

IPv4 拡張した移動透過アーキテクチャ MAT の設計と実装

関 顕 生^{†1} 岩 田 裕 貴^{†2} 森 廣 勇 人^{†2}
前 田 香 織^{†2} 岸 場 清 悟^{†3} 相 原 玲 二^{†3}

著者らが提案している、IP 層での移動透過通信アーキテクチャMAT は IPv6 での利用を想定して具体的なプロトコルを設計し、実装を行ってきたが、ISP が提供するサービスは現在でも IPv4 が中心である。そこで MAT を IPv4 にも対応するよう拡張し、具体的なプロトコルの設計を行った。本稿では、MAT の IPv4 への拡張点について述べ、移動ノードの通信開始動作とハンドオーバー動作、IPv4 でのシグナリング手順などについて述べる。また、MAT for Linux の IPv4 実装状況について報告する。

Design and Implementation of IP Mobility Architecture MAT extended to IPv4

AKIO SEKI,^{†1} YUKI IWATA,^{†2} HAYATO MORIHIRO,^{†2}
KAORI MAEDA,^{†2} SEIGO KISHIBA^{†3} and REIJI AIBARA^{†3}

In this paper, we describe our proposed IP mobility architecture, MAT extended to IPv4. Since most of network services are provided via IPv4 protocol by ISPs, we designed MAT that suit for IPv4 network. At first, we describe the protocol extensions of MAT. Secondary, we explain how signalling messages are exchanged among MAT nodes and IMS. Finally, we report about the IPv4 implementation situation of MAT for Linux.

1. はじめに

近年、移動端末の普及や無線ネットワーク環境の整備により、いつでもどこからでもインターネットへの接続が可能になりつつある。このような状況下では、通信中にユーザが移動しても、通信を継続できることが求められる。インターネットでは、IP アドレスがノードの識別子としての役割だけでなく、IP アドレスのネットワーク部分が間接的に位置情報も示しているため端末が別のネットワークへ移動すると、異なる IP アドレスが割り振られる。トランスポート層では IP アドレスが通信識別子の一部に用いられているため、IP アドレスの変更により別の通信とみなされ通信を維持することができない。このような背景から、IP 層における移動透過通信アーキテクチャの研究が行われている。IPv4 で移動透過通信を実現する技術として、Mobile IP¹⁾、Mobile PPC²⁾、IPv6 では Mobile IPv6³⁾、LIN6⁴⁾、MAT⁵⁾ などが提案されている。

筆者らは IPv6 ネットワークでの利用を想定して MAT を提案し、実装を行ってきた。しかし、IPv6 ネットワークは着実に普及しつつあるものの、ISP が提供する無線系サービスは今でも IPv4 が中心である。そのため、現状のネットワーク環境でも移動透過通信を行うことのできる技術が必要となる。また、IPv4 から IPv6 へのネットワーク移行期間中には、両方のプロトコルにて移動透過通信が可能であることが強く望まれる。そこで、MAT を IPv4 ネットワークにも対応できるように拡張し、具体的なプロトコルの設計を行った。

本稿では、まず 2 で関連研究の紹介を行い、3 で MAT(IPv4) の構成とプロトコルの設計について述べ、4 で MAT ノードの制御方法について述べる。5 章で MAT(IPv4) の Linux 実装の状況について述べ、6 章でまとめと今後について述べる。

2. 関連研究

移動透過通信とはノードがネットワーク間を移動しても通信の途絶なく継続して通信できることを言う。移動透過通信の研究は先述した通り、様々な方式が提案・実装されており、それらはプロキシ方式とエンドツーエンド方式に大別することができる。ここではプロキシ

†1 広島大学大学院総合科学研究科
Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University
†2 広島市立大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University
†3 広島大学情報メディア教育研究センター
Information Media Center, Hiroshima University

方式の例として Mobile IP を、エンドツーエンド方式の例として MAT を取り上げる。

2.1 Mobile IP

Mobile IP は IETF における議論を経て標準化された IPv4 用の通信技術である。移動ノード (MN:Mobile Node) はノード識別子としてホームアドレス (HoA:Home Address) と、位置識別子として移動先のネットワークから割り当てられる気付アドレス (CoA:Care-of Address) の 2 つの IP アドレスを利用する。ホームエージェント (HA) は、HoA と CoA の対応付け (バインディング) を行い、CoA を持つ MN へ転送する役割を持つ。

MN は異なるネットワークへ移動した時、移動先のネットワークで新しい CoA を HA に登録し、HA は MN のバインディングを更新する。通信相手ノード (CN:Correspondent Node) から MN へパケットを送信する場合は、宛先アドレスを HoA とし HA へ送信する。CN からのパケットを代理受信した HA は、パケットを MN の CoA でカプセル化して MN へ転送する。一方、MN から CN へのパケットは送信元アドレスを HoA とし、HA を経由せずに直接送信される。

Mobile IP は、HA というプロキシサーバを導入し、CN が常に HA と通信しているように見せかけることにより移動透過性を獲得している。MN 宛のパケットは必ず HA を経由するため、通信経路が冗長な三角経路となるほか、HA-MN 間は IP トンネルとなる。また、MN から CN へのパケットは送信元アドレスに HoA を使用しており、位置識別子として MN のネットワーク上の位置を正しく表していない。そのため、経路上のルータやセキュリティ対策機器等により、送信元アドレスを偽装した不正パケットと見なされ破棄される可能性がある。

2.2 MAT

MAT は筆者らが提案し実装を行ってきたエンドツーエンド方式による移動透過通信アーキテクチャである。MAT は IP アドレスを持つノード識別子とネットワーク上の位置識別子の性質を 2 つのアドレスに分離し、前者をホームアドレス (HoA:Home Address)、後者をモバイルアドレス (MoA:Mobile Address) とする。複数のネットワークを移動する MN と CN はアプリケーションレベルでは HoA を用いて通信し、ノード間の通信には MoA を使用する。HoA と MoA の対応関係をマッピング情報と呼び、IMS(IP address Mapping Server) で管理している。IMS は各ノードの要求に応じてマッピング情報を提供するため、負荷分散と耐障害性の観点から冗長な構成を採ることが可能となっている。MN と CN は、マッピング情報をノード内の IP address Mapping Table(IMT) と呼ばれるテーブルで保持し、IP 層内でアドレス変換することにより移動透過通信を実現する。各ノードの IP 層でア

ドレス変換することにより、アプリケーションに対して移動に伴う IP アドレスの変更を隠蔽できるため、継続的な通信が可能となる。

MAT ではエンドツーエンドで移動透過通信を実現するためノード間の通信は常に最適経路で行われ、IP トンネルを使用しないためトンネルオーバーヘッドが存在しない。一方、MAT で移動透過通信を行うには MN と CN ともに MAT に対応している必要がある。MAT で使用する DNS は、各ノードのマッピング情報を管理する IMS の IP アドレスを提供できるように通常の DNS から拡張が行われている。ただし、この拡張は MN や CN の HoA に属するゾーンを委譲されたサーバのみに施されていなければならない。

MAT は IPv6 での研究が先行しており、実装も IPv6 を対象に行ってきた。しかし、現在 IPv6 ネットワークも普及しつつあるが、依然としてインターネットにおける通信は IPv4 が主流であり、IPv4 と IPv6 の併用期間は長く続くと思われる。そのため、MAT を IPv4 に拡張する必要がある。MAT の概念そのものは IPv4 に適用することが可能であるが、問題点も存在する。MAT(IPv6) では制御メッセージの一部に IPv6 拡張ヘッダを使用している。IPv4 にも IP オプションが定義されているが、実際のネットワーク環境ではセキュリティ対策により、未定義 IP オプションの付いたパケットは破棄する設定となっている場合が多い。そのため、IP オプションを使用しない制御機構を設計する必要があると判断した。

3. MAT(IPv4)

3.1 MAT(IPv4) の構成

図 1 に MAT(IPv4) の構成を示す。以降の説明では MAT の実装を区別するため、既存の MAT を MAT(IPv6)、IPv4 対応の MAT を MAT(IPv4) と記し、特に明記しない限り CN は MAT(IPv4) 対応ノードを意味する。MAT(IPv4) は MAT(IPv6) と同様に、アプリケーションでの通信にはノード識別子である HoA を使用し、MN-CN 間の通信に位置識別子である MoA を用いて通信する。MN は MAT の実装を持たないノードとも通信することが可能であるが、その場合移動透過通信を行うことはできない。MAT(IPv4) においても、マッピング情報の管理に IMS を使用する。図 1 中の IMS_{MN} は MN 用の IMS を、 IMS_{CN} は CN の IMS を表す。実装上はこれらを 1 台の IMS で運用することが可能であるが、IMS を分散設置することも考慮し、プロトコルとしてはそれぞれを区別して設計した。

MAT(IPv4) と MAT(IPv6) は、互いに独立した IP 層プロトコルであり、同一ノードにデュアルスタック構成で実現することが可能である。移動透過通信もそれぞれ独立に動作することとし、現時点では IPv4 と IPv6 間でのハンドオーバーは想定していない。

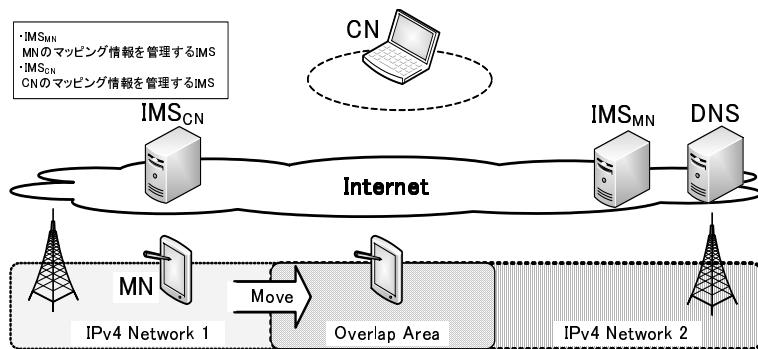


図 1 MAT(IPv4) の構成

3.2 プロトコルの設計

MAT(IPv6) では、ハンドオーバー時に自分のモバイルアドレス（マッピング情報）が変化したことを CN に伝えるために、IPv6 拡張ヘッダ (MUO: Mapping Update Option) を定義して利用している。IPv4 にも IP オプションは利用可能であるが、IPv4 環境における未定義 IP オプションの付いたパケットは、セキュリティ対策等によりネットワーク経路上で破棄されることがしばしばあるため、使えない場合が多い。そこで MUO の代わりに、MAT 対応ノード (MN,CN)-IMS 間や IMS-IMS 間のシグナリングメッセージを追加することで、MAT(IPv6) と同等の機能を実現する。

シグナリングメッセージの内部で使用する IPv4 アドレスは、IPv4 射影アドレスを用いる。これは、MAT(IPv6) のシグナリングメッセージとの互換性を意識しているためであり、IMS の IPv4/IPv6 デュアルスタック化に貢献している。

4. MAT ノードの制御

4.1 MAT(IPv4) のシグナリング

MAT(IPv4) のシグナリングメッセージは、アドレス変換処理に必要なマッピング情報を MN-IMS-CN 間で相互に更新・通知・参照するために用いるものである。メッセージは要求メッセージと応答メッセージの 1 組で機能する。

MAT(IPv4) では、次の 4 メッセージを新しく追加した。

- HA 通知 (HA Notify)

MN が IMS_{CN} へ MN の HoA を通知する。

- HA 通知応答 (HA Notify Ack)

HA 通知の応答を IMS_{CN} が MN へ通知する。

- HA 問合せ (HA Query)

MAT 対応ノードが自身を管理する IMS へ通信相手の MoA をキーにして HoA を問い合わせる。

- HA 応答 (HA Answer)

HA 問合せの回答を IMS が MAT 対応ノードへ通知する。

また、次の 2 メッセージは MAT(IPv6) において (MN,CN)-IMS 間で使用しているが、MAT(IPv4) ではさらに IMS-IMS 間でも使用する。

- MA 問合せ (MA Query)

MAT 対応ノードが通信相手の HoA をキーにして、IMS に MoA または Mobile Prefix(MoPre) を問い合わせる。また MAT(IPV4) では、 IMS_{CN} が MN の HoA をキーにして IMS_{MN} に MoA を問い合わせる。

- MA 応答 (MA Answer)

IMS が MA 問合せの回答を、MAT 対応ノードあるいは要求のあった IMS へ通知する。次の 2 メッセージは MAT(IPv6) と MAT(IPv4) の両方で使用する。

- IMS 更新要求 (IMS Update)

MAT 対応ノードが自身のマッピング情報の更新を自身を管理する IMS に要求する。

- IMS 更新通知 (IMS Update Reply)

IMS 更新の成否を IMS が MAT 対応ノードへ通知する。

MAT(IPv4) では、MAT(IPv6) の MUO の代替措置として、HA Notify と HA Query を用いることで (1) マッピング情報の変更通知と (2) その時点での有効なマッピング情報の取得を確保している。

4.2 通信開始手順

図 2 の (1) から (7) に MAT(IPv4) の通信開始手順を示す。図 2 の実線はシグナリングメッセージの流れを、破線はユーザデータの流れを示している。ただし、DNS との通信は省略している。MAT(IPv6) と同様に、MN は CN との通信開始時に、 IMS_{CN} の IP アドレスを取得する。(1) MN は IMS_{CN} に MA Query を送り、その応答により CN のマッピング情報を取得する。(2) 次に MAT(IPv6) の MUO に相当する HA Notify を IMS_{CN} に送信する。このメッセージを受信した IMS_{CN} は IMS_{MN} の IP アドレスを DNS により取得し、(3) IMS_{MN} に MA Query を送り、その応答により MN のマッピング情報を取得す

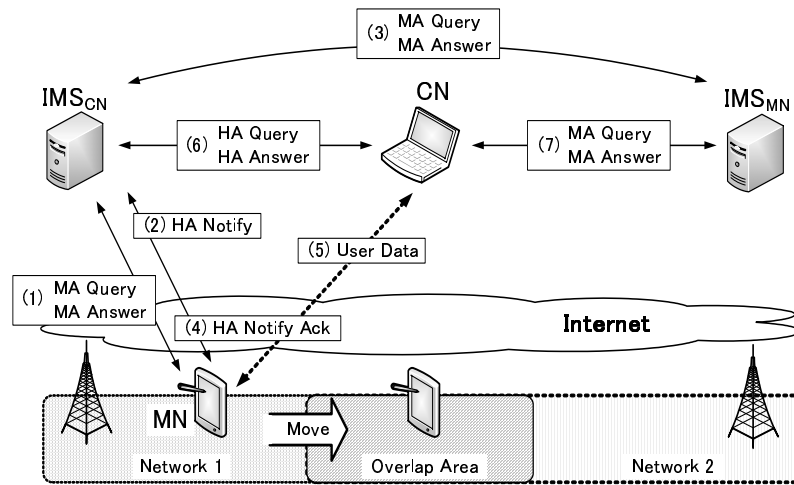


図 2 MAT(IPv4) の通信開始手順

る。(4) MN は、 IMS_{CN} からの HA Notify Ack によって通信準備完了を確認し、(5) CN との通信を開始する。MAT(IPv4) では (1) から (4) のステップを踏むことで、 IMS_{CN} 上に MN のマッピング情報が存在することを保証している。なお、 IMS_{MN} と IMS_{CN} が同一ホストである場合は、(3) のシグナリングが省略される。

CN が MN から初めて通信パケットを受信した時、MN のマッピング情報が自身の IMT に存在しないためアドレス変換を行うことができない。そのため、(6) CN は自身の IMT に存在しない MoA を送信元とする通信パケットを受信した場合、その MoA をキーに IMS_{CN} へ HA Query を送り、その応答で対応する HoA を取得する。(4) の時点で IMS_{CN} 上には MN のマッピング情報が存在しているので、CN に MN の HoA を提供することが可能となっている。MN の HoA を取得した CN は、 IMS_{MN} の IP アドレスを DNS により取得し、(7) IMS_{MN} に MA Query を送り、その応答で MN のマッピング情報を取得する。CN は (6) の時点で MN のアドレス変換に必要なマッピング情報を揃えることができるが、MAT(IPv6) と同様に、MN 自身によってマッピング情報が更新された IMS を信用する。以降、通信中の MN と CN は、通信相手の IMS に定期的に MA Query を行い、互いに最新のマッピング情報の取得を行う。

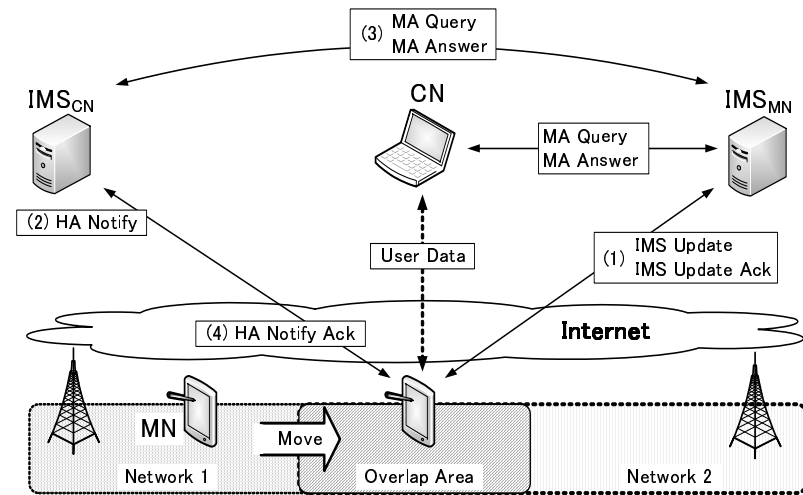


図 3 MAT(IPv4) のハンドオーバー手順

4.3 ハンドオーバー手順

図 3 に MAT(IPv4) のハンドオーバー手順を示す。図 3 の実線はシグナリングメッセージの流れを、破線はユーザデータの流れを示している。MAT(IPv4) は、MAT(IPv6) と同様に複数インターフェースの使用を推奨している。MN が移動先である Network 2 に対しても接続ができるようになり、通信に使用していないインターフェースに DHCP⁶⁾ によって MoA が割り当てられると、(1) IMS_{MN} に IMS Update を送りマッピング情報を更新する。その応答が返ってくると MN は自身の IMT に新しいマッピング情報を設定し、(2) HA Notify を IMS_{CN} へ送り、自身のマッピング情報が更新されたことを通知する。この通知を受信した IMS_{CN} は、(3) IMS_{MN} へ MA Query を送信し、その応答により MN のマッピング情報を取得し、 IMS_{CN} 上にある MN のマッピング情報を更新する。(4) IMS_{CN} は、MN に通知完了確認となる HA Notify Ack を送る。なお、 IMS_{MN} と IMS_{CN} が同一ホストである場合は、(3) のシグナリングが省略される。

CN は IMS_{MN} への定期的な MA Query で、(1) の後の MN の最新の MoA を取得し自身の IMT に登録する。MN が Network 2 に接続したインターフェースを用いて通信すると判断して、通信を切り替えても、CN の IMT には Network 2 上の MN の MoA が登録されているため、即座にハンドオーバーを完了することができる。

しかし、CN が最新のマッピング情報を受け取る前に、MN が Network 2 の MoA を用いて通信してきた場合は、すぐにアドレス変換を行うことはできない。この場合は、図 2 の (6) と (7) の手順が発生することになる。このような状況は、MN が移動するネットワーク間に十分なオーバーラップエリアが存在しない時に起こりうる。

また、MN がシングルインターフェースでハンドオーバーを行う時は、少なくとも MN が Network 1 から切断し、Network 2 において (4) の HA Notify Ack を完了するまでの間、CN と通信不能な時間が発生する。

5. MAT(IPv4) の実装状況

5.1 IMS

IMS は、HoA と MoA の対応関係であるマッピング情報を提供する。MAT(IPv4) に対応するために、従来の IMS を拡張し、MAT(IPv4) ノードと IMS 間のシグナリングサポートを追加した。拡張点は、以下の 3 点である。

- (1) IPv4 と IPv6 の両プロトコル対応
- (2) HA 通知と HA 通知応答処理
- (3) HA 問合せと HA 応答処理

筆者らは、IPv4 と IPv6 において一斉ハンドオーバーによる IMS の性能評価⁷⁾を行っており、上記 3 つの拡張点が機能していることを確認している。現在、IMS は IPv4/IPv6 の両プロトコルにてサービスを提供している*1。表 1 に、ハードウェアと OS の諸元を示す。

表 1 IMS の諸元

| Node | Hardware | CPU | RAM | OS |
|------------|----------------------|--------------------------|-----|--|
| IMS1, IMS2 | Dell Optiplex 160 | Intel Atom 230 1.6GHz | 1GB | CentOS 5.4 i386 linux-2.6.18-164.11.1.el5 |

5.2 モバイルノード

MAT(IPv4) を Linux ホストに実装し、動作確認を行っている。本稿の執筆時において、MN の DHCP クライアント機能は未実装であるため、ハンドオーバーの検証は行えていないものの、ping コマンドにより MN が CN の HoA と通信を行えることが確認できている。MN-IMS 間のシグナリング動作と、MN-CN 間の通信を検証するために、図 4 に示す構成

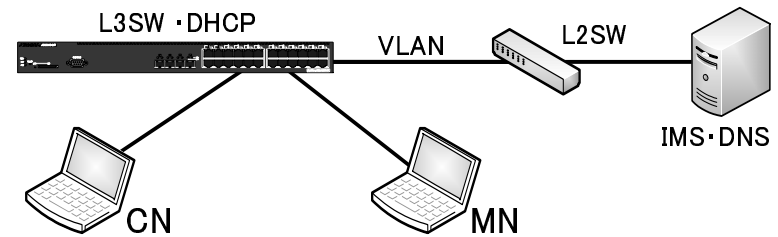


図 4 動作検証におけるネットワーク構成

表 2 各ノードの諸元

| Node | Hardware | CPU | RAM | OS |
|---------|-----------------------|------------------------------|-----|--|
| MN, CN | HP Mini 5101 | Intel Atom N280 1.66GHz | 2GB | Debian GNU/Linux 5.03 i386 linux-2.6.27.24 with MAT |
| IMS・DNS | HP Compaq 6005 Pro | AMD Athlon II X2 B24 3GHz | 4GB | CentOS 5.4 i386 on VMware Server 2.0.2 |

表 3 各ネットワーク機器の諸元

| Switch | Vendor | Model |
|-----------|----------------|------------------|
| L3SW・DHCP | AlaxalA | AX3630S-24T |
| L2SW | Allied Telesis | CentreCOM GS916S |

で動作検証を行った。各ホストとネットワーク機器の諸元を表 2 と表 3 に示す。リンク速度は全て 1Gbps である。IMS_{MN}-IMS_{CN} 間のシグナリングは動作確認がとれているため、図中の IMS は IMS_{MN} と IMS_{CN} を 1 台で兼用している。

ping コマンドにより、MAT 有り・無しの場合において MN-CN 間の RTT(Round Trip Time) を計測し、MAT の処理による遅延時間を測定した。使用したオプションは、[-s 36 -f -c 100000] であり、ペイロードサイズ 36 バイトの ICMP パケット (全長 64 バイトの IP パケット) を 10 万個フラッディングさせることにより、RTT の最小・平均・最大値を求めた。表 4 に測定値を示す。

表 4 MN-CN 間の RTT 測定

| RTT [msec] | min | avg | max |
|------------|-------|-------|-------|
| MAT 無し | 0.265 | 0.412 | 0.477 |
| MAT 有り | 0.382 | 0.464 | 0.644 |

*1 <http://www.mat6.org/>

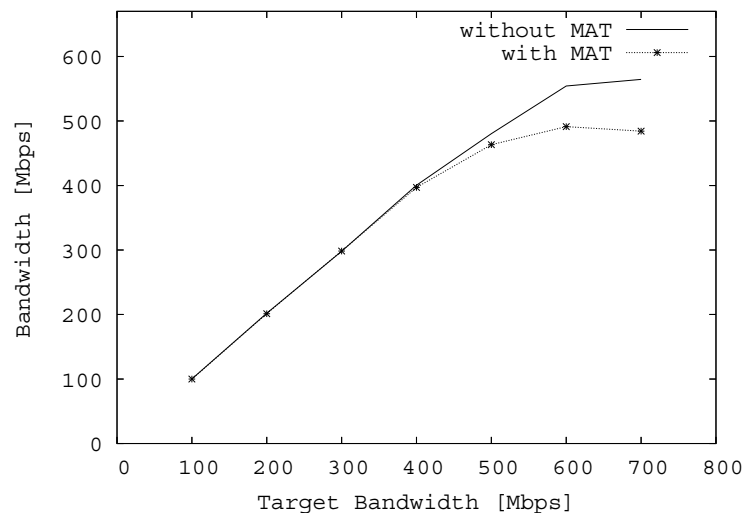


図5 MN-CN間の帯域測定

MAT 有りの場合、平均値を見ると 0.052 ミリ秒のわずかな増加となっている。

また、iperf^{*1}により、MAT 有り・無しの場合において 1470 バイトの UDP データグラムを用いて帯域測定を行った。使用したコマンドのオプションは、サーバ側 [-s -u]、クライアント側 [-c ServerAddress -u -t 10 -b TargetBandwidth] である。1 回の測定時間を 10 秒とし、10 回の計測による平均値を求めた。測定結果を図 5 に示す。

MAT 有りの場合、400Mbps までは MAT 無しと同程度の帯域を実現している。また、予備実験により使用したハードウェアでは 560Mbps 程度が性能限界であることが分かっており、MAT 有りの高負荷時の帯域低下は、iperf の処理負荷が MAT のアドレス変換処理に影響を与えているものと思われる。

6. おわりに

本稿では、MAT を IPv4 ネットワークで使用できるように具体的にプロトコルの設計を行い、実際に MAT(IPv4) を Linux に実装した。また、MAT for Linux の動作状況につい

て述べ、基本動作の性能評価を行った。克服すべき技術的な問題点は幾つも残っているが、設計したプロトコルの一つ一つは動作の確認が取れているため、実用化への可能性を示すことができた。今後は、実装を進めているモバイルノードの完成度を高め、ネットワークのハンドオーバの性能評価を行っていく予定である。

謝辞

本研究に関して、日頃より MAT に関する議論にご参加いただいている広島大学情報メディア教育研究センター関係者各位、広島市立大学インターネット工学研究室の各位に感謝します。また、MAT の技術面から多岐にわたりご援助いただきました、株式会社ディアイティ、ネットワンシステムズの関係各位に心より感謝いたします。なお、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 (20300029) および、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE-地域 ICT, 082308001) の支援を受けて実施しています。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Perkins, C. and Ed.: IP Mobility Support for IPv4, RFC 3344, IETF (2002).
- 2) 竹内元規, 鈴木秀和, 渡邊 晃: エンドエンドで移動透過性を実現する Mobile PPC の提案と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.12, pp.3244-3257 (2006).
- 3) Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, RFC 3775, IETF (2004).
- 4) Ishiyama, M., Kunishi, M., Uehara, K., Esaki, H. and Teraoka, F.: LINA: A New Approach to Mobility Support in Wide Area Networks, *IEICE Transaction on Communication*, Vol.E84-B, No.8, pp.2076-2086 (2001).
- 5) 相原玲二, 藤田貴大, 前田香織, 野村嘉洋: アドレス変換方式による移動透過性インターネットアーキテクチャ, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.12, pp.3889-3897 (2002).
- 6) Droms, R.: Dynamic Host Configuration Protocol, RFC 2131, IETF (1997).
- 7) 岩田裕貴, 森廣勇人, 関 顕生, 前田香織, 井上博之, 相原玲二, 岸場清悟: 移動透過アーキテクチャMAT の IPv4 対応とその性能評価, 電子情報通信学会技術研究報. IA, インターネットアーキテクチャ, Vol.109, No.299, pp.7-12 (2009).

*1 <http://sourceforge.net/projects/iperf/> 使用したバージョン: 2.0.4