

推薦論文

Hierarchical Mobile IPv6 with Buffering Extension の通信品質評価

高橋 秀明[†] 小林 亮一[†]
岡島 一郎^{††} 梅田 成視^{††}

Mobile IPv6 がハンドオフにともなう処理中に発生させるバースト的なパケットロス、リアルタイム通信、および非リアルタイム通信の品質をともに劣化させる。我々は、ハンドオフ中の通信品質劣化を抑えるため、Mobile IPv6 の拡張方式である Hierarchical Mobile IPv6 の Mobility Anchor Point に、パケットバッファリング機能を追加した方式を提案する。本論文は、提案方式の有効性を示すために、提案方式、および Mobile IPv6 等の既存方式のパケット通信品質を理論的、および実験的に求め、パケット通信品質の要求条件と比較した。その結果、提案方式は、理論的、および実験的検討ともに要求条件を満たすことを示した。

Transmission Quality Evaluation of Hierarchical Mobile IPv6 with Buffering Extension

HIDEAKI TAKAHASHI,[†] RYOICHI KOBAYASHI,[†] ICHIRO OKAJIMA^{††}
and NARUMI UMEDA^{††}

Mobile IPv6 cannot achieve seamless handoff for both real time and non real time communications, since bursty packet loss during handoff degrades their transmission quality. In order to prevent completely bursty packet loss during handoff, we proposed an extended version of Hierarchical Mobile IPv6. It enables Mobility Anchor Point to buffer packets destined to a Mobile Node. In this paper, we present the packet transmission quality of HMIP-Bv6 through theoretical and experimental evaluations. The results elucidate that our proposal is more than enough to enable seamless handoff for both real time and non real time communications.

1. はじめに

将来の移動通信システムとして、セルラ方式無線伝送技術とインターネット技術を融合した、IP ベース移動通信システムが提案されている¹⁾。IP ベース移動通信システムを実現するための主要な要素技術として IP Mobility Management がある。IP Mobility Management は、多様な移動端末 (MN: Mobile Node) が MN に IP ベース移動通信システムへの接続点となるアクセスリンクを提供する Access Router (AR) を切り替えながら (ハンドオフ) 移動する際に、end-to-end のパケットの到達性を実現する技術であ

る。IP Mobility Management が満たすべき要求条件を以下に述べる。

- (1) 多様な MN のモビリティ
MN は、IP ベース移動通信システム上をハンドオフしながら移動しつつも、通信の開始、および継続ができなければならない。
- (2) 高いパケット通信品質
リアルタイムアプリケーションや、非リアルタイムアプリケーション等の多様なアプリケーションが提供するサービスを実現するため、パケットロス、パケット伝送遅延、および伝送遅延変動の少ないパケット通信品質を実現しなければならない。

[†] 株式会社 NTT ドコモ IP 無線ネットワーク開発部
IP Radio Network Development Department, NTT DoCoMo, Inc.

^{††} 株式会社 NTT ドコモワイヤレス研究所
Wireless Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.

本論文の内容は平成 15 年 6 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICO2003) シンポジウムにて報告され、DICO2003 プログラム委員会により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

(3) 導入容易性

IP ベース移動通信システムを迅速に、かつ低コストで実現するために、IP Mobility Management の機能は容易に導入できなければならない。

本論文は、上記要求条件をすべて満足する IP Mobility Management を提案し、パケット通信品質に関して理論的、および実験的方法により、要求条件を満足するかを評価した結果を示す。

本論文の構成は、まず 2 章で現在までに提案されている IP Mobility Management の概要、およびそれらの問題点を示し、3 章で問題点を解決するための提案方式の概要を説明する。次に、4 章で提案方式と既存方式のパケット通信品質を定量的に評価し、最後に 5 章で、本論文で行ったパケット通信品質評価についてまとめる。

2. 関連研究

2.1 Mobile IPv6

ietf で標準化が進められている Mobile IPv6 (MIPv6)²⁾ は、前章であげた要求条件のうち、モビリティ、および導入容易性を満足する IP Mobility Management である。しかし、MIPv6 は、以下のハンドオフ、およびそれともなう処理の遅延により、パケットを送受信できない瞬間時間が長くなり、ハンドオフ中にパースト的なパケットロスが発生する。

- リンク層ハンドオフ処理
- Movement Detection (移動検出処理)
- Binding Process (Binding 更新処理)

リンク層ハンドオフ処理は、無線 LAN の Access Point (AP) 切替えのように、接続するデータリンクを切り替える処理である。たとえば、IEEE 802.11b で AP を切り替えるのに要する時間は、50 [msec] ほどである。移動検出処理は、MN がパケットを送信するときの次ホップの転送先となる Default Router を、接続するリンク上から検出する処理である。移動検出処理は、最大で 500 [msec] かかる⁷⁾。Binding 更新処理は、Home Agent (HA) が保持する MN の Binding Cache Entry を更新する処理である。更新処理は、MN が HA に Binding Update (BU) を送信し、HA から Binding Acknowledgement (BA) を受信して完了する。よって、更新処理時間は、MN と HA の間の Round Trip Time (RTT) に依存する。

よって MIPv6 は、セルラ通信のように AR 間を頻りに移動する環境では、高いパケット通信品質を実現できない。MN がハンドオフ中に行う処理のうち、移

動検出処理、および Binding 更新処理⁸⁾が、MIPv6 に起因する処理である。これらの MIPv6 のハンドオフにともなう処理遅延を短縮することが、パケット通信品質面における MIPv6 の課題である。

2.2 Hierarchical Mobile IPv6

Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6)³⁾ は、Binding 更新処理時間を低減するため、MN 近傍に位置し、MN の局所的な移動を HA から隠蔽する Mobility Anchor Point (MAP) を新たに定義している。MN は、同一の MAP に対応付けられた AR 間をハンドオフする場合、HA よりも近い MAP のみと Binding 更新処理を行い、HA と Binding 更新処理を行わない。たとえば、HA が、MN ~ HA 間 RTT がインターネット平均 RTT の 100 [msec]⁵⁾ となる場所に位置し、MAP が、MN ~ MAP 間 RTT がプロバイダの IP ネットワークの平均 RTT の 20 [msec]⁶⁾ となる場所に位置するならば、HMIPv6 は、MIPv6 と比較して Binding 更新処理時間を 80 [msec] 短縮できる。しかし、移動検出処理時間が MIPv6 と同じ最大 500 [msec] であるため、依然として多くのパーストパケットロスが発生する問題が残る。しかし、MAP を MN が移動する可能性のある IP ネットワークに離散的に配置するだけでよいと、HMIPv6 の導入容易性は高い。

2.3 Fast Handovers for Mobile IPv6

Fast Handovers for Mobile IPv6 (FMIPv6)⁴⁾ は、移動検出処理時間を短縮するために、ハンドオフ後に接続する AR (New AR) を、ハンドオフ前に検出する。これにより、最大 500 [msec] かかる移動検出処理時間を削減することができる。さらに、HA との Binding 更新処理が完了するまでの間、ハンドオフ前に接続していた AR (Previous AR) と New AR の間で MN 宛パケットを転送することで、Binding 更新処理中のパケットロスを防いでいる。しかし、FMIPv6 は、IP ベース移動通信システム上の全 AR に機能追加を必要とするため、導入規模は大きくなる。よって FMIPv6 は、容易に実現することが難しいため、導入容易性を満足しない。

3. 提案 IP Mobility Management

我々は、すべての要求条件を満足する IP Mobility Management として、HMIPv6 を拡張した HMIPv6 with Buffering Extension (HMIPv6-Bv6) を提案する。拡張機能は次のとおりである。

3.1 パケットバッファリング機能

パケットバッファリング機能は、ハンドオフ中の MN 宛パケットを MAP でバッファリングする機能である。

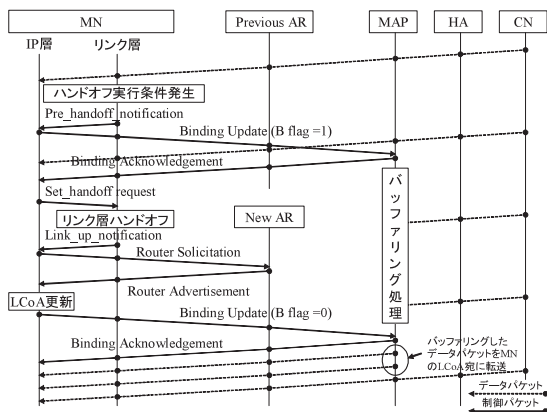


図 1 同 MAP 内ハンドオフのバッファリング機能
Fig.1 MAP buffering functionality without MAP exchanging.

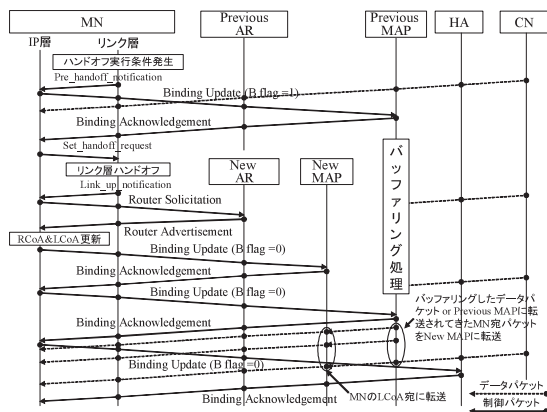


図 2 異 MAP 間ハンドオフのバッファリング機能
Fig.2 MAP buffering functionality with MAP exchanging.

図 1 は、MN が同じ MAP に、自身の Binding Cache Entry を登録しながら、AR 間をハンドオフする場合の MAP におけるパケットバッファリング動作を示している。パケットバッファリング機能は、Link Layer API を利用して実現している。Link Layer API は、MN のリンク層においてパケットの送受信が可能である、または電源 OFF である等の状態を IP 層に通知すること、およびリンク層の状態を IP 層から制御するための API である⁸⁾。利用する Link Layer API の機能は、以下の 3 種類である。

- Pre_handoff_notification: リンク層ハンドオフ処理の必要性を IP 層に通知する状態通知メッセージである。状態通知メッセージは、link_up, link_down 等のリンク層の状態を IP 層に通知するメッセージである。たとえば、無線伝送方式において、周辺 AR の受信電力をスキャンし、現在接続している AR よりも受信電力の高い AR を検出したときに通知されるメッセージである。
- Set_handoff_request: IP 層が、リンク層ハンドオフ処理開始を、リンク層に対して要求する制御メッセージである。
- Link_up_notification: リンク層で AR との接続を確立し、リンク層レベルで通信が可能になった状態を IP 層に通知するメッセージである。

MN の IP 層は、Pre_handoff_notification を契機として、BU を MAP に送信する。HMIPv6 の BU は、メッセージフィールドに MN 宛パケットのバッファリングを要求するための拡張フラグ (B flag) が追加されている。Pre_handoff_notification を契機と

する BU は、B flag = 1 で MAP に送信される。B flag = 1 の BU を受信した MAP は、BU の送信元 MN の Regional Care-of Address (RCoA) 宛に送信されたパケットのバッファリングを開始する。バッファリングを開始した MAP は、BA を MN に送信する。BA を受信した MN の IP 層は、Set_handoff_request をリンク層に通知する。Set_handoff_request を受信したリンク層は、リンク層ハンドオフ処理を実行する。リンク層ハンドオフ処理実行後、MN の IP 層は、リンク層からの Link_up_notification を契機として移動検出処理を行い、on-link Care-of Address (LCoA) を更新する。LCoA を更新した MN は、B flag = 0 の BU を MAP に送信する。B flag = 0 の BU を受信した MAP は、MN の Binding Cache Entry を更新するとともに、MN 宛パケットのバッファリングを終了し、バッファしたパケットを、更新した MN の LCoA 宛に転送する。

3.2 MAP 間パケット転送機能

MAP 間パケット転送機能は、ハンドオフ時に Binding Cache Entry を登録する MAP を変更する場合に、MAP 間でバッファしたパケットを転送する機能である。図 2 は、MN が AR 間をハンドオフするとき、Binding Cache Entry を登録する MAP を変更する場合のパケットバッファリング、および MAP 間パケット転送の動作を示している。Pre_handoff_notification による通知からリンク層ハンドオフ処理までの動作は、同じ MAP に Binding Cache Entry を登録する図 1 の場合と同じである。MN は、移動検出処理で、New AR から Router Advertisement (RA) で通知された MAP の IP アドレスが New MAP であることを検知すると、RCoA、および LCoA を更新し、New MAP

に BU を送信して、Binding Cache Entry に登録する。New MAP から BA を受信した MN は、Previous MAP に、New MAP の IP アドレスを記載した Alternate CoA option を付与した BU を送信する。BU を受信した Previous MAP は、バッファしたパケット、および Previous MAP に転送された MN 宛パケットを New MAP に転送する。New MAP は、Previous MAP から転送された MN 宛パケットを、Binding Cache Entry に登録されている MN の LCoA 宛に転送する。

Previous MAP から BA を受信した MN は、HA に BU を送信する。BU を受信した HA は、MN の Binding Cache Entry を更新し、MN の Home Address (HoA) 宛パケットを、更新した MN の RCoA 宛に転送する。

3.3 Fast Router Advertisement

HMIPv6 は、AR から定期的を送信される Unsolicited Router Advertisement (Unsolicited RA) を受信して、移動検出処理を行う。Unsolicited RA は、30 ~ 70 [msec] の間でランダム間隔に送信される²⁾。したがって、HMIPv6 は、平均 50 [msec] で移動検出処理を行うことができる。しかし、移動検出処理で 50 [msec] を要すると、後述するパケット伝送遅延変動の要求条件を満たすことができない。さらに、Unsolicited RA は、約 20 [Kbps] の帯域を消費するため、セルラ通信のように、制御メッセージ用の無線チャネルが数十 [Kbps] しか確保されていないシステムでは、平均 50 [msec] で Unsolicited RA を送信することは、運用上難しい。

一方、HMIPv6 は、リンク層からの Link_up_notification を契機として Router Solicitation (RS) を送信することで、AR から定期的を送信される Unsolicited Router Advertisement (Unsolicited RA) を待たずに RA を受信し、移動検出処理を行うこともできる。しかし、Neighbor Discovery Protocol⁷⁾ は、RS に対する応答の RA (Solicited RA) に最大 500 [msec] のランダム送信遅延を定義しているため、Link Layer API と連携しても、IP 層の移動を検出するのに時間を要してしまう。ランダム送信遅延は、RS の 1 メッセージに対して、同リンク上の AR がいっせいに RA を送信し、衝突が起きることを防いでいる。しかし、無線リンクの場合、リンク上の AR は 1 つであるため、RA を送信しても衝突は起こらない。したがって、RS 受信後に RA を即座に送信することは可能であり、この機能を AR に追加した。

表 1 要求条件
Table 1 Requirements.

	要求条件
バーストパケットロス数 (VoIP)	0.08R
パケットロス率 [%]	0.1
パケット伝送遅延変動 [msec]	50
平均パケット伝送遅延 [msec]	400

4. パケット通信品質評価

HMIP-Bv6 のパケット通信品質を、リアルタイム通信の代表例である UDP 通信、および非リアルタイム通信の代表例である TCP 通信を用いて評価した。

4.1 リアルタイム通信

UDP を用いたリアルタイム通信の例として、VoIP に相当するトラフィックでホスト間通信をした場合における HMIP-Bv6 のハンドオフ時のバーストパケットロス数、パケットロス率、ハンドオフ時のパケット伝送遅延変動、および平均パケット伝送遅延を、理論的、および実験的方法により求めた。MIPv6、および HMIPv6 に関する上記 4 項目を求め、HMIP-Bv6 との相対比較を行った。さらに、表 1 に示す、リアルタイム通信に対する各項目の要求条件を満足しているかを検証した。

パケットロス率、パケット伝送遅延変動、および平均パケット伝送遅延は、IP ネットワークのパケット通信品質に対する要求条件を定めた ITU-T 勧告に定義されている⁹⁾。なお、ITU-T 勧告におけるパケット伝送遅延変動の定義は、

パケット伝送遅延変動 =

測定中の全パケット伝送遅延の最大値 - 測定中の全パケット伝送遅延の最小値

である。VoIP が許容するバーストパケットロス数は、会話の 1 音素の平均時間から導出した。会話の 1 音素の平均時間は 80 [msec] であり、80 [msec] 以上連続するバーストパケットロス数は、会話を不明瞭にする¹⁰⁾。したがって、VoIP が許容するバーストパケットロス数は、パケット送信レートが R [pps] のときに、0.08 R 未満の整数でなければならない。

4.1.1 理論的評価方法

HMIP-Bv6、HMIPv6、および MIPv6 の UDP を用いたリアルタイム通信での各項目を算出する理論式を、方式の動作原理より導出し、VoIP のトラフィックデータを用いて各項目を算出した。理論式は、MN が Correspondent Node (CN) から HA 経由でパケットを連続的に受信しつつ、同じ MAP に Binding Cache Entry を登録しながら AR 間をハンドオフする場合

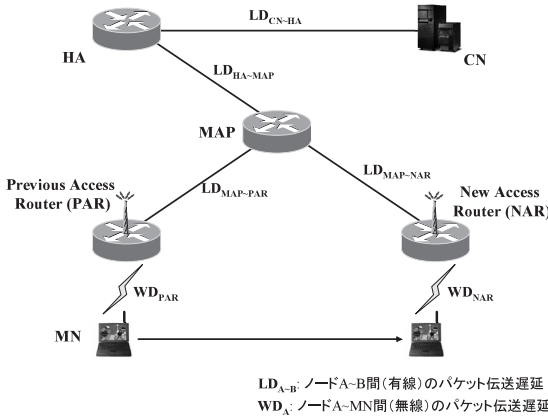


図 3 同 MAP 内ハンドオフでの理論式導出モデル
Fig. 3 Handoff model without MAP exchanging.

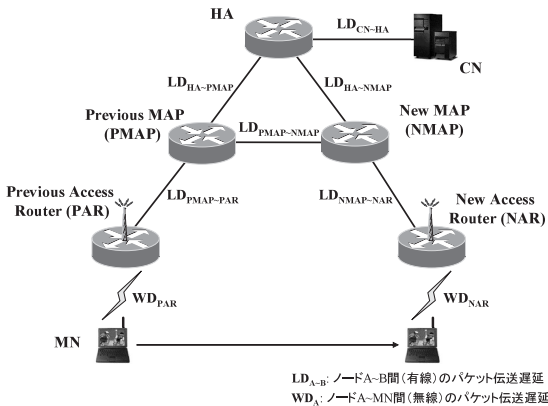


図 4 異 MAP 間ハンドオフでの理論式導出モデル
Fig. 4 Handoff model with MAP exchanging.

(図 3), および AR 間をハンドオフする際に Binding Cache Entry を登録する MAP を変更する場合 (図 4) を仮定して導出した。

(i) パーストパケットロス数 (ABPL: Amount of Bursty Packet Loss)

ハンドオフ時のパーストパケットロス数は、パケット発生間隔 T_P , およびハンドオフ処理時間 hl より求められる。 T_P は、厳密には受信側 MN におけるパケット到達間隔であるが、本評価は、CN ~ MN 間の伝送路での遅延変動は理想的に 0 [msec] であるとして、 T_P を送信側 MN のパケット発生間隔とした。ハンドオフ開始時刻 x が、任意の整数 n に対して $(n-1)T_P \leq x \leq nT_P$ の区間で一様分布に従うとすると、パーストパケットロス数の期待値 $ABPL$ は、

$$ABPL = [hl/T_P] \cdot \text{Prob}([hl/T_P]) + ([hl/T_P] + 1) \cdot \text{Prob}([hl/T_P] + 1).$$

となる。 $[x]$ は、ガウス記号、 $\text{Prob}(x)$ は、 x が起

る確率である。ハンドオフ処理時間 hl は、

$$hl = T_{link} + T_{md} + T_{BU}$$

である。 T_{link} は、リンク層ハンドオフ処理時間、 T_{md} は、移動検出処理の処理時間、 T_{BU} は、MAP、および HA の Binding Cache Entry を更新する処理時間である。 T_{md} は、

$$T_{md} = T_{radv} + 2WD_{NAR}$$

である。 T_{radv} は、RS に対する応答の Solicited RA のランダム送信遅延、 $2WD_{NAR}$ は、MN と New AR 間の無線区間を RS, Solicited RA が伝送する遅延である。なお、本評価は、ハンドオフ時に Duplicate Address Detection (DAD) 処理を行わないとし、CoA 作成処理時間は、考慮しないものとする。

(ii) パケットロス率 (PLR: Packet Loss Ratio)

CN から送信された総パケット数に対するパケットロス率 PLR は、

$$PLR = ABPL \cdot nh / NP$$

である。 nh は、総通信時間中のハンドオフ回数、 NP は、CN から送信された総パケット数である。MN は、連続的に CN からパケットを受信し続けることを仮定し、ハンドオフ時は、(i) で求めた数のパケットが損失するとして、パケットロス率を求めている。

(iii) パケット伝送遅延変動 (PTDD: Packet Transmission Delay Deviation)

ハンドオフ時のパケット伝送遅延変動 PTDD は、

$$PTDD = \max(|PTD_{NAR} - PTD_{PAR}|, |PTD_{HO} - PTD_{NAR}|, |PTD_{PAR} - PTD_{HO}|)$$

である。 PTD_{PAR} は、MN が Previous AR に接続しているときの CN から MN までのパケット伝送遅延、 PTD_{NAR} は、MN が New AR に接続しているときのパケット伝送遅延、 PTD_{HO} は、ハンドオフ中にバッファリング、または転送されたパケットの伝送遅延である。

(iv) 平均パケット伝送遅延 (APTD: Average Packet Transmission Delay)

平均パケット伝送遅延 APTD は、

$$APTD = \left(\sum_{i=1}^{NP-ABPL \cdot hn} PTD_{AR} + \sum_{i=1}^{ABPL \cdot hn} PTD_{HO} \right) / NP$$

である。 PTD_{AR} は、MN が AR に接続しているときの CN から MN までのパケット伝送遅延である。

MN が、同じ MAP に Binding Cache Entry を登録しながら AR 間をハンドオフする場合、および AR

表 2 同 MAP 内ハンドオフモデルのパケット通信品質理論式
Table 2 Formulae for packet communication quality without MAP exchanging handoff.

	MIPv6	HMIPv6	HMIP-Bv6
パーストパケットロス数 (ABPL)	$\begin{aligned} & [hl/T_p]((hl/T_p) + 1)T_p \\ & - hl)/T_p \\ & + ((hl/T_p) + 1)(1 - ((hl/T_p) \\ & + 1)T_p - hl)/T_p), \\ & hl = T_{link} + T_{radv} \\ & + 4 WD_{NAR} + 2 LD_{HA-NAR}, \\ & LD_{HA-NAR} = LD_{HA-MAP} \\ & + LD_{MAP-NAR} \end{aligned}$	$\begin{aligned} & [hl/T_p]((hl/T_p) + 1)T_p \\ & - hl)/T_p \\ & + ((hl/T_p) + 1)(1 - ((hl/T_p) \\ & + 1)T_p - hl)/T_p), \\ & hl = T_{link} + T_{radv} \\ & + 4 WD_{NAR} + 2 LD_{MAP-NAR} \end{aligned}$	0
パケットロス率 (PLR)	$ABPL \cdot nh/NP, nh = [NP T_p/HI](([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI + ([NP T_p/HI] + 1)(1 - (([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI)$		
パケット伝送遅延変動 (PTDD)	$\left LD_{MAP-NAR} + WD_{NAR} - (LD_{MAP-PAR} + WD_{PAR}) \right $		$\begin{aligned} & \max(\left LD_{MAP-NAR} + WD_{NAR} - (LD_{MAP-PAR} + WD_{PAR}) \right , \\ & \left T_{link} + T_{radv} + 3 WD_{NAR} + LD_{MAP-NAR} + WD_{PAR} + LD_{MAP-PAR} \right. \\ & \left. - T_p(i-1) \right , \left T_{link} + T_{radv} + 4 WD_{NAR} + 2 LD_{MAP-NAR} \right. \\ & \left. - T_p(i-1) \right), \\ & 1 \leq i \leq [ABPL_{HMIP}] \end{aligned}$
平均パケット伝送遅延 (APTD)	$LD_{CN-HA} + LD_{HA-MAP} + (LD_{MAP-PAR} + LD_{MAP-NAR} + WD_{PAR} + WD_{NAR})/2$		$\begin{aligned} & [(NP - ABPL_{HMIP})APT_{D_{HMIP}} + nh\{ABPL_{HMIP}(LD_{CN-HA} \\ & + LD_{HA-MAP} + 2 LD_{MAP-NAR} + 4 WD_{NAR} + T_{link} + T_{radv} \\ & + WD_{PAR} + LD_{MAP-PAR}) - \alpha\}]/NP, \\ & h = [NP T_p/HI](([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI \\ & + ([NP T_p/HI] + 1)(1 - (([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI) \end{aligned}$

HI: ハンドオフ間隔, $\alpha = \sum_{i=1}^{ABPL_{HMIP}} P(i-1)$

表 3 異 MAP 間ハンドオフモデルのパケット通信品質理論式
Table 3 Formulae for packet communication quality with MAP exchanging handoff.

	MIPv6	HMIPv6	HMIP-Bv6
パーストパケットロス数 (ABPL)	$\begin{aligned} & [hl/T_p]((hl/T_p) + 1)T_p \\ & - hl)/T_p \\ & + ((hl/T_p) + 1)(1 - ((hl/T_p) \\ & + 1)T_p - hl)/T_p), \\ & hl = T_{link} + T_{radv} \\ & + 4 WD_{NAR} + 2 LD_{HA-NAR}, \\ & LD_{HA-NAR} = LD_{HA-NMAP} \\ & + LD_{NMAP-NAR} \end{aligned}$	$\begin{aligned} & [hl/T_p]((hl/T_p) + 1)T_p \\ & - hl)/T_p \\ & + ((hl/T_p) + 1)(1 - ((hl/T_p) \\ & + 1)T_p - hl)/T_p), \\ & hl = T_{link} + T_{radv} + 6 WD_{NAR} \\ & + 4 LD_{NMAP-NAR} \\ & + 2 LD_{HA-NMAP} \end{aligned}$	0
パケットロス率 (PLR)	$ABPL \cdot nh/NP, nh = [NP T_p/HI](([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI + ([NP T_p/HI] + 1)(1 - (([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI)$		
パケット伝送遅延変動 (PTDD)	$\left LD_{HA-NMAP} + LD_{NMAP-NAR} + WD_{NAR} - (LD_{HA-PMAP} + LD_{PMAP-PAR} + WD_{PAR}) \right $		$\begin{aligned} & \max(\left LD_{HA-NMAP} + LD_{NMAP-NAR} + WD_{NAR} - (LD_{HA-PMAP} \right. \\ & \left. + LD_{PMAP-PAR} + WD_{PAR}) \right , \left T_{link} + T_{radv} + 5 WD_{NAR} \right. \\ & \left. + 3 LD_{NMAP-NAR} + 2 LD_{PMAP-NMAP} + LD_{HA-PMAP} - LD_{HA-NMAP} \right. \\ & \left. + LD_{PMAP-PAR} + WD_{PAR} - T_p(i-1) \right , \left T_{link} + T_{radv} + 6 WD_{NAR} \right. \\ & \left. + 4 LD_{NMAP-NAR} + 2 LD_{PMAP-NMAP} - T_p(i-1) \right), \\ & 1 \leq i \leq [ABPL_{HMIP}] \end{aligned}$
平均パケット伝送遅延 (APTD)	$LD_{CN-HA} + (LD_{HA-PMAP} + LD_{PMAP-PAR} + WD_{PAR} + LD_{HA-NMAP} + LD_{NMAP-NAR} + WD_{NAR})/2$		$\begin{aligned} & [(NP - ABPL_{HMIP})APT_{D_{HMIP}} + nh\{ABPL_{HMIP}(LD_{CN-HA} \\ & + LD_{HA-PMAP} + 2 LD_{PMAP-NMAP} + 4 LD_{NMAP-NAR} + 6 WD_{NAR} + \\ & T_{link} + T_{radv} + WD_{PAR} + LD_{PMAP-PAR}) - \alpha\}]/NP, \\ & h = [NP T_p/HI](([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI \\ & + ([NP T_p/HI] + 1)(1 - (([NP T_p/HI] + 1)HI - NP T_p)/HI) \end{aligned}$

間をハンドオフする際に Binding Cache Entry を登録する MAP を変更する場合の上記 4 項目を算出する理論式を、方式ごとに導出した一覧を表 2、および表 3 に示す。

4.1.2 実験の評価方法

HMIP-Bv6, HMIPv6, および MIPv6 を搭載したテストベッドを用いて、VoIP 相当のトラフィックでホスト間通信をしたときの、ハンドオフ時のパーストパケットロス数、パケットロス率、パケット伝送遅延変動、および平均パケット伝送遅延を測定した。図 5 は、テストベッドの構成を示している。テストベッドは、特定 ISP 所有の ISP IP ネットワークとその他の IP ネットワーク群より、インターネットを小規模に実

現している。ISP IP ネットワークは、MAP, AR, およびダミーネット、その他の IP ネットワーク群は、HA, およびダミーネットで構成されている。テストベッドの各ノードは、PC サーバで構成され、FreeBSD 3.4 上に各ノードの機能を実装している。ノード間のパケット伝送遅延、および帯域は、ダミーネットを用いて与え、IP ネットワークの規模を仮想的に変えている。本実験では、ISP IP ネットワーク内の MAP ~ AR 間のパケット伝送遅延を 10 [msec]、インターネットのエッジノード間 (HA ~ AR 間) のパケット伝送遅延を 50 [msec]、MAP 間のパケット伝送遅延を 2 [msec] とした^{5),6)}。リンクエミュレータは、MN と AR 間を接続する無線リンクをエミュレートする装置であり、

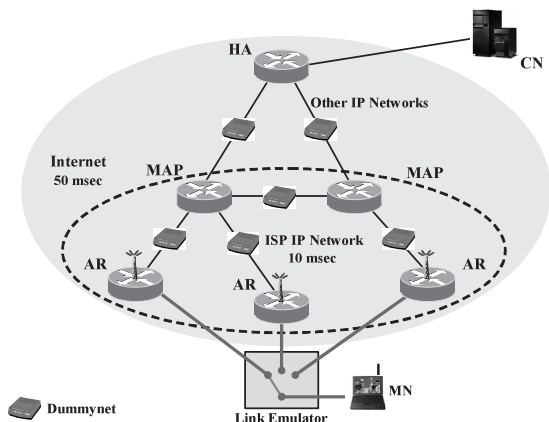


図 5 テストベッド構成
Fig. 5 Test bed configuration.

帯域設定, および AR 間で MN の接続状態を指定した周期, リンク層ハンドオフ処理時間で強制的に切り替えることができる. なお, すべてのノード間の帯域は, 100 [Mbps] とした. VoIP に相当するトラフィックは, トラフィックジェネレータを用いて生成した.

4.1.3 評価結果

表 4 は, 本実験に用いた各種パラメータ値を示している. MN は, CN から HA 経由で VoIP データパケットを連続的に受信しながら AR 間をハンドオフする. MN のハンドオフパターンは, 同じ MAP に Binding Cache Entry を登録しながら AR 間を周期的にハンドオフする場合, および Binding Cache Entry を登録する MAP を変更しながら AR 間を周期的にハンドオフする場合を用いた. ハンドオフ間隔 8 [sec] は, 速度 160 [km/h] で移動する MN が, 半径 300 [m] のマイクロセルの平均移動距離を移動するのに要する時間である¹¹⁾.

表 5 は, 同じ MAP に Binding Cache Entry を登録しながら AR 間をハンドオフする場合のパケット通信品質を, 理論式, およびテストベッドにより求めた値である. HMIP-Bv6 は, Fast RA を用いた場合, および用いない場合の 2 通りを求めた.

パーストパケットロス数は, HMIP-Bv6 のみが唯一要求条件を満足した. HMIP-Bv6 のバッファリング機能が, ハンドオフ時のパーストパケットロスを防いでいるからである. 一方, MIPv6, および HMIPv6 は, ハンドオフ処理時間に比例したパーストパケットロスが発生する. HA, または MAP が, ハンドオフ中に Previous AR にパケットを転送してしまうからである.

HMIP-Bv6 のパケットロス率は, ハンドオフ時にパ

表 4 評価パラメータ
Table 4 Parameter.

パラメータ	値
CN-HA 間パケット伝送遅延 [msec]	50
HA-MAP 間パケット伝送遅延 [msec]	40
MAP-AR 間パケット伝送遅延 [msec]	10
MAP-MAP 間パケット伝送遅延 [msec]	2
RTP ベイロード長 [bytes]	160 (G.711 codec)
RTP パケット送信レート [pps]	50 (G.711 codec)
帯域 [kbps]	64 (G.711 codec)
ハンドオフ間隔 [sec]	8
リンク層ハンドオフ処理時間 [msec]	0
経路最適化	Off
データ伝送方向	CN → MH
ハンドオフパターン	(1) 同 MAP 内ハンドオフ (2) 異 MAP 間ハンドオフ

ケットロスが発生しないため, 0 である. 一方, MIPv6, および HMIPv6 のパケットロス率は, ハンドオフ時のパーストパケットロス数に比例して増加する. パケットロス率も, HMIP-Bv6 のみが唯一要求条件を満足した.

HMIP-Bv6 は, ハンドオフ中にバッファされたパケットの滞留時間分伝送遅延が増加するため, 遅延変動が生じる. パケットの滞留時間は, ハンドオフ処理遅延に比例する. Fast RA を用いない HMIP-Bv6 は, Solicited RA の最大 500 [msec] のランダム送信遅延により, 理論値, 実験値ともに 500 [msec] ほどの大きな変動が生じている. しかし, HMIP-Bv6 は, Fast RA を用いることで, Solicited RA のランダム送信遅延を削除し, バッファパケットの滞留時間を短縮することができる. したがって, Fast RA を用いた HMIP-Bv6 のパケット伝送遅延変動は, 理論値で 20 [msec], 実験値で 21.41 [msec] であり, 要求条件を満足することができる.

HMIP-Bv6 の平均パケット伝送遅延は, ハンドオフ時にバッファされたパケットの伝送遅延増加分だけ, MIPv6, および HMIPv6 と比較して大きくなっている. しかし, Fast RA を用いた HMIP-Bv6 は, その差をごくわずかに抑えている.

表 6 は, Binding Cache Entry を登録する MAP を変更しながら AR 間を周期的にハンドオフする場合のパケット通信品質を, 理論式, およびテストベッドにより求めた値である. この場合も, パーストパケットロス数, およびパケットロス率の要求条件をともに満足するのは, HMIP-Bv6 のみである. ハンドオフ時に MAP を変更する場合, HMIPv6 は, New MAP, および HA に Binding Cache Entry を登録した後に, New AR に MN 宛パケットが転送されてくるため, MIPv6 よりもパーストパケットロス数が大きくなる. パケット伝送遅延変動, および平均パケット伝送遅延に関しても, 特性は, 同じ MAP を用いて AR 間をハ

表 5 同 MAP 内ハンドオフの測定結果
Table 5 Measured metrics in non-MAP exchanging handoff model.

項目	要求条件	MIPv6		HMIPv6		HMIP-Bv6 w/o Fast RA		HMIP-Bv6 with Fast RA	
		理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値
バーストパケットロス数	3	17.50 (X)	16.65 (X)	13.50 (X)	12.77 (X)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)
パケットロス率 [%]	0.1	4.38 (X)	4.16 (X)	3.38 (X)	3.19 (X)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)
パケット伝送遅延変動 [msec]	50	0 (O)	2.84 (O)	0 (O)	2.93 (O)	520.00 (X)	493.80 (X)	20.00 (O)	21.41 (O)
平均パケット伝送遅延 [msec]	400	100.00 (O)	99.40 (O)	100.00 (O)	99.34 (O)	104.65 (O)	104.94 (O)	100.05 (O)	100.81 (O)

(O): 要求条件満足. (X): 要求条件不満足

表 6 異 MAP 間ハンドオフの測定結果
Table 6 Measured metrics in MAP exchanging handoff model.

項目	要求条件	MIPv6		HMIPv6		HMIP-Bv6 w/o Fast RA		HMIP-Bv6 with Fast RA	
		理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値	理論値	実験値
バーストパケットロス数	3	17.50 (X)	16.65 (X)	18.50 (X)	18.17 (X)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)
パケットロス率 [%]	0.1	4.38 (X)	4.16 (X)	4.63 (X)	4.54 (X)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)	0.00 (O)
パケット伝送遅延変動 [msec]	50	0 (O)	2.84 (O)	0 (O)	2.25 (O)	544.00 (X)	490.45 (X)	44.00 (O)	48.36 (O)
平均パケット伝送遅延 [msec]	400	100.00 (O)	99.40 (O)	100.00 (O)	99.16 (O)	105.64 (O)	106.60 (O)	100.16 (O)	102.81 (O)

(O): 要求条件満足. (X): 要求条件不満足

ンドオフする場合と同じであり, HMIP-Bv6 は, 理論値, 実験値ともに要求条件を満たしている. HMIP-Bv6 は, 同じ MAP を用いて AR 間をハンドオフする場合と比較して, Previous MAP に対して New MAP へのバッファパケット転送処理を行う分だけ, パケット伝送遅延変動, および平均パケット伝送遅延が増加している.

4.2 非リアルタイム通信

TCP を用いた非リアルタイム通信の代表例として, FTP によるファイルダウンロード, およびアップロード時間を, テストベッドを用いて測定し, HMIP-Bv6, HMIPv6, および MIPv6 の間で相対比較を行った. 表 7 は, 転送ファイルサイズ, およびハンドオフに関するパラメータ値を示している. 転送ファイルサイズは, 平均的な MP3 楽曲ファイルの大きさである. ハンドオフ間隔 32, 16, 8 [sec] は, 速度 40, 80, 160 [km/h] で移動する MN が半径 300 [m] のマイクロセルの平均移動距離を移動するのに要する時間である.

図 6, および図 7 は, MN が CN からファイルをダウンロードする場合の, 平均ダウンロード時間を示している. 図 6 は, MN が同じ MAP を用いて AR 間をハンドオフする場合, 図 7 は, ハンドオフ時の MAP を変更する場合の平均ダウンロード時間である. 図 6, および図 7 において, HMIP-Bv6 は, Fast RA を用いた場合, 用いない場合ともに, ハンドオフ間隔に依存せず, ほぼ等しいダウンロード時間を提供している. HMIP-Bv6 のバッファリング機能は, ハンドオフ時の TCP データセグメントロス完全に防いでい

表 7 転送ファイルサイズ&ハンドオフパラメータ
Table 7 File size & handoff parameter.

パラメータ	値
輻輳アルゴリズム	Reno
転送ファイルサイズ [Mbyte]	5
ハンドオフ間隔 [sec]	ハンドオフ無し, 8, 16, 32
リンク層ハンドオフ処理時間 [msec]	0
経路最適化	無し
データ伝送方向	CN → MH, MH → CN
ハンドオフパターン	(1) 同 MAP 内ハンドオフ (2) 異 MAP 間ハンドオフ

るため, スループットが低下しない. 一方, MIPv6, および HMIPv6 は, ハンドオフ間隔が短くなるにつれてダウンロード時間が長くなっている. ハンドオフ中の TCP データセグメントロスが, ハンドオフ後のスループットを低下させるからである.

HMIP-Bv6 は, ハンドオフ時に MAP を変更する場合, MAP 間でバッファしたパケットを転送する. よって, 図 2 のハンドオフシーケンスにおいて, HA の Binding Cache Entry を変更する前後に HA から転送されたパケットは, MN で順序が逆転して受信する可能性がある. 特に TCP を用いた通信では, 順序逆転したパケットが 3 つ発生すると, 重複 ACK が 3 つ発生することにより Fast Retransmit が発生し, 輻輳ウィンドウ (cwnd: Congestion WiNdoW) の減少によりスループットが低下する. 本実験系において, CN ~ MN 間の RTT は, 150 [msec], 最大ウィンドウサイズは, 12 セグメント (16.4 [Kbyte]) である. ゆえに, MN は, ウィンドウサイズが最大の状態で, 平均 6.25 [msec] 間隔で TCP データセグメントを受信する. したがって, MAP 間のパケット伝送遅延が 18.75 [msec] 以上である場合, ウィンドウサイズが最

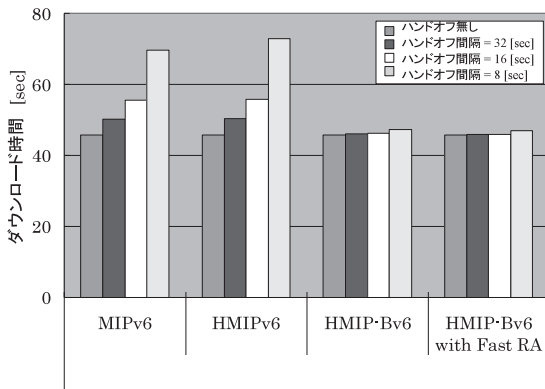


図 6 CN → MN & 同 MAP 内ハンドオフのダウンロード時間
Fig. 6 Download time without MAP exchanging handoff (CN → MN).

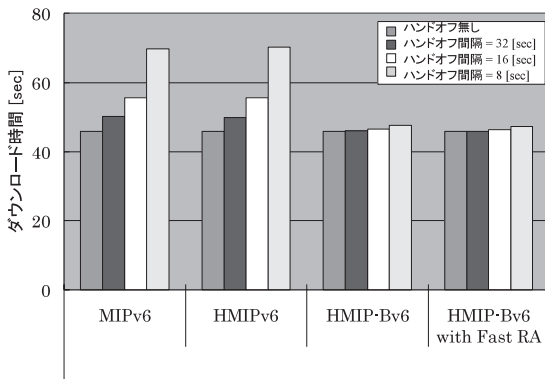


図 7 CN → MN & 異 MAP 間ハンドオフのダウンロード時間
Fig. 7 Download time with MAP exchanging handoff (CN → MN).

大の状態ではハンドオフを行うと、3 つ以上の順序逆転パケットが発生する可能性が、ある。しかし、現在の国内 ISP のパケット伝送遅延が 10 [msec] 程度であること、および MAP は、ISP 内で分割された Regional Network ごとに設置されることを考慮すると、MAP 間のパケット伝送遅延が 18.75 [msec] 以上になる可能性は低い。本実験結果においても、MAP 間のパケット伝送遅延を 2 [msec] に設定しているため、ハンドオフ時に MAP を変更する場合に、順序逆転パケットが 1 つ発生することはあっても、Fast Retransmit が行われる 3 つ以上の順序逆転パケットは、発生しなかった。

図 6, および図 7 では、HMIPv6 は MIPv6 よりもダウンロード時間が長くなっており、その差はハンドオフ間隔が短くなるほど大きくなっている。これは、ハンドオフ時の TCP データセグメントのロスパターン、および TCP Reno の輻輳制御アルゴリズム上の問題に起因している。ハンドオフ時の TCP データセグメントのロスパターンは、図 8、および図 9 の 2

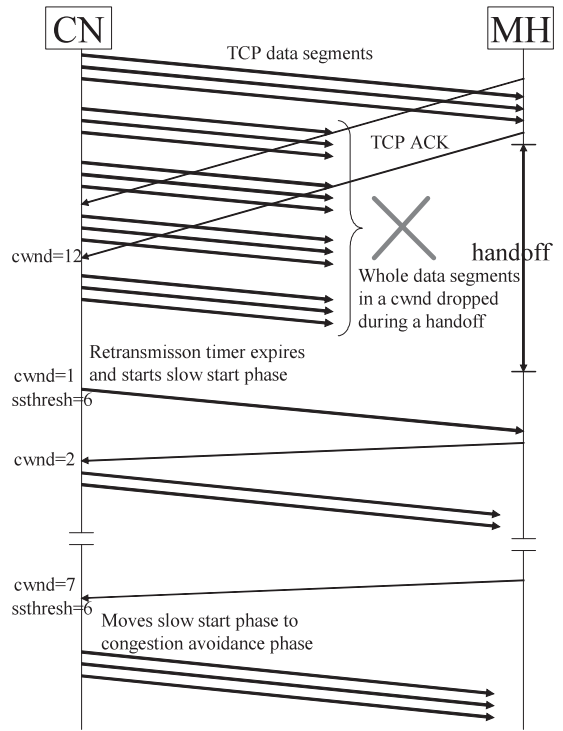


図 8 TCP データセグメントロスパターン 1
Fig. 8 TCP data segment loss pattern 1.

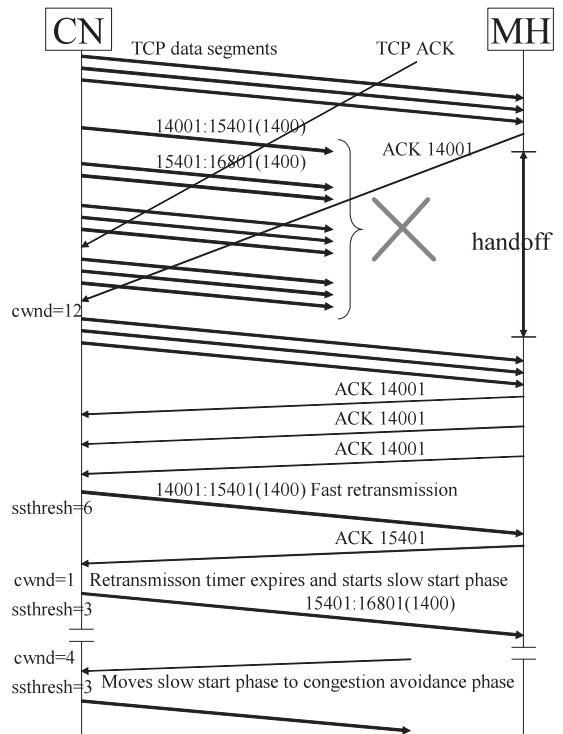


図 9 TCP データセグメントロスパターン 2
Fig. 9 TCP data segment loss pattern 2.

通りがある．図 8 は，ハンドオフ中に，ウィンドウサイズ分のすべてのセグメントがロスした場合を示している．CN は，MN から反応がないため，再送タイマが切れた後に，スロースタートでセグメントの再送を始める．このとき，スロースタートの閾値 (ssthresh: Slow Start THRESHold) は，スロースタートを始める前の cwnd の 1/2 になり，さらに cwnd は，1 セグメントになる．スロースタートは，ACK を受信するごとに，cwnd を 1 セグメント増加させる．cwnd > ssthresh になると，CN は，スロースタートから Congestion avoidance に移行し，ACK の受信ごとに，cwnd を 1/cwnd セグメント増加させる．図 9 は，ハンドオフ時にウィンドウサイズ分のすべてのセグメントがロスせず，MH が，ハンドオフ後に 3 つ以上のセグメントを受信した場合を示している．MH は，ハンドオフ後に受信した 3 つのセグメントに対して重複 ACK 14001 を返す．CN は，3 つ目の重複 ACK を受けると Fast retransmit を行う．このとき ssthresh は，Fast retransmit を始める前の cwnd の 1/2 になる．MH は，Fast retransmit されたセグメントを受信すると，次のまだ受信していないセグメントの ACK 15401 を CN に返す．しかし，CN は，ACK 15401 を受信しても，要請されたセグメントを即座に送信できず，再送タイマが切れるのを待ってスロースタートで再送する．これは，TCP Reno の Fast Retransmit が，複数パケットの損失に対応していないために発生する現象である．このスロースタートによる再送で ssthresh は，さらに 1/2 になり，cwnd は，1 セグメントになる．図 9 のハンドオフ時のセグメント損失パターンは，図 8 のパターンよりも ssthresh の値が小さくなるため，早い段階で Congestion avoidance に移行する．Congestion avoidance は，スロースタートよりもウィンドウサイズの増加が緩やかであるため，早い段階で Congestion avoidance に移行する図 9 のパターンは，図 8 のパターンよりもウィンドウサイズの増加が緩やかである．HMIPv6 は，MIPv6 よりもハンドオフ処理遅延が短いため，図 9 のセグメントロスパターンが多く発生する．したがって HMIPv6 は，MIPv6 よりもダウンロード時間が長くなっている．

図 10 および 図 11 は，MN が CN にファイルをアップロードする場合の，平均アップロード時間を示している．図 10 は，MN が同じ MAP を用いて AR 間をハンドオフする場合，図 11 は，ハンドオフ時の MAP を変更する場合の平均アップロード時間である．図 10，および図 11 において，HMIPv6 は，Fast RA を用いた場合，用いない場合ともに，ハンドオフ

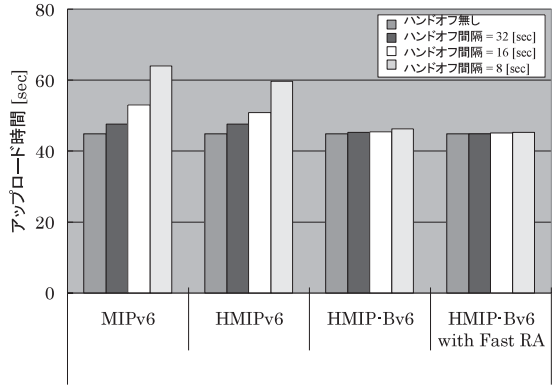


図 10 MN → CN & 同 MAP 内ハンドオフのダウンロード時間
Fig. 10 Download time without MAP exchanging handoff (MN → CN).

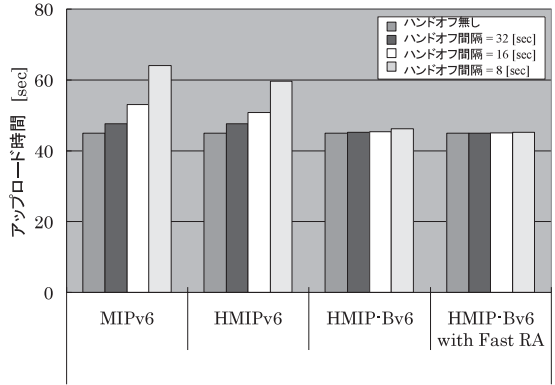


図 11 MN → CN & 異 MAP 間ハンドオフのダウンロード時間
Fig. 11 Download time with MAP exchanging handoff (MN → CN).

間隔に依存せず，ほぼ等しいダウンロード時間を提供している．HMIPv6-Bv6 のバッファリング機能は，ハンドオフ中の TCP ACK ロスを完全に防ぎ，ハンドオフ後にスロースタートによる不要な再送を行わないため，スループットが低下しない．一方，MIPv6，および HMIPv6 は，ハンドオフ間隔が短くなるにつれてアップロード時間が長くなっている．ハンドオフ中の TCP ACK ロスが，ハンドオフ後のスループットを低下させるからである．

5. 結 論

本論文は，理論的，および実験的方法により HMIPv6-Bv6，HMIPv6，および MIPv6 のパケット通信品質を評価し，HMIPv6-Bv6 のパケット通信品質が最も優れていること，および HMIPv6-Bv6 が，VoIP に対する要求条件を満足していることを明らかにした．さらに HMIPv6-Bv6 は，FTP によるファイル転送を行った際に，ハンドオフ間隔に依存しないほぼ等しいダウン

ロード, およびアップロード時間を実現することを示した.

参 考 文 献

- 1) Otsu, T., et al.: Network Architecture for Mobile Communications System Beyond IMT-2000, *IEEE Personal Communications* (Oct. 2001).
- 2) Johnson, D., et al.: Mobility Support in IPv6, RFC3775 (June 2003).
- 3) Soliman, H., et al.: Hierarchical MIPv6 Mobility Management (HMIPv6), draft-ietf-mipshop-hmipv6-02.txt (June 2004).
- 4) Dommety, G., et al.: Fast Handovers for Mobile IPv6, draft-ietf-mipshop-fast-mipv6-02.txt (July 2004).
- 5) <http://average.matrix.net/>
- 6) <http://www.ij.ad.jp/>
- 7) Narten, T., et al.: Neighbor Discovery for IP version 6, RFC2461 (Dec. 1998).
- 8) Kobayashi, R., et al.: Uniform Application Programming Interface to Share Abstracted Control Information on Link Layers, *IEICE Society Conference* (Sep. 2003).
- 9) ITU-T Recommendation Y.1541, Network Performance Objectives for IP-Based Services (Feb. 2002).
- 10) Jiang, W. and Schulzrinne, H.: Perceived Quality of Packet Audio under Bursty Losses, *Proc. Conference on Computer Communications (IEEE Infocom)*, New York City (June 2002).
- 11) Hong, D. and Rappaport, S.: Traffic Model and Performance Analysis for Cellular Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol.VT-35, No.3, pp.77-92 (Aug. 1986).

(平成 16 年 6 月 7 日受付)

(平成 16 年 12 月 1 日採録)

推 薦 文

近い将来, インターネットを利用した移動体通信がさかんになると思われる. 本論文は, 高速ハンドオーバープロトコルである Hierarchical Mobile IPv6 を改良して MAP と呼ばれるルータにバッファリング機能を持たせた方式を提案している. 評価には, リアルタイム通信としては VoIP を取り上げ, また非リアルタ

ム通信としてはファイルダウンロードを取り上げて詳細に評価している. ささまざまな高速ハンドオーバー手法が提案されているが, その多くは方式の提案のみである. 本論文の評価手法は高速ハンドオーバープロトコルの評価方法に指針を与え, 今後のこの分野の研究に大きく貢献するものであると認められる.

(DICO2003 プログラム委員会委員 水野 忠則)



高橋 秀明 (正会員)

(株)NTT ドコモ IP 無線ネットワーク開発部勤務. 2001 年京都大学大学院情報学研究所修士課程終了. 同年 (株)NTT ドコモ入社. 入社以来, IP ベース移動通信システムの研究に従事し, Mobile IPv6 ベースの IP モビリティマネジメント設計に携わる.



小林 亮一

(株)NTT ドコモ IP 無線ネットワーク開発部勤務. 2002 年入社. 入社以来, IP ベース移動通信システムの研究, UTRAN の IP 化に関する無線システムの開発に従事.



岡島 一郎

(株)NTT ドコモワイヤレス研究所主幹研究員. 1991 年入社. 入社以来, PDC 移動パケット通信システムの開発, IP ベース移動通信システムの研究に従事.



梅田 成視

1985 年北海道大学工学部電子工学科卒業. 1987 年同大学大学院修士課程了. 同年日本電信電話 (株)通信網第 2 研究所入所. 以来, デジタル移動通信方式における制御方式, 第 3 世代移動通信方式, および第 4 世代移動通信方式に向けた研究に従事. 現在 (株)NTT ドコモワイヤレス研究所主幹研究員通信方式研究室室長. 1998 年 (社)発明協会恩賜発明賞受賞. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.