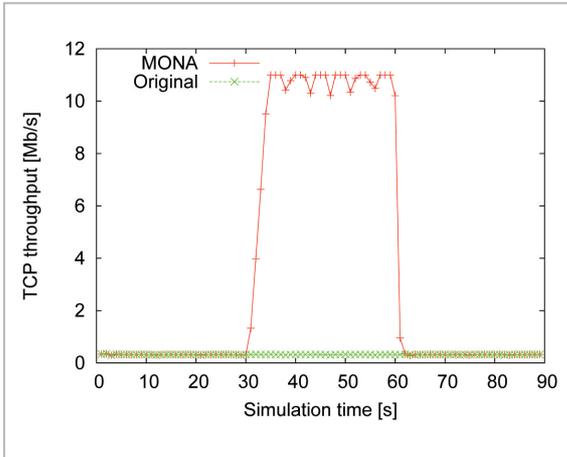


図8 TCPスループット特性

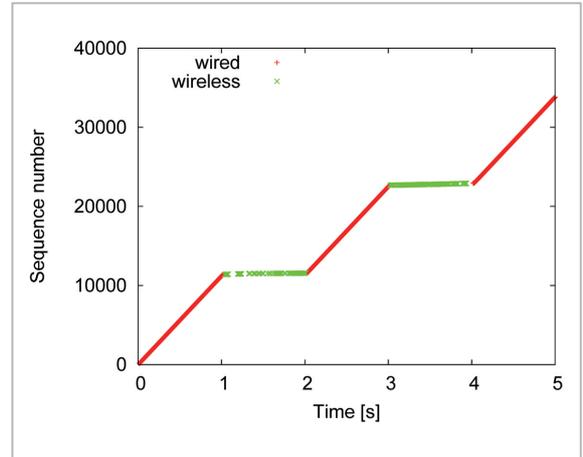


図10 受信パケットのシーケンス番号

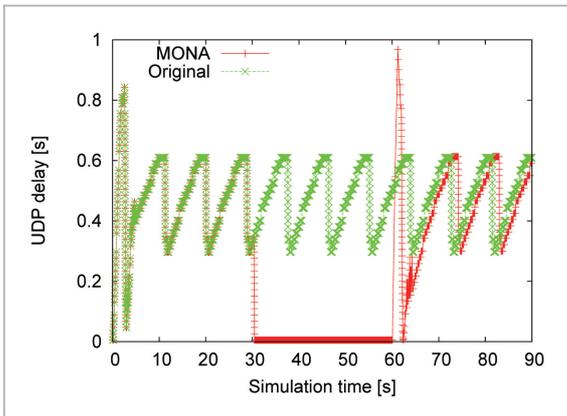


図9 UDP 伝送遅延時間特性

ているモデルである。MH が CH から iperf を用いた TCP フローを 1 本受信しながら、1 秒間隔で有線 LAN が切断、接続を繰り返した場合における受信した ACK パケットシーケンス番号の変化を図 10 に示す。この図から MONA は通信メディアの状態に応じて適した通信メディアを選択し、切断することなく通信を継続できていること

が分かる。

## 4 おわりに

本稿では、アクセス網における動的適応的な資源利用・割当制御技術として、単一ドメイン内制御と複数ドメイン間制御の両側面から取り組んでいる提案手法を紹介し、コンピュータシミュレーションやプロトタイプ実装による実証実験によりその有効性を示した。これらアクセス網間の資源利用・割当技術と、各アクセス網内の資源利用・割当技術が相互に連携することで、アクセス網上を通過するエンドツーエンド通信の品質や限られた資源の利用効率の向上が達成できると考えている。今後は、マルチホップ無線網など対象とするアクセス網の規模を拡張し、またトランスポートプロトコルやルーティング技術などとの連携手法に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1 D.Tang and M.Baker, "Analysis of a metropolitan-area wireless network", Proc. ACM Mobicom 1999, pp.12-23, August 1999.
- 2 D.Tang and M.Baker, "Analysis of a local-area wireless network", Proc. ACM Mobicom 2000, pp.1-20, August 2000.
- 3 D.Kotz and K.Essien, "Analysis of a campus-wide wireless network", Proc. the Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.107-118, September 2002.
- 4 A.Balachandran, G.M.Voelker, P.Bahl, and V.Rangan, "Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN", Proc. ACM SIGMETRICS'02, June 2002.
- 5 Y.Fukuda and Y.Oie, "Decentralized access point selection architecture for wireless LANs - deployability and robustness-", Proc. IEEE Vehicular Technology Conference 2004-Fall (VTC2004-Fall), September 2004.
- 6 IEEE, "Information technology - telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks - specific requirements - part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications", IEEE Standard 802.11, September 1999.
- 7 D.Johnson, C.Perkins, and J.Arkko, "Mobility support in IPv6", IETF RFC3775, June 2004.
- 8 S.Koh, M.J.Lee, M.Riegel, M.L.Ma, and M.Tuexen, "Mobile SCTP for transport layer mobility", IETF Internet-draft, draft-sjkoh-sctp-mobility-03.txt, February 2004.
- 9 R.Moskowitz, P.Nikander, P.Jokela, and T.Henderson, "Host identity protocol", IETF Internet-draft, draft-ietf-hip-base-02.txt, February 2005.
- 10 H.Koga, H.Haraguchi, K.Iida, and Y.Oie, "A Framework for network media optimization in multihomed QoS networks", Proc. ACM First International Workshop on Dynamic Interconnection of Networks (DIN2005) in conjunction with Mobicom2005, pp.38-42, September 2005.



こがひろゆき  
古閑宏幸  
拠点研究推進部門北九州 JGN II リサーチセンター専攻研究員 博士(情報工学)  
モバイルネットワーク、通信プロトコル

ふくだ ゆたか  
福田 豊  
九州工業大学情報科学センター助手 博士(情報工学)  
情報ネットワーク、無線ネットワーク



はらくちひろあき  
原口浩朗  
安川情報システム株式会社研究開発担当課長  
インターネット技術、FA 通信システム

つる まさと  
鶴 正人  
拠点研究推進部門北九州 JGN II リサーチセンター専攻研究員 博士(情報工学)  
ネットワーク性能計測、ネットワークモデリング、ネットワーク解析



おいえゆうじ  
尾家祐二  
拠点研究推進部門 JGN II 研究開発プロジェクト総括責任者 工学博士  
情報ネットワーク工学