

Mobile IPv6 を用いた通信回線共有方式の実装

舩 田 知 広[†] 大 木 一 将[†],
峰 野 博 史^{††} 石 原 進^{†††}

筆者らは、無線通信における移動端末の低速な通信を解決する手法として通信回線共有方式 SHAKE (SHARing multipath procedure for a cluster network Environment) を提案している。これは、近隣にある複数の移動端末を短距離高速リンクで一時的に接続し、各端末が持つ外部へのリンクを同時利用することで通信速度向上を実現する方式である。本稿では、IP 層での SHAKE 実現として Mobile IPv6 を利用した Mobile IPv6 SHAKE を提案する。SHAKE では一時的に接続された移動端末群による複数の通信経路へトラフィックを分散させるため、それを行う場所が重要となる。筆者らがすでに提案した Mobile IPv4 版の SHAKE では、このトラフィック分配を Home Agent で行ったが、Mobile IPv6 SHAKE では Mobile IPv6 が提供する経路最適化機能を利用するため、トラフィック分配機構を通信相手 Correspondent Node (CN) に設置する。Mobile IPv6 では CN に Mobile Node (MN) のホームアドレスに対して 1 つの気付アドレスしか登録できないため、SHAKE では CN へ MN のホームアドレスに対し、MN と近隣の端末の気付アドレスを複数登録させるように拡張した。FreeBSD 上で KAME IPv6 プロトコルスタックをもとに実装を行い、基本動作の評価を行った。CN から FTP で約 1 Mbytes のファイル転送を行った結果、2 本の経路を用いた場合、これらの経路の合計帯域と同じ帯域を持つ 1 本の経路を用いた場合と同等のスループットが得られた。

Implementation of Mobile IPv6 SHAKE

TOMOHIRO MASUDA,[†] KAZUMASA OGI,[†] HIROSHI MINENO^{††}
and SUSUMU ISHIHARA^{†††}

We have proposed a system that aggregates links between multiple mobile hosts and the internet, and improves transmission speed SHAKE (SHARing multipath procedure for a cluster network Environment). In order to realize this system at the network layer, we propose an architecture with Mobile IPv6, Mobile IPv6 SHAKE. Because SHAKE is designed to disperse packets destined for one of mobile hosts in an ad hoc network to multiple links between the internet and the ad hoc network, the location of the traffic dispersing mechanism in the network is important. In our implementation on SHAKE with Mobile IPv4, the traffic distribution mechanism was integrated into the HA of a mobile node in the ad hoc network. Mobile IPv6 SHAKE uses a correspondent node (CN) that supports Mobile IPv6 for dispersing traffic to use optimized paths between the CN and mobile nodes in the ad hoc network. The Mobile IPv6 specifications do not allow a MN to register multiple care-of addresses to its single home address. Therefore, we extended Mobile IPv6 so that it can handle multiple care-of addresses of neighboring mobile nodes of a mobile node as care-of addresses of the node. We implemented Mobile IPv6 SHAKE by extending Mobile IPv6 protocol stack developed by KAME project on FreeBSD, and evaluated the performance. The throughput of FTP 1MB file transmission in the case when two paths were used was as same as one in the case when one path whose bandwidth was same as the sum of the bandwidth of two paths were used.

1. はじめに

近年、モバイルコンピューティングが普及し、いつでも、どこでもインターネットに接続可能になった。また、それらモバイルコンピュータの中には複数のネットワークインタフェースを搭載したものもあり、ユーザは状況に応じて使い分けることが可能である。それらのインタフェースのうち、無線 LAN 等を用いた短距離無線通信は高速な通信が可能である。しか

[†] 静岡大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

^{††} 静岡大学情報学部

Faculty of Information, Shizuoka University

^{†††} 静岡大学工学部

Faculty of Engineering, Shizuoka University

現在、エヌ・ティ・ティ・システム開発株式会社

Presently with NTT System Development Co., LTD.

し、外出先でインターネットに接続しようとする携帯電話等の比較的低速な広域無線通信サービスを使用せざるをえない状況が考えられる。そこで筆者らは、ネットワーク資源を有効に活用するために通信回線共有方式 SHAKE (SHARing multipath procedure for a cluster network Environment) を提案している。SHAKE は、近隣の端末と短距離高速リンクを用いてネットワークを構築し、そのネットワークの外部ホストと通信を行う際に、他の近隣端末のリンクにトラフィックを分散させる。これにより、通信速度・信頼性の向上を図る。本稿では、この SHAKE を Mobile IPv6¹⁾ を用いて実現する手法を新たに提案し、その基本部分の実装と評価について述べる。

以下、2 章では通信回線共有方式とその関連研究について述べ、3 章では Mobile IPv6 SHAKE の通信等の基本動作について説明する。4 章で基本動作の評価を行い、5 章では、Mobile IPv6 SHAKE についての検討事項を述べ、6 章でまとめとする。

2. 通信回線共有方式 SHAKE

2.1 SHAKE

通信回線共有方式 SHAKE では、図 1 のように近接する複数の移動端末が無線 LAN 等の短距離高速リンクを用いて一時的にネットワーク(クラスタ)を構築する。クラスタ内のある端末が外部と通信する際、他のクラスタ内端末の外部ネットワークへのリンクを複数用いて、各経路にトラフィックを分散させる。これにより、高速な通信が可能になる。ここでは、クラスタを構成する端末のうち、特定の通信に関与する端末群を Alliance とし、SHAKE を用いて通信を行う端末を Alliance Leader (AL)、AL のトラフィックを中継する端末を Alliance Member (AM) と呼ぶ。

筆者らは、IP 層で SHAKE を実現させる手法として、Mobile IP を用いた Mobile IPv4 SHAKE を提案し、実装、評価している²⁾。Mobile IPv4 SHAKE では、複数のリンクへのパケットの分配機構を Mobile IPv4 の Home Agent (HA) に設置している。これは、Mobile Node (MN) が通信相手である Correspondent Node (CN) と通信する際、必ず HA を経由するので、CN に対して透過に SHAKE の機能を提供できるためである。しかし、MN と CN の通信パケットが必ず HA を経由するため、MN と CN 間の通信経路は最適経路にならない、また HA に負荷がかかるといった問題が生じる。

2.2 関連研究

エンド・エンド間で複数経路を同時に用いてスルー

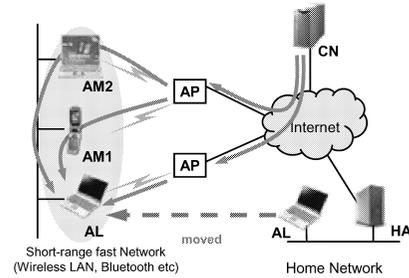


図 1 Mobile IPv6 SHAKE
Fig. 1 Mobile IPv6 SHAKE.

プロットの向上を図る手法がいくつか提案されている。たとえば、parallel TCP (pTCP)³⁾ は、1 つのソケットインタフェースが各インタフェースを利用する複数のサブコネクションを同時、あるいは選択的に使用する手法を提供している。また、文献 4) では、複数のインタフェースを持つ Mobile IPv6 の移動ノードに対し、ポリシーベースでそれぞれのインタフェースにフローごとにデータを分配している。これらの手法では、単一のホスト上にあるインタフェースを同時に使用するもので、複数のホストの協調は考慮されていない。

一方 SHAKE では、近隣の移動ノードと協調してネットワークを構築し、それぞれのインタフェースにトラフィックを分配している。

ネットワーク単位の移動透過性を保証するプロトコルとして NEMO Basic Support⁵⁾ がある。NEMO は Mobile IPv6 を拡張しており、Mobile Router (MR) がデフォルトルータとなるネットワークにおいて、MR が移動処理を行うことでその配下にある Mobile Network Node (MNN) の移動は透過となる。MR が包括する MNN の通信経路は MR の HA を経由するのでエンド・エンド間での経路最適化は行われない。NEMO におけるマルチホーミングについて、文献 6) では様々な MR と HA、Mobile Network Prefix の数の組合せによる検討がなされている。文献 7) では、Mobile Network 内に MR が存在する入れ子状のネットワークにおけるマルチホーミングの検討を行っている。NEMO でマルチホーミングを行うと、モバイルネットワーク内の MNN が同時に複数の経路を使用して外部ネットワークとの通信が可能となり、この通信形態は SHAKE に似たものとなる。しかし NEMO では CN との通信経路の選択はフロー単位で行われ、経路最適化を行わないが、Mobile IPv6 SHAKE では、パケット単位の経路選択、経路最適化を実現している。

3. Mobile IPv6 SHAKE

Mobile IPv6 SHAKE では、Mobile IPv6 を用いて SHAKE を実現させる．先に述べたように、Mobile IPv4 SHAKE では Mobile IPv4 を用いているため、MN と CN の通信経路は HA を介したものとなり、その経路は最適化されない．また、すべての CN から MN に向かうトラフィックに対するトラフィック分配処理が HA で行われるので、HA の負荷が大きい．NEMO Basic Support においても MR の配下にある MNN の通信は MR の HA を経由するものとなり経路最適化は行われない．一方、Mobile IPv6 では、CN が Mobile IPv6 対応ノードであれば、MN と CN が直接通信できる機構が用意されており、その経路は最適な経路となる．そこで、Mobile IPv6 SHAKE では、Mobile IPv6 を用いてトラフィックの分配機構を CN に持たせることにより、経路最適化を実現するとともに HA の負荷を減少させる．

3.1 Mobile IPv6 の動作概要

Mobile IPv6 SHAKE の動作概要を説明するにあたり、まず図 2、図 3 を用いて Mobile IPv6 の動作の概略を説明する．

MN は、Home Link から離れ、Foreign Link へ移動した後、MN の Home Address (HoA) と Care-of Address (CoA) の対応付けを Binding Update メッセージを用いて HA へ登録する (図 2 ①)．MN が CN と通信を行うときは、Return Routability を行ってから (図 2 ②)、CN に Binding Update を送信する (図 2 ③)．Return Routability では、MN と CN の直接経路と HA を介した経路でやりとりされたメッセージを用いて、MN と CN が直接通信する際に使用する共有鍵を生成する．

MN は、Binding Update を送信した後、相手の情報を管理する Binding Update List (BUL) を生成する．CN は、MN から Binding Update を受信したら Binding Cache で MN の Binding を管理する．これにより、CN は MN と通信するとき、パケットの宛先を MN の CoA に指定することができるため、HA を介さない CN と MN の直接通信が可能となる．CN と MN の直接通信の際、CN から MN へ送られるパケットには、Type2 経路制御ヘッダが付加される (図 3)．

Mobile IPv6 では、セキュリティ上の配慮のため、新たに Type2 経路制御ヘッダを導入している．仮に Mobile IPv6 において、既存の Type0 経路制御ヘッダが用いられた場合、ある firewall で経路制御ヘッダを持つパケットを破棄する設定がなされているなら、

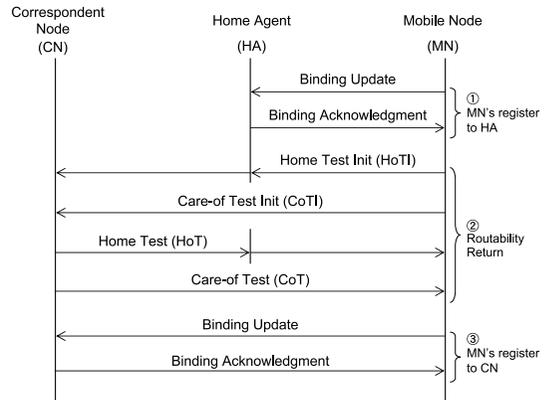


図 2 Mobile IPv6 の登録手順

Fig. 2 Registration procedure of Mobile IPv6.

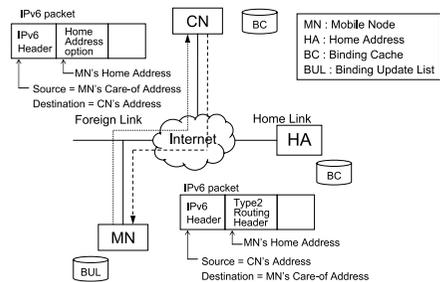


図 3 Mobile IPv6 の経路最適化

Fig. 3 Route optimization of Mobile IPv6.

Mobile IPv6 は利用できない．そこで、容易に Mobile IPv6 用と判断できる Type2 経路制御ヘッダが定義された．Type2 経路制御ヘッダには MN の HoA が格納されている．また、パケットが中継されるノード数を表す Segments Left と呼ばれるフィールドには 1 が設定される．MN が CN から MN の CoA 宛で送られてくるパケットを受け取った後、MN は宛先アドレスと Type2 経路制御ヘッダに含まれている MN の HoA を入れ替える．そして、Type2 経路制御ヘッダの Segments Left フィールドを 1 減らす．これにより、パケットの宛先が MN の HoA となり、また Segments Left が 0 となるため、MN はそのパケットを自分の HoA 宛として受信することができる．

MN から CN へ送られるパケットの送信元アドレスは MN の CoA である (図 3)．また、そのパケットには Home Address option が付加され、MN の HoA が格納されている．CN は、MN からパケットを受信したら、送信元アドレスを MN の CoA から Home Address option に含まれている MN の HoA に入れ替える．これにより、IP 層よりも上位層では、MN の HoA と通信しているように見せることが可能となる．

このように、Mobile IPv6 では、MN と CN の直接通信により、経路最適化を行っている。Mobile IPv6 SHAKЕ では、CN にトラフィック分配機構を設置して経路最適化を実現することで、Mobile IPv4 SHAKЕ での問題点であった HA を経由する冗長性と HA の負荷集中を避けることができる。しかし、SHAKЕ 使用時の経路最適化は Mobile IPv6 SHAKЕ に対応した CN との通信にしか適応できなくなるので、Mobile IPv4 SHAKЕ で提供されていた CN に対する透過性が保証されなくなる。

3.2 Mobile IPv6 SHAKЕ の動作概要

以下、Mobile IPv6 SHAKЕ の動作概要を説明する。

MN が SHAKЕ を利用するとき、短距離高速リンクを用いて近隣の端末とクラスタを構築する。SHAKЕ を利用する MN は AL となり、Alliance を構築する必要があるため、クラスタ内で共有しあう情報（CPU、バッテリー残量等）をもとに AM となる MN を探す。AL は、それらの端末に対してパケットの転送を依頼し、それに応答した MN と Alliance を構築する。

Alliance を構築した後、AL は AL 自身の Care-of Address (CoA) を Binding Update により CN に登録する。さらに AL は、AM と情報を交換することで得られた AM の CoA を AL の Home Address (HoA) に対応付けて CN に登録する。CN では、AL の HoA に対応付けられた複数の CoA を Binding Cache により保持する。CN が AL と通信する際には、Binding Cache を参照し、複数の CoA に対応する経路にパケットを振り分ける。AM は CN から AL 宛のパケットを受信すると、クラスタ内のリンクを用いて AL に転送する。AL が CN へパケットを送信する際は、CN と AM にパケットを分配する。AM へ送信する際はクラスタ内のリンクを経由して CN に配送される。

3.3 Mobile IPv6 SHAKЕ の設計

3.3.1 要求条件

Mobile IPv6 SHAKЕ 実現には以下の要件を満たす必要がある。

- AL の HoA に対する、AL と AM の CoA の複数登録
Mobile IPv6 では、1 つの HoA に対して 1 つの CoA の対応付けしかできない。Mobile IPv6 を用いて SHAKЕ を実現させるには AL の HoA に対して、AL の CoA と複数の AM の CoA を対応付けしなければならない。
- AL と CN に対するトラフィック分配機構の設置
SHAKЕ は、通信に関してトラフィックを複数の通信経路に分散させる方式である。Mobile IPv6

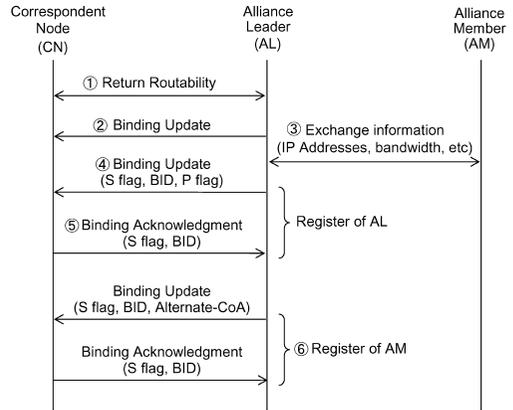


図 4 Mobile IPv6 SHAKЕ の登録手順

Fig. 4 Registration procedure of Mobile IPv6 SHAKЕ (CN).

SHAKЕ では、AL と CN にトラフィック分配機構を導入する。

- AM でのクラスタ内パケット転送
Mobile IPv6 SHAKЕ では、CN と Alliance 間で直接通信する。そのため、CN と AL 間の通信では、必ず AM を経由するので、AL、AM 間でのパケット配送を適切に行うための仕組みが必須となる。
- Alliance 内端末のハンドオーバーにおけるモビリティ機構
SHAKЕ では、Alliance 内端末のハンドオーバーが起きても SHAKЕ による通信を持続させる必要がある。特に Mobile IPv6 ではハンドオーバー時の処理遅延によってパケットロスが発生する恐れがある。さらに Mobile IPv6 SHAKЕ では AL だけではなく AM の移動によ生じるパケットロスも考慮し、その影響を最小限にする機構が必要となる。

3.3.2 CN への Alliance 内端末の登録

Mobile IPv6 SHAKЕ における Alliance 内端末の CN への登録手順を図 4 に示す。Mobile IPv6 SHAKЕ では、CN にトラフィック分配機構を設置するため、CN に対して Alliance 内端末を登録する必要がある。以下、AL は CN との Return Routability、Binding Update を済ませてあるものとし、AL と AM 間のメッセージ交換で、AL は AM の CoA、AM は AL の HoA を知することを前提として述べる（図 4 ①、②、③）。

先に述べたとおり、Mobile IPv6 SHAKЕ では、AL の HoA に対して、AL と AM の複数の CoA を対応付けて登録しなければならない。そのために、Binding Update List および Binding Cache を拡張する必要

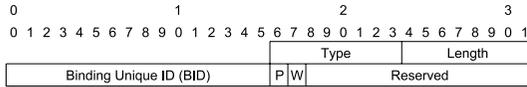


図 5 BID sub-option フォーマット
Fig. 5 BID sub option format.

がある。さらに、CN では Binding Cache に登録されているどの端末が SHAKE を利用しているか知る必要がある。そこで、AL は CN に CoA を登録する際、SHAKE の利用を示すため、Binding Update に SHAKE(S) フラグをセットする。また、CN では Alliance 内端末の CoA が変更された場合、HoA と CoA の対応付けだけではどの端末の登録であるか判断することができない。そのため、各登録を識別するために Binding Unique Identification number (BID)⁸⁾ を使用する。AL は、BID を示した BID sub-option を Binding Update に付加して CN に送信する。BID sub-option フォーマットを図 5 に示す。P フラグは Binding Update の対象となる CoA が AL の持つものであることを示し、W フラグはハンドオーバー時に使用する。

AL の登録

AL は CN に SHAKE 用の CoA の登録であることを示すため、Binding Update に S フラグを追加する。その際、AL が生成した BID を指定した BID sub-option を Mobility フィールドに挿入して送信する。さらに、BID sub-option には AL を示す P フラグをセットする (図 4 ④)。

CN は、S フラグがセットされた Binding Update を受信すると、送信元アドレスと Home Address option に格納されている HoA との対応を Binding Cache より検索する。この Binding Update の送信元が、すでに Mobile IPv6 の Binding Update および Return Routability が完了済みの正当な端末であると確認できたら、これを AL として Binding Cache に S フラグ、BID、P フラグを追加して保持する。

さらに、CN は Binding Update の返答として、S フラグをセットした Binding Acknowledgment に AL の BID を示した BID sub-option を付加し、AL に送信する (図 4 ⑤)。

AM の登録

AL が AM の CoA を CN に登録する際も AL の CoA の登録と同様の処理を行う。ただし、AM の CoA を CN に伝える際は、Alternate Care-of Address option を使用する点、および BID sub-option には、P フラグをセットしない点が異なる (図 4 ⑥)。

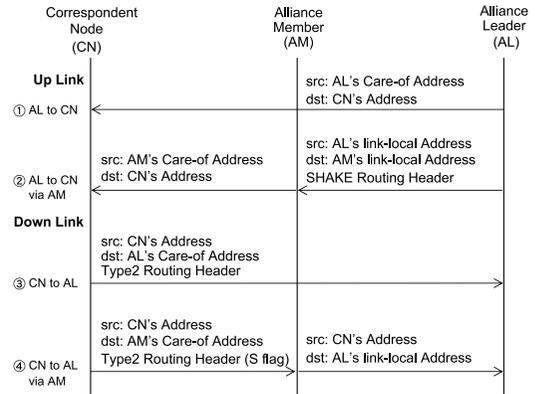


図 6 Mobile IPv6 SHAKE の通信
Fig. 6 Path transmission on Mobile IPv6 SHAKE.

3.3.3 CN と Alliance 間の通信

Mobile IPv6 SHAKE では、AL と CN にトラフィック分配機構を設置している。それぞれ、分配したパケットは AM を経由するので、AL と CN の通信では AM を経由した通信を考慮する必要がある。Mobile IPv6 SHAKE における通信の流れを図 6 に示す。

CN と AL の直接通信

CN と AL の直接通信は、Mobile IPv6 に従って行われる。AL から CN へ送信されるパケットの送信元アドレスは AL の CoA、宛先アドレスは CN のアドレスとなる (図 6 ①)。CN から AL へ送信されるパケットの送信元アドレスは CN のアドレス、宛先アドレスは AL の CoA となり、Type2 経路制御ヘッダが付加される (図 6 ③)。

CN から AL への AM を経由する通信

CN が AM を経由して AL にパケットを送信する場合、パケットの宛先を AM の CoA、Type2 経路制御ヘッダの Home Address フィールドには AL の HoA を指定する (図 6 ④)。

Mobile IPv6 において、Type2 経路制御ヘッダの Home Address フィールドには、IPv6 ヘッダの宛先に指定された CoA を持つ MN の HoA を指定しなければならない。通常、MN が自身の HoA 以外の IP アドレスが格納されている Type2 経路制御ヘッダを受信すると、そのパケットは破棄される。したがって、特別な処理を施さない限り、CN から Type2 経路制御ヘッダの Home Address フィールドに AL の HoA が格納されたパケットを受信すると、AM はそのパケットを破棄してしまう。

そこで Mobile IPv6 SHAKE では、Type2 経路制御ヘッダに SHAKE(S) フラグを追加することで AM に対して AL へ転送すべきパケットであることを示し、

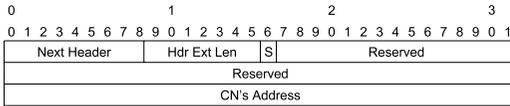


図 7 SHAKE 経路制御ヘッダフォーマット
Fig. 7 SHAKE routing header format.

AMでのパケット破棄を防ぐ。AMは、CNからパケットを受信したら、Type2 経路制御ヘッダにSフラグがセットされていることを確認し、さらにヘッダに含まれるIPアドレスとAMが保持しているALのHoAが一致するかを確かめる。一致した場合、パケットの宛先アドレスとType2 経路制御ヘッダに格納されているIPアドレスを入れ替えて、クラスタリンクを介してALへ転送する。

ALからCNへのAMを経由する通信

ALからAMに分配されるパケットの宛先アドレスはAMのクラスタ側のリンクローカルアドレスである。そこで、ALからCNへAMを経由してパケットを配送させるために、新たにSHAKE 経路制御ヘッダを追加する。既存の経路制御ヘッダに新しくタイプを定義し、ALからAMを経由するパケットに使用する解決方法も考えられるが、ルータがタイプを認識できない場合、パケットは破棄されてしまうため、ネットワークインフラ側に制約を与えてしまう。そこでMobile IPv6 SHAKEでは、SHAKEに関与するホストのみが認識するヘッダを導入することにした。

SHAKE 経路制御ヘッダのフォーマットを図7に示す。SHAKE 経路制御ヘッダにはCNのアドレスを格納する。AMはALからパケットを受信したら、SHAKE 経路制御ヘッダを検知する。SHAKE 経路制御ヘッダが存在した場合、このヘッダからCNのアドレスを参照し、パケットの宛先アドレスをCNのアドレスに書き換える。次に、パケットの送信元アドレスをAMのCoAにし、さらに、SHAKE 経路制御ヘッダにはALのHoAを格納する。

CNでは、ALからAM経由で配送されたパケットを受信すると、送信元アドレスとSHAKE 経路制御ヘッダ内のアドレスの対応付けをBinding Cacheで確認する。

3.3.4 ハンドオーバー

先に述べたが、Mobile IPv6 SHAKEにおいて、Alliance 内端末のハンドオーバーが起こった場合、その処理中に生じるパケットロスについて考慮する必要がある。文献9)では、Mobile IPv6 SHAKEにおけるハンドオーバーの影響を抑制する機構を提案している。以下、その概略を説明する。

ALがハンドオーバーする場合、移動先のアクセスルータからRouter Advertisement (RA)を受信し、ALは自身の移動を検出する。ALは、Pおよび分配抑制を示すWフラグをセットしたBID sub-optionをBinding Updateに付加してAMを介してCNに送信する。WフラグがセットされたBinding Updateを受信したCNは、ALのCoAへのパケット配送を停止する。これにより、ALがHAへBinding Updateを送信し、CNとReturn Routabilityを行う間にALのCoAへ直接配送されるパケットのロスを防ぐ。

AMがハンドオーバーする場合、SHAKEに関するCNへの登録はALがすべて行っているため、AMはALにCoAの変更を伝える必要がある。そこで新たにAlliance Wait Request, Alliance Update Requestを用意した。AMが移動先でRAを受信すると、異なるアクセスルータへ移動したことをAlliance Wait Requestを用いてALへ通知する。ALはAlliance Wait Requestを受信すると、CNへAMの登録解除を行う。AMは、自身のHAへ新しいCoAの登録更新を行った後、ALに対して新しいCoAを伝えるためにAlliance Update Requestを送信する。このAlliance Update Requestを受信したALは、CNにAMの登録を行う。これにより、AMが自身のHAへCoAを登録している間に生じるパケットロスを抑制する。

3.4 経路最適化を行わない場合

Mobile IPv6 SHAKEの特徴は経路最適化にある。しかし、Mobile IPv6 SHAKEを用いても経路最適化を行わないSHAKEが実現可能である。今回はMobile IPv6 SHAKEの経路最適化の有効性を示すために、経路最適化を行わないMobile IPv6 SHAKEの設計、実装も行った。

経路最適化を行わないMobile IPv6 SHAKEでは、トラフィック分配機構をHAに設置する。以下、トラフィック分配機構をHAに設置した場合のAlliance内端末の登録処理および通信手順について述べる。

Alliance 内端末の登録

ALはSHAKEで利用する自分自身のCoAおよびAMのCoAの登録に先立ち、通常のMobile IPv6のBinding UpdateをHAへ送信して、HAへAL自身のCoAを登録し、ALとAM間のメッセージでAMのCoAおよびALのHoA等のSHAKEに必要な情報を交換する(図8①, ②)。

その後、ALはAL自身のCoAを登録するため、Binding UpdateにSフラグを追加し、ALであることを示すPフラグをセットしたBID sub-optionを付加してHAへ送信する(図8③)。次に、Alternate

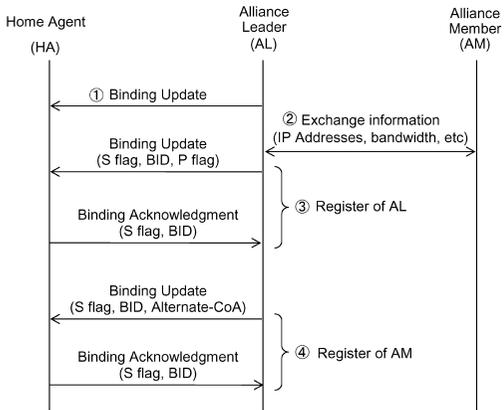


図 8 トラフィック分配機構を HA に設置した場合の Mobile IPv6 SHAKE の登録手順

Fig. 8 Registration procedure of Mobile IPv6 SHAKE (HA).

Care-of Address option を使用して HA へ AM の CoA の登録を行う (図 8 ④)。

HA と Alliance 間の通信

AL が通信相手 CN と通信を行う場合、トンネリングを用い、すべてのパケットを HA を経由させて転送する。HA は AL の HoA 宛に送信されてきた下り通信のパケットを監視する。HA は、CN から送られてきた AL 宛のパケットを受信すると、その AL の HoA に対して登録されている複数の CoA を、HA が保持している Binding Cache から参照し、パケットの送信元アドレスを HA、宛先アドレスを Binding Cache から参照した AL および AM の CoA としてカプセル化し、各経路へパケットを振り分ける。AM は Alliance を構築するときを得られた情報 (図 8 ②) より、HA から送られてきたパケットが SHAKE のパケットであることを確認すると、パケットのカプセルを解除して Alliance 内のリンクを介してパケットを AL へ転送する。

上り通信の場合、AL-HA-CN, AL-AM-HA-CN という複数の経路にパケットが分配される (図 9 ①, ②)。これらの経路制御は多重トンネリングによって実現する。AL から CN へ向かうパケットは、送信元を AL の HoA、宛先を CN として生成された後、HA 経由で配送されるようにするため、送信元を AL の CoA あるいは AM の CoA、宛先を HA としてカプセル化される。さらに AM 経由のパケットは、送信元を AL のリンクローカルアドレス、宛先を AM のリンクローカルアドレスに設定してカプセル化する。AM はそのパケットを受信した後、カプセル解除して HA へ転送する (図 9 ②, ③)。HA は、AL から直接および AM 経

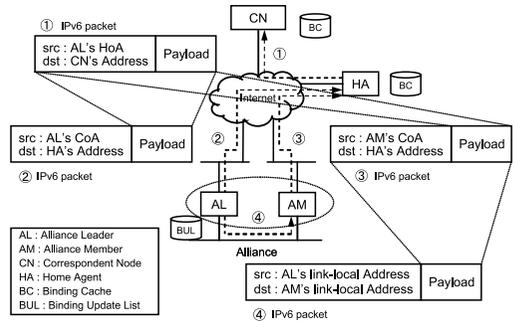
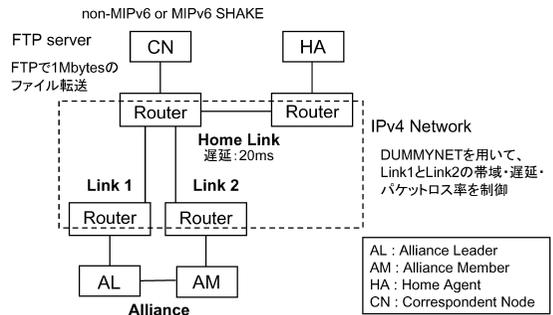


図 9 トラフィック分配機構を HA に設置した場合の Mobile IPv6 SHAKE の通信 (上り)

Fig. 9 Data transmission from AL to CN via HA on Mobile IPv6 SHAKE.



※ Allianceのリンク: 802.11b, その他のリンク: 100BASE-TX

図 10 実験環境

Fig. 10 Experiment network.

由で届けられたパケットのカプセル解除を行い、CN へ転送する (図 9 ④)。

4. 評価

4.1 実験

FreeBSD 4.8-RELEASE¹⁰⁾ 上で KAME Project¹¹⁾ の IPv6 スタックを用いて、経路最適化機能を持つ Mobile IPv6 SHAKE および経路最適化を行わない、すなわち HA でトラフィック分配を行う Mobile IPv6 SHAKE の実装を行った。

これらの実装を用いた実験により、Mobile IPv6 SHAKE の有効性を検証する。

実験環境を図 10 に示す。AL がホームリンクを離れ、図中に示すリンク 1 に移動した後、リンク 2 を介して、AL とは別の AR に接続している AM と SHAKE 利用して CN と通信する状況を構築した。AL-AM 間は 802.11b の無線 LAN で接続し、その他のリンクは Fast Ethernet で接続した。ルータ間で dummynet を用いてリンク 1、リンク 2 の遅延、帯域およびホームリンクの遅延を制限した。dummynet は IPv6 に非対応であるため、各ルータ間を IPv4 ネットワークに設

定し、CN と Alliance 間の通信には 6 to 4 トンネルを用いた。

下の各条件において、FTP サーバ (CN) から 1 Mbytes のデータを転送したときのスループットを 5 回計測し、平均値を求めた。CN から Alliance 内端末への分配率はすべてにおいて 1:1 とした。以下、特に示さない限り、リンク 1, 2 の遅延は 100 ms、パケットロス率は 0% とした。

- (1) トラフィック分配機構を HA に設置した場合と CN に設置した場合

Mobile IPv6 SHAKE の特徴である経路最適化の有用性を検証するため、トラフィック分配機構を HA に設置した場合と CN に設置した場合のスループットを比較する。リンク 1, リンク 2 の遅延は 100 ms、パケットロス率は 0% とし、ホームリンクの遅延を 20 ms に設定した。

- (2) 各経路間の遅延差による影響

リンク 1 のみの遅延を 100 ms から 300 ms まで変化させた。経路 2 本の合計の帯域を持つ経路 1 本を使用した場合と比較し、Mobile IPv6 SHAKE の有効性を検証した。経路 1 本の場合、リンク 1 の遅延を SHAKE 使用時と同様に变化させた値を用いた。

- (3) パケットロス率による影響

リンク 1 のみパケットロス率を 0% から 2% まで変化させ、SHAKE を使用した場合と経路 2 本分と同じ帯域を持つ経路 1 本を用いた場合を比較した。このとき、パケットロス率は、経路 1 本あたりの平均パケットロス率の値が同等になるように設定した。

- (4) 各経路の帯域による影響

リンク 1 の帯域を 384 kbps に固定し、リンク 2 の帯域を 64 kbps から 384 kbps まで変化させた。このとき、経路 2 本分の帯域を持つ経路 1 本を用いた場合のスループットを測定し、比較した。

- (5) 複数のフローを流した場合

Mobile IPv6 SHAKE を用いて複数のフローを流した場合と、SHAKE で利用した同等の帯域を持つ経路 1 本を使用し、複数のフローを流した場合のスループットの比較を行った。

6 to 4 トンネルを用いる図 10 の実験環境では、IPv4 ネットワークのルータにおいて、トンネル処理の負荷がかかるため、6 to 4 トンネルを用いることによる影響を考慮する必要がある。そこで、この影響の大きさを確認するため IPv4 ネットワーク内のルータ間および

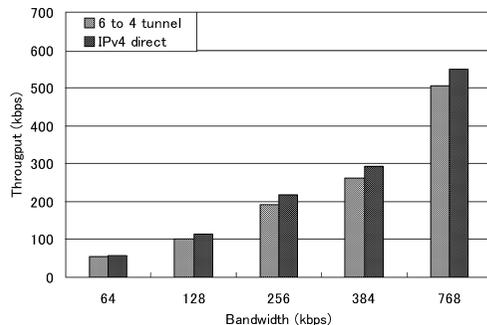


図 11 6 to 4 トンネルと IPv4 で直接通信した場合のスループットの比較

Fig. 11 Throughput of 6 to 4 tunnel and IPv4 network.

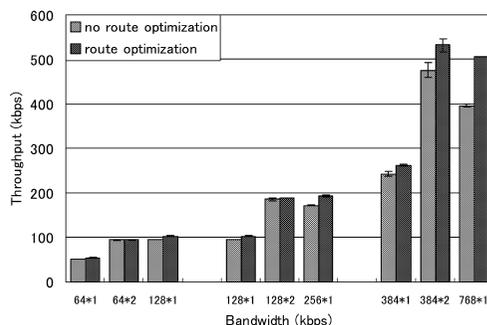


図 12 トラフィック分配機構を HA に設置した場合と CN に設置した場合の比較

Fig. 12 Throughput under route optimization and no route optimization.

6 to 4 トンネルを用いた CN と AL 間の経路 1 本で、FTP で 1 Mbytes のファイル転送を行った場合のスループットを測定した。図 11 に結果を示す。経路が持つ帯域がいずれの場合も、6 to 4 トンネルを用いた場合には、IPv4 ネットワーク内の通信より約 10% スループットが低下している。トンネル処理の負荷によってこの差が生じていると仮定すると、SHAKE の使用により、AL に直接接続したルータにおける 6 to 4 トンネル処理の負荷が半減することになる。

4.2 結果と考察

以下、実験結果を示し、Mobile IPv6 SHAKE の有効性について考察する。なお、図中のエラーバーは 5 つの測定値の標準偏差を示している。

- (1) トラフィック分配機構を HA に設置した場合と CN に設置した場合

結果を図 12 に示す。Alliance 内端末とルータ間の帯域の大きさにかかわらず、トラフィック分配機構を HA に設置した場合より、CN に設置した場合の方が高いスループットが得られている。HA とルータ間の遅延は 20 ms であり、

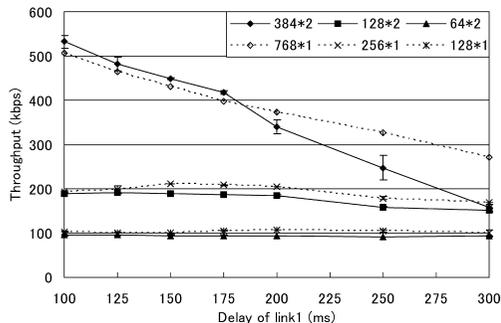


図 13 各経路の遅延差による影響
Fig. 13 Throughput under various link delay.

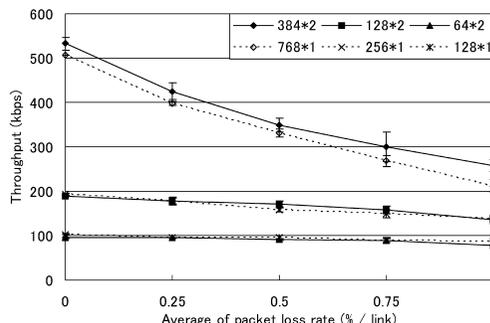


図 14 パケットロス率による影響
Fig. 14 Throughput under various packet loss rate.

経路最適化を行うことで 40 ms の遅延が減少している．この結果としてスループットが向上している．これより，Mobile IPv6 SHAKE における経路最適化の有用性を示すことができた．

(2) 遅延差の影響

図 13 に結果を示す．リンク 1, 2 の帯域が 64, 128 kbps の場合，各経路の遅延差にかかわらず，複数経路の合計の帯域を持つ経路 1 本のスループットと同等の値が得られており，SHAKE の利用による性能低下は見られない．

しかし，リンク 1, 2 の帯域が 384 kbps の場合，各経路の遅延差が 75 ms (リンク 1 の遅延が 175 ms) 以内では，リンク 1 本の帯域である 384 kbps 以上のスループットが得られているものの，遅延差が 75 ms より大きくなると SHAKE を利用した場合と経路 1 本を使用した場合のスループットの差が広がっている．これより，経路間の遅延差が十分に小さいときは，SHAKE の利用による性能低下はないが，遅延差が大きい場合は，SHAKE の利用によって性能が悪化することが確かめられた．

なお，リンク 1, 2 の帯域が 384 kbps の場合，SHAKE を使うことで，リンクの合計帯域が同等の 1 本のリンクを使った場合のスループットが上回っているが，先に述べた 6 to 4 トンネリングの影響であることを考慮すれば，これらは有意な差とは見なせないと考える．

(3) パケットロス率による影響

図 14 に結果を示す．すべてのリンク帯域の場合において，一方のパケットロス率が増加することでスループットが低下している．しかし，この値は経路が 1 本で平均パケットロス率が等しい場合と同等であり，SHAKE の利用による顕著な性能低下は見られなかった．

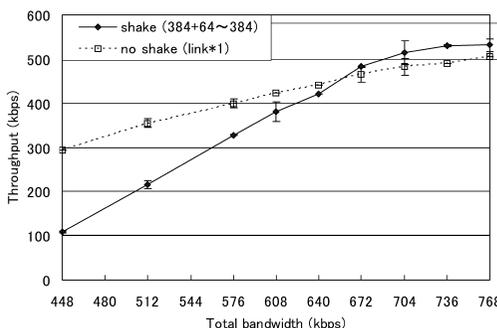


図 15 各経路の帯域による影響
Fig. 15 Throughput under various link bandwidth.

(4) 各経路の帯域による影響

結果を図 15 に示す．各リンクの合計帯域が小さい場合，すなわち 2 本の経路の帯域の差が大きいとき，SHAKE を利用した場合のスループットは経路 1 本を用いた場合のスループットを大きく下回っている．しかし，SHAKE を利用した場合のスループットは遅いリンクの帯域を 2 本用いた場合と同等になっている．これにより，CN での分配率をリンクが持つ帯域比に反映させることで SHAKE の性能の向上が可能であると推測できる．一方，経路の帯域差が小さい場合，具体的には帯域差 96 kbps 以下 (合計帯域 672 kbps 以上) の範囲では，スループットの差は小さい．この結果より，実用上，同質のリンクを使っていれば，リンクの帯域変動が極端に大きくない限り，SHAKE を用いることによる実効帯域の向上効果が得られるといえる．

(5) 複数のフローを流した場合

図 16 に結果を示す．フロー数の増加にともない，全体のスループットが増加している．フローが複数になったとき，SHAKE を利用したときのスループットが経路 1 本用いた場合よりも悪

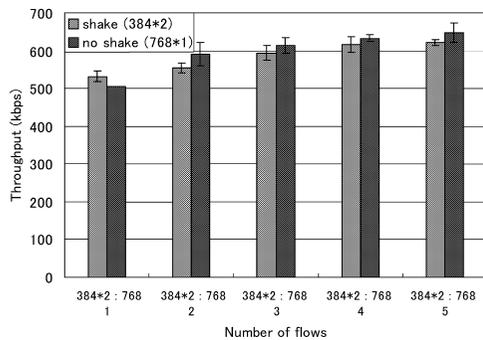


図 16 複数のフローを持つ場合

Fig. 16 Throughput under various link flows.

化している。しかしながら、その差はフロー数が増加しても悪化していない。フロー数の増加による SHAKE 利用時の性能低下は認められなかった。

5. 検 討

5.1 CN に対する透過性

Mobile IPv6 SHAKE の特徴は経路最適化である。これは、トラフィック分配機構を通信相手である CN に設置することで実現している。そのため、CN に SHAKE の機能が搭載されていない場合、経路最適化された SHAKE を利用することができない。しかし、トラフィック分配機構を HA にも設置しておけば、CN が SHAKE に対応していない場合でも、SHAKE を用いることができる。この場合、AL が SHAKE 機能搭載の有無を、Binding Update 送信時に確認する必要がある。CN が Binding Acknowledgment に加えた適切なフラグを用いて SHAKE への対応を示す等の方法によって、AL が SHAKE 用の Binding Update を CN に行うか、HA で行うかを選択可能にできる。

5.2 トラフィック分配

Mobile IPv6 SHAKE の実環境への適応を考えた場合、今回の実験で用いたパケットの分配率 1:1 ではなく、各 Alliance 内端末の持つ帯域の比率や、各経路の遅延、パケットロス率を考慮した分配方式が必要となる。筆者らが先に提案した Mobile IPv4 SHAKE では、MN とトラフィック分配を行う HA 間で遅延測定用のパケットを定期的に流しており、それによってトラフィックの分配方法を決定している。しかしながら、Mobile IPv6 SHAKE ではトラフィック分配を行う CN と Alliance 内ノード間の SHAKE における通信で、CN に経路のモニタリングを行う仕組みを IP 以外の補助プログラムとして導入するのは現実的ではない。

4 章で示した経路の帯域を変化させた実験結果は、経路内で極端な帯域の差がなければ、性能の低下はないことを示している。AL および AM と CN 間の大きな帯域差は、それらのラスト 1 ホップのリンクの種別に起因すると見なすならば、Alliance を管理する AL が各ホストの利用可能帯域等の情報を CN に伝え、それをもとにトラフィックを分配させるような簡便な機構が有用と考える。なお、AL が SHAKE を用いて通信を行っている最中に、AM が自身の外部リンクのみを用いて自身の通信を行うと、AL が利用できる実効帯域が変動することになる。このような動的な実効帯域の変動による各経路間の帯域の差の発生は、AL、AM の両者が SHAKE を使い、相互に AM、AL の関係となることで防止できると考える。

5.3 Alliance 内端末の公平性

Alliance を構築する際、パケットの中継処理を行う AM に対して中継を行う動機付けを与え、さらに Alliance 内端末の信頼性・公平性を保証する仕組みが必要である。これらの課題については文献 12)、13) で検討している。文献 12) では、中継促進機構として Credit Server (CS) を導入している。この CS と HA は相互に信頼関係があると仮定する。CS は AM に対して中継したパケット量に応じて報酬 (クレジット) を与え、転送を依頼した AL に対してその請求を行う。HA、AM はパケットを転送したことを CS に伝えるため、転送報告 (Forward Report) を CS にそれぞれ送信する。CS は、その Forward Report に基づいて報酬の支払い、請求処理を行う。ただし、この中継促進機構を用いる場合、トラフィックの分散を HA で行う必要があるため、最適化された経路で通信を行う場合は使用できない。Mobile IPv6 SHAKE でこの機構を応用する場合、CN が転送報告を CS に送信することが考えられる。しかし、不特定多数のホストが CN になりうるのをこれを CS が信頼可能なホストと仮定することは難しい。今後、最適化された通信経路に適応した中継促進機構の検討が必要である。

6. ま と め

複数の移動端末と協調して一時的なネットワークを構築し、それらの外部インタフェースを同時に利用することでスループットの向上を図る方式 (通信回線共有方式: SHAKE) を IP 層で実現するため Mobile IPv6 を用いた Mobile IPv6 SHAKE を提案し、その基礎部分の実装と評価を行った。Mobile IPv6 の特徴である経路最適化を SHAKE 上で実現するため、Binding Update に SHAKE フラグを追加することに

より、一時的な Alliance を構築している 1 台のリーダー (Alliance Leader : AL) の HoA に対して AL とその支援ノード (Alliance Member : AM) の CoA を複数対応付けて CN に登録することを可能にし、CN でのトラフィック分配を可能とした。また、CN から AM を経由して AL に配送されるパケットに関しては、Type2 経路制御ヘッダに SHAKE フラグを追加し、AL から AM を経由して CN に送信されるパケットには、新たに SHAKE 経路制御ヘッダを定義して、AM でのパケット廃棄を回避し、AL および CN への転送を可能にした。

経路最適化を行う場合と行わない場合の両者の実装に基づいて、ファイル転送のスループットの測定を行ったところ、Mobile IPv6 SHAKE の経路最適化によるスループットの向上が確認できた。さらに、複数経路を用いる Mobile IPv6 SHAKE における各経路の遅延差による影響、パケットロス率による影響、帯域の差、フロー数の差による影響について、実測に基づき評価を行った。この結果、SHAKE 利用時に各経路の遅延の差および帯域の差が大きい場合、SHAKE の性能低下が確認された。しかし、遅延差が 100 ms 程度であれば、性能低下の程度は十分小さかった。また、各経路の帯域の差も、経路の帯域 384 kbps に対して 100 kbps 程度の差では性能への影響は十分少なく、同種のリンクを用いた場合には影響が小さいと考えられる。なお、パケットロス率の差およびフロー数の増大による SHAKE 利用時の性能低下は見られなかった。

今回の実験では、CN において、複数経路へ 1:1 でパケットを分配していた。今後は各経路の帯域や遅延に基づいた CN でのトラフィック分配といった分配方式の工夫、ならびに実環境での評価が必要である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究 (A) (16680002) によるものである。ここに記して謝意を示す。

参 考 文 献

- Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, RFC 3775 (2004).
- Koyama, K., Ito, Y., Ishihara, S. and Mineno, H.: Performance evaluation of TCP on Mobile IP SHAKE, *IPSSJ Journal*, Vol.45, No.10, pp.2270-2278 (2004).
- Hsieh, H.-Y., Kim, K.-H. and Sivakumar, R.: An End-to-End Approach for Transparent Mobility across Heterogeneous Wireless Networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol.9, pp.363-378 (2004).
- Wakikawa, R., Uehara, K. and Murai, J.: Multiple Network Interfaces Support by Policy-Based Routing on Mobile IPv6, *Proc. 2002 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2002)*, pp.391-403 (2002).
- Devarapalli, V., Wakikawa, R. and Petrescu, A.: Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol, RFC 3963 (2005).
- Ernst, T. and Charbon, J.: Multihoming with NEMO Basic Support, *Proc. 1st International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)* (2004).
- Montavont, N., Ernst, T. and Noel, T.: Multihoming in Nested Mobile Networking, *2004 Symposium on Applications and the Internet-Workshops (SAINT 2004 Workshops)* (2004).
- Wakikawa, R., Uehara, K., Ernst, T. and Nagami, K.: Multiple Care-of Addresses Registration, Internet-Drafts (draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-03) (2004).
- 大木一将, 舛田知広, 峰野博史, 石原 進: Mobile IPv6 を利用した通信回線共有方式のモビリティ機構の実装, 情報処理学会研究報告 (2004-MBL-29), Vol.2004, No.44, pp.165-170 (2004).
- FreeBSD. <http://www.freebsd.org/>
- KAME Project. <http://www.kame.net/>
- 伊藤陽介, 峰野博史, 石原 進: 経路アグリゲーションを行う移動端末間の中継促進機構, DICO2004 シンポジウム論文集, Vol.2004, No.7, pp.687-690 (2004).
- Ito, Y., Mineno, H. and Ishihara, S.: A scheme encouraging mobile nodes to forward packets via multiple wireless links aggregating system between the Internet and mobile ad hoc networks, *8th International Conference on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2004)* (2004).

(平成 17 年 1 月 31 日受付)

(平成 17 年 7 月 4 日採録)



舛田 知広 (学生会員)

2004 年静岡大学工学部システム工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科システム工学専攻博士前期課程に在学中。無線環境における TCP/IP 技術に興味を持つ。



大木 一将

2003年富山県立大学工学部電子情報工学科卒業。2005年静岡大学大学院理工学研究科システム工学専攻博士前期課程修了。同年エヌ・ティ・ティ・システム開発(株)入社。



峰野 博史(正会員)

1997年静岡大学工学部情報知識工学科卒業。1999年同大学大学院理工学研究科計算機工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTTサービスインテグレーション基盤研究所配属。2002年10月より静岡大学情報学部助手。モバイルコンピューティング、ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



石原 進(正会員)

1994年名古屋大学工学部電気学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1998年日本学術振興会特別研究員。1999年静岡大学情報学部助手。2001年より同大学工学部助教授。博士(工学)。1997年電気通信普及財団テレコムシステム技術学生賞受賞。モバイルコンピューティング、無線環境用TCP/IP、アドホックネットワークに関する研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。