

IEEE802.21 を用いた スムーズな異種メディア間ハンドオーバーシステムの実現

三屋 光史朗^{†1} 北地 三浩^{‡2} 長澤 知津子^{‡2}
 守田 空悟^{‡2} 横田 知好^{‡2}
 湧川 隆次^{†1} 村井 純^{†1}

IP モビリティプロトコルのマルチホーム拡張を利用し、通信メディアを切り替える前にリンク層やネットワーク層の確立をあらかじめ完了しておくことで、パケットロスや遅延の少ないスムーズな通信メディアの切替え（異種メディア間ハンドオーバ）が実現できることが先行研究で実証されている。ところが、切替えのタイミングを判断するために利用されるリンク層情報は通信メディアごとに管理されており、既存のシステムは実験環境に特化したものになっていた。そこで、異なる通信メディアの情報を統一的なインタフェースで扱うためのフレームワークとして、IEEE802.21 が注目を集めている。しかし、IEEE802.21 は対応製品やオープンソース実装がなく、その妥当性が十分に検証されていない。そこで、本研究では、4つの通信メディア切替え手法におけるリンク層情報の扱い方を整理し、IEEE802.21 がそれを満たしうるか検証を行った。その結果、現状の IEEE802.21 では、品質劣化通知イベントが不十分であること、またネットワーク層からリンク層のセットアップ開始/切断を実行できないことが分かった。さらに、本研究では、それらの問題を改善した IEEE802.21 と連携する形で異種メディア間ハンドオーバーシステムの実装を行った。その実装を用い、自動車内への VoIP トラフィックに対するメディア切替えの影響を調べる実証実験を行い、パケットロスのないスムーズな異種メディア間ハンドオーバが実現できることを確認した。

A Smooth Vertical Handover System Using IEEE802.21 MIH Services

KOSHIRO MITSUYA,^{†1} MITSUHIRO KITAJI,^{‡2} CHIZUKO NAGASAWA,^{‡2}
 KUGO MORITA,^{‡2} TOMOYOSHI YOKOTA,^{‡2} RYUJI WAKIKAWA^{†1}
 and JUN MURAI^{†1}

It is expected that a mobile node is equipped with several network access interfaces, and it switches or simultaneously uses these interfaces, depending on its situation. A smooth vertical handover technique using IP Mobility protocol with its multihoming extension thus has been proposed. However, an implementation of the technique is tightly depended and specialized in the equipped network interfaces. This is because link-layer information used for determining the situation is maintained in each interface driver and the API to access such information is different for drivers. In order to solve this problem, we propose in this paper an IP Mobility system that utilizes IEEE802.21 (Media Independent Handover Services). Since the current IEEE802.21 specification does not allow the proposed smooth vertical handover scenario, we propose the modifications for the IEEE802.21 specification. We also designed and implemented the smooth vertical handover system using the modified IEEE802.21, and evaluated it in a real vehicle environment. As the result, we achieved that there was no packet loss on VoIP traffic during media switching.

1. 序 論

携帯型情報端末や Intelligent Transportation Systems (ITS) サービスの普及により、移動しながら通

信を行う計算機が増えてきた。また、無線通信技術の発達により、多種多様な無線通信メディアを利用して、移動する計算機がインターネットに接続することが可能になった。あらゆる状況下で利用可能な無線通信メディアが存在しないため、移動する計算機は複数の通信メディアを搭載し、状況に応じて通信メディアをシームレスに切り替えながら通信を行うこと（異種メディア間ハンドオーバ）が期待されている。

^{†1} 慶應義塾大学
Keio University

^{‡2} 京セラ株式会社横浜 R&D センター
Yokohama R&D Center, Kyocera Corporation

異種通信メディア間をシームレスに切り替えるために、移動する計算機は Mobile IP¹⁾ や NEMO Basic Support²⁾ といった IP モビリティプロトコルを用いることが、広く一般に謳われている。また、IP モビリティプロトコルのマルチホーム拡張仕様である Multiple Care-of Address Registration (MCoA)³⁾ を利用し、リンク層やネットワーク層の確立を事前に済ませておくことで、パケットロスや遅延のないスムーズな通信メディアの切替えが実現できることが先行研究で実証されている⁴⁾。

計算機が通信メディアを切り替えるタイミングを判断するために、リンク層情報が使われる⁶⁾⁻¹⁰⁾。たとえば、現在利用している通信メディアの通信品質が悪くなってきたところで他の通信メディアに切り替える、といったシナリオである。ところが、リンク層情報やその取得方法は通信メディアに依存するため、切替え判断を行うプログラムは通信メディアごとに開発しなければならず、実験環境に特化したシステムになってしまっていた。

この問題の解決策として、現在標準化が進められている IEEE802.21 (メディア非依存ハンドオーバサービス)¹¹⁾ が注目を集めている。IEEE802.21 は、メディアに依存しないハンドオーバを実現するために、リンク層と上位層間でメディアに依存しない統一的なインタフェースを規定する。しかし、IEEE802.21 は標準化がまだ完了しておらず、対応した製品やオープンソース実装は例がなく、その妥当性が十分に検証されていない。また、Mobile IPv6 や FMIPv6 との連携例^{12),13)} は存在するが、MCoA 拡張を施した IP モビリティシステムとの連携は試されていない。

そこで、本研究では IP モビリティシステム上でリンク層情報の扱い方を整理し、IEEE802.21 がそれを満たしうるか検証を行う。具体的には、IEEE802.21 と連携する形で IP モビリティシステム的设计実装を行い、その実装を用いて 3 章で紹介する 4 つのシナリオで通信メディア切替えを行う。特に、実証実験は次世代通信メディアである iBurst^{*1)} や 3G セルラー網である EV-DO といった一般にリンク層情報の取得方法が公開されていない通信メディアを用いて実施し、自動車内への VoIP トラフィックに対する通信メディア切替えの影響を調べ、シナリオで想定する範囲のハンドオーバ遅延やパケットロスであるかを確認する。

2. 要素技術

本章では、本研究が想定している移動体通信環境を説明するために、要素技術である IP モビリティプロトコルと IEEE802.21 について述べる。

2.1 IP モビリティプロトコル

Mobile IPv6 は、ネットワークを移動するごとに変化する IP アドレス (CoA: Care-of Address) とは別に、端末を識別するための変化しない一意な IP アドレス (HoA: Home Address) を導入することで、移動する計算機に対する着信可能性および移動透過性を提供する。HoA は Home Agent と呼ばれるルータが接続しているネットワーク (Home Link) から割り当てられる。移動ノードが、移動先のネットワークで CoA を取得すると、それを Home Agent に通知する。これにより、Home Agent は移動ノードの HoA と実際に利用している CoA との対応 (Binding) を保持することができる。移動ノードが Binding を通知することを Binding Update と呼び、ホームエージェントが行う Binding Update の返答を Binding Acknowledgment と呼ぶ。移動ノードと通信を行うノード (CN: Correspondent Node) から HoA に宛てられたパケットが一般の経路制御に従って Home Link まで配送されると、Home Agent はそのパケットを CoA に転送する。この仕組みによって、移動ノードは、無線ネットワークを切り替えても、HoA を用いて継続的に通信が可能となる。

Mobile IPv6 がホスト単位の移動を支援する技術であるのに対して、Network Mobility (NEMO) はサブネット単位の移動を支援する技術である。たとえば、自動車や電車のような複数のノードが接続しているサブネットが移動する場合は、サブネットに接続しているすべてのノードがインターネット接続性や移動支援機能を有する必要がある、非常に高コストである。そこで、移動ルータ (MR: Mobile Router) と呼ばれるノードが代表してモビリティ支援機能を持つことで、そのサブネット (移動ネットワーク) に接続している他のノード (MNN: Mobile Network Node) にモビリティ支援機能を追加することなく、サブネット全体に移動透過性を保証する技術である。

NEMO Basic Support は、Mobile IPv6 を拡張した Network Mobility 技術である。移動ルータは、Binding Update に、移動ルータが接続しているサブネットの情報も含めて、Home Agent に通知する。これにより、移動ネットワークと CoA の対応がとれるため、Home Agent は移動するサブネットに宛てられた

*1 ANSI ATIS 0700004-2005 HC-SDMA

パケットを移動ネットワークに接続しているノードに転送することができる。この仕組みによって、MNNは移動ルータの移動を意識することなく、継続的に通信が可能となる。

2.2 Multiple Care-of Address Registration を用いたスムーズハンドオーバー

Multiple Care-of Address Registration (MCoA) は、IP モビリティプロトコルの拡張仕様である。標準仕様の IP モビリティプロトコルは単一の通信メディアの利用しか想定しておらず、移動ノードは1つの CoA しか Home Agent に登録することができない。この問題を解決するために MCoA では、Binding Unique Identification number (BID) と呼ばれる識別子を用い、たとえば通信メディアごとに割り当てる。Binding は、HoA と BID の対で識別され、複数の CoA を同時に登録利用することが可能になる。

MCoA を利用すると複数の通信メディアが利用可能になるため、実際に通信メディアを切り替える前に、リンク層やネットワーク層の確立をあらかじめ完了しておくことが可能である。これにより、切替えの際に生じる遅延やパケットロスの低減を実現できる⁴⁾。

事前にメディア非依存ハンドオーバー処理を行う手法としては関連研究^{18),19)}があるが、これらの手法はアクセスネットワーク側の変更も必要のため、すぐに普及する技術ではない。一方、MCoA を用いた手法は、マルチホーム拡張を利用し既存のハンドオーバー処理(認証やネットワーク設定)をバックグラウンドで処理するため、すでに普及しているアクセスネットワークとの親和性が高い。

2.3 IEEE802.21 メディア非依存ハンドオーバーサービス

IEEE802.21 は、メディア非依存ハンドオーバー (MIH: Media Independent Handover) を実現するために、上位層とリンク層の間でメディアに依存しない統一的なインタフェースを規定する。同様のリンク

層抽象化手法¹⁶⁾は実環境で実証されている¹⁷⁾が、本研究では今後広く普及が期待される IEEE802.21 を選択した。

IEEE802.21 では、Media Independent (MI) Event, MI Command, MI Information という3種類のサービスが定義されており、上位層のスタックはこれらのサービスを利用することで、メディアに依存しない形の抽象化されたリンク層情報をやりとりすることができる(図1)。

IEEE802.21 MIH Function は、IEEE802.21 とそのサービスの利用者 (MIH User) のインタフェースである。MI Event は、リンク層が利用可能になったこと等、リンク層情報を上位層に対してイベント通知するために利用される。MI Command は、上位層による能動的なリンク層情報の取得やリンク層を設定するために利用される。MI Information は、隣接しているネットワークの情報等、ハンドオーバーの決定に必要な様々な情報を取得するために利用される。MI サービスを受けた MIH Function は該当する LINK サービスを呼び出し、下位層 (Lower Layers) とやりとりを行う。

表1に、IEEE802.21のサービス例をあげる。

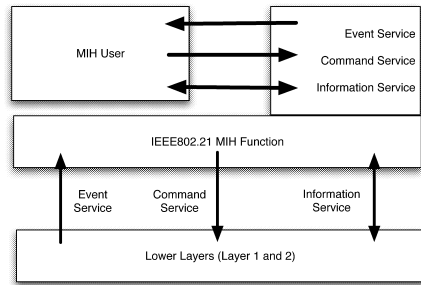


図1 IEEE802.21のサービスモデル
Fig.1 IEEE802.21 interaction model.

表1 IEEE802.21 サービス例

Table 1 IEEE802.21 services.

サービス型	名前	説明
Command	MIH Get Status	リンク層の状態を取得
Command	MIH Handover Prepare	ハンドオーバーの準備を開始
Command	MIH Switch	指定したリンクに切り替え
Command	MIH HandoverComplete	ハンドオーバーが完了したことを通知
Command	MIH Handover Commit	ハンドオーバーが完了したことを通知
Event	MIH LinkGoingDown	リンクが切れそうなことを通知
Event	MIH LinkUP	リンクが確立したことを通知
Event	MIH LinkDown	リンクが切断したことを通知
Information	MIH Get Information	レボジトリからの情報取得を要求

3. 主な通信メディア切替え手法およびそのリンク層情報の扱い方

本章では、IP モビリティシステムにおいて通信メディアを切り替える際にどのようにリンク層情報を利用していったかを整理するために、4つの先行事例で利用されている通信メディア切替え手法について解説する。

前提として、移動ノード（移動ホストもしくはルータ）は複数の無線通信メディアを搭載し、状況に応じて通信メディアを切り替えながら無線ネットワークに接続しているとす。各無線通信メディアには優先度が設定され、移動ルータは優先度が高い通信メディアを利用し無線ネットワークに接続する。優先度が高い通信メディアが利用できない場合には、次に高い優先度を持つメディアを利用する。なお、資源の有効利用を考慮して、複数の通信メディアを常時接続することは避けている。

また、次にあげる4つの通信メディア切替え手法は、複数の通信メディアの優先度がすべて等しい場合、あるいは優先度が高い無線ネットワーク（通信 I/F-1）から低い無線ネットワーク（通信 I/F-2）へ切り替える場合の手法である。なお、優先度が低い無線ネットワークから優先度が高い無線ネットワークへハンドオーバーする場合は、優先度が高い無線ネットワークのリンクが確立し通信ができるようになった時点で、優先度が高いネットワークへのハンドオーバー処理が実行される。

3.1 通常の通信メディア切替え手法：Make-After-Break

通常の通信メディア切替え手法は、最もプリミティブな手法で、リンクの切断/確立の情報のみを利用して切替えを行う、Make-After-Break 手法⁵⁾である。

通信 I/F-1 のリンク状態を IP モビリティスタックで監視し、リンクが切断したところで、通信 I/F-2 においてリンク層セットアップを開始する。リンク層セットアップが終了したことをうけ、ネットワーク層アドレスの取得を開始する。ネットワーク層アドレスを取得したのち、通信 I/F-2 へのネットワーク層ハンドオーバー処理を開始する。

3.2 品質劣化判定を用いた手法：Make-After-GoingToBreak 手法

Make-After-GoingToBreak 手法¹⁴⁾は、リンクの切断ではなくリンク品質の劣化によって、切替えを行う手法である。一般に、アプリケーションが通信困難なくらいにリンクの品質が劣化していても、リンク層の

には接続を継続する。実際に、リンクが切断されるのは、たとえば PPP のタイムアウト後（数十秒）と、ずっと後になる。そこで、リンク品質の劣化を観測し切替えを行うタイミングを判断することで、この遅延を解消できる。

Make-After-GoingToBreak 手法では、通信 I/F-1 のリンク状態を IP モビリティスタックで監視し、リンクの品質劣化を確認したところで、通信 I/F-2 においてリンク層セットアップを開始する。リンク層セットアップが終了したことをうけ、ネットワーク層アドレスの取得を開始する。ネットワーク層アドレスを取得したのち、通信 I/F-2 へのネットワーク層ハンドオーバー処理を開始する。

なお、リンクの品質劣化の閾値については、4.2 節で議論する。

3.3 事前切替え準備手法：Make-Before-Break

Make-before-break 手法¹⁵⁾は、リンクの品質が劣化する前に、切替え先のリンクを確立しておく手法である。理論的には、ネットワーク層の切替えにかかる遅延分しか、パケットロスが発生しない。

通信 I/F-1 のリンク状態を IP モビリティスタックで監視し、リンクの品質劣化を確認したところで、通信 I/F-2 においてリンク層セットアップを開始する。数秒後、通信 I/F-2 において無線ネットワークのリンクが確立されたことを確認する。さらに、通信 I/F-1 の無線ネットワークにおいて通信品質が劣化し、リンクが切断されると、IP モビリティスタックは通信 I/F-2 へのネットワーク層ハンドオーバー処理を開始する。

3.4 マルチホームを利用した事前切替え準備手法：Multihomed Make-Before-Break

Multihomed Make-before-break 手法⁴⁾は、マルチホームの特性を利用し、リンクの品質が劣化する前に、利用中のリンクと切替え先のリンクを同時に利用可能な状態にしておく手法である。理論的には、パケットロスはまったく発生しない。

通信 I/F-1 のリンク状態を IP モビリティスタックで監視し、リンクの品質劣化を確認したところで、通信 I/F-2 においてリンク層セットアップを開始する。数秒後、通信 I/F-2 において無線ネットワークのリンクが確立されたことうけ、ネットワーク層アドレスの取得を開始する。ネットワーク層アドレスを取得したのち、通信 I/F-2 での Binding 処理を、2.2 節で説明したように実施する。完了すると、同時に2つのネットワークに接続している状態になる。続いて、通信 I/F-1 の無線ネットワークにおいて、さらにリンクの品質が劣化したことを確認すると、IP モビリティス

表 2 利用する IEEE802.21 サービス
Table 2 IEEE802.21 services to be used.

リンク層情報	Make After Break	Make After GoingToBreak	Make Before Break	Multihomed Make Before Break
(A)	-	-	GoingDown?	GoingDown?
(B)	-	GoingDown?	-	N/A
(C)	LinkDown	-	LinkDown	LinkDown
(D)	LinkUp	-	-	-
(E)	N/A	N/A	N/A	N/A
(F)	-	-	N/A	N/A

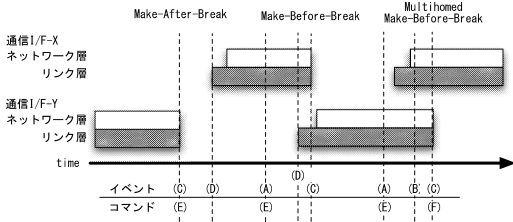


図 2 切替え手法と利用されるリンク層情報

Fig. 2 Link information used for handover scenarios.

タックは通信 I/F-2 へのネットワーク層ハンドオーバー処理を開始する．ネットワーク層ハンドオーバー処理が完了すると，IP モビリティスタックは通信 I/F-1 でのネットワーク接続を終了する．

3.5 リンク層情報の扱い方

以上の手法を整理すると，IP モビリティスタックとリンク層では，図 2 に示すようなリンク層情報のやりとりが必要であった．図中，斜が掛かっている四角はリンク層が確立されている期間，白い四角はネットワーク層が確立されている期間を表している．また，図中アルファベットで表されているリンク情報を以下にあげる．

- (A) リンク層およびネットワーク層の設定を開始するタイミングのイベント通知（リンク品質劣化イベント A）
- (B) 通信メディアを切り替えるタイミングのイベント通知（リンク品質劣化イベント B）
- (C) リンクが切断したことを通知（リンク切断イベント）
- (D) リンクの確立したことを通知（リンク確立イベント）
- (E) リンク層セットアップの開始を要求（リンク確立要求コマンド）
- (F) リンクの切断を要求する（リンク切断要求コマンド）

4. IEEE802.21 を用いた IP モビリティスタックの実現方法

3 章では，IP モビリティプロトコルの実装上で，リンク層情報がどのように利用されているかを整理した．本章では，IEEE802.21 がそれを満たしているかを検討するために，IEEE802.21 を用いた IP モビリティスタックの実現方法を議論する．

4.1 利用する IEEE802.21 サービス

IEEE802.21 アーキテクチャでは，IP モビリティスタックは図 1 中の MIH User にあたり，IEEE802.21 サービスを利用して，リンク層情報をやりとりする．表 2 に，3 章で整理したリンク層情報と対応する IEEE802.21 サービスをあげる．

IEEE802.21 ではリンク品質劣化を知るためのイベントとして LinkGoingDown イベントが定義されている．しかし，LinkGoingDown イベントのみを利用して品質劣化を扱うには不都合な場合があり，問題である．たとえば，Multihomed Make-Before-Break 手法のように異なる 2 種類の品質劣化イベントを利用する場合や，MIH ユーザごとに利用したい品質劣化の定義が異なる場合である．

一方，リンクの品質は，MIH Get Information コマンドを用いて知ることができる．また，MIH Configure Thresholds コマンドを用いて，任意の Link Parameter を閾値として設定し，その値に達したことをイベント通知（MIH Link Parameters Report）で受け取ることが可能である．今回の実験では，これらの Thresholds を利用したコマンド/イベント通知をもって，リンクの品質劣化を判断する．品質劣化の判定方法については，4.2 節で議論する．

リンク切断イベントには，LinkDown イベントを利用する．また，リンク確立イベントには，LinkUp イベントを利用する．リンクの接続開始および終了コマンドに対応するコマンドは IEEE802.21 には定義されおらず，問題である．そのため，本実験では新たにコ

マンドを定義して実験を行った*1.

4.2 リンク品質劣化判定

リンクの無線状態が悪化しリンクが切断されてしまう前でも、パケットロスやジッタが大きく、アプリケーションが通信困難な場合がある. . .

5章で述べる本実験では VoIP を用いているが, VoIP の品質を表す指標として ITU-T G.107 の R 値がある. . .

リンク品質劣化イベント A は, 通信 I/F-2 への事前ハンドオーバー処理のトリガとなる. . .

4.3 IP モビリティスタック (MIH User) の状態遷移

IP モビリティスタックと IEEE802.21 の連携を次のように定義する. . .

移動ノードは起動後, START 状態から PROBE 状態へ遷移する. . .

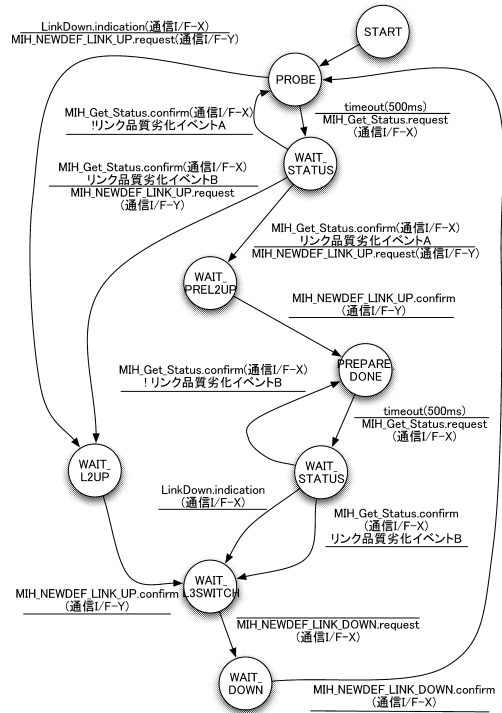


図 3 移動ノード (MIH User) の状態遷移図 Fig. 3 State machine of MIH User.

X に対して発行し, WAIT DOWN 状態に遷移する. . .

他方, PROBE 状態においては, 500 ミリ秒ごとに MIH Function から移動ノードに MIH GET Status.confirm が返答され, . . .

WAIT STATUS 状態において, リンク状態の評価の結果, リンク品質劣化イベント B の閾値より悪ければ, . . .

WAIT STATUS 状態において, リンク状態の評

*1 実験後, 我々の提案が受け入れられ, この目的に使用可能な MIH Configure コマンドが導入された.

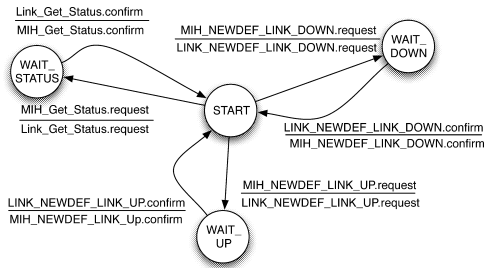


図 4 IEEE802.21 MIH Function の状態遷移図

Fig. 4 State machine of IEEE802.21 MIH Function.

価の結果，リンク品質劣化イベント A の閾値より悪ければ，Make-Before-Break 手法もしくは Multihomed Make Before Break 手法を実行する必要があると判断し，通信 I/F-Y に対してリンク層セットアップ要求 (MIH NEWDEF LINK UP.request) を発行し，WAIT PREL2UP 状態に遷移する．リンク層セットアップが完了すると，MIH NEWDEF LINK UP.confirm が返答され，PREPARE DONE 状態に遷移する．

PREPARE DONE 状態において，Link Down イベント通知を受けると，Make-Before-Break 手法を実行する必要があると判断し，ネットワーク層ハンドオーバを開始し，WAIT L3SWITCH 状態に遷移する．ネットワーク層ハンドオーバが完了すると，リンク層切断要求コマンドを通信 I/F-X に対して発行し，WAIT DOWN 状態に遷移する．通信 I/F-X はすでに切断されているため，ただちに MIH NEWDEF LINK DOWN.confirm が返答され，PROBE 状態に戻る．

PREPARE DONE 状態においても，500 ミリ秒ごとに MIH Get Status.request で通信 I/F-X のリンク状態情報取得を要求し，WAIT STATUS 状態に移行する．このとき，リンク状態がリンク品質劣化イベント B 以下であれば，Multihomed Make-Before-Break 手法を実行するために，ネットワーク層ハンドオーバを開始し，WAIT L3SWITCH 状態に遷移する．ネットワーク層ハンドオーバが完了すると，通信 I/F-X の接続を切るために MIH NEWDEF LINK DOWN.request を発行し，WAIT DOWN 状態に遷移する．それが完了すると MIH NEWDEF LINK DOWN.confirm が発行され，一連の動作が完了し，再び PROBE 状態に遷移する．

4.4 IEEE802.21 MIH Function の状態遷移

IEEE802.21 MIH Function を次のように設計した．図 4 に，IEEE802.21 MIH Function の状態遷移を示す．

IEEE802.21 MIH Function は，MIH Get Status.request を受け，該当する通信メディアに対して LINK Get Status.request を発行し，WAIT STATUS 状態に遷移する．Link Get Status.confirm が MIH Function に返答されたら，MIH User に MIH Get Status.confirm を返答する．

リンク層切断要求コマンドもしくはリンク層接続要求コマンドを受け取った場合，対応するリンクコマンドを発行し，それぞれ WAIT UP 状態および WAIT DOWN 状態に遷移させたいが，IEEE802.21 にはこの目的に使えるコマンドが定義されていない．そこで，新たに定義したコマンド (LINK NEWDEF LINK UP.request, LINK NEWDEF LINK DOWN.request) を用いた．

5. 実証実験システム概要

4 章で IEEE802.21 と IP モビリティの連携方法について定義した．実証実験では，3 章であげた 4 つのシナリオすべてで，通信メディア切替えを実施し，IEEE802.21 を用いても IP モビリティシステムが正しく動作することを検証する．

実験では，IP モビリティプロトコルとして，ITS での利用が期待されている NEMO Basic Support を利用した．実験システムは，NEMO Basic Support システムのオープンソース実装である SHISA/NetBSD-current を用いて構築した．SHISA の詳細は，文献 14) を参照されたい．SHISA には，移動検知を行うデーモンが存在する．本システムでは，そのデーモンを拡張し MIH User とした．

IEEE802.21 MIH Function はユーザランドデーモンとして実装した．iBusrnt および EV-DO のドライバを改変することができないので，IEEE802.21 Link Layer Function もユーザランドデーモンとして実装し，iBurst および EV-DO の情報取得に関しては非公開の無線情報取得ライブラリを用いて取得した．この Link Layer Function デーモンには，リンクの切断/接続機能を実装するために，PPP デーモンの開始/終了を実行する機能も実装した．

5.1 実証環境

実証実験環境の詳細を，図 5 に示す．図中，MR は移動ルータ (Mobile Router)，HA はホームエージェント (Home Agent) を表している．また，図中 LogAna は記録用 PC を表している．

移動ルータには，EV-DO データ通信カード W01K を PCMCIA スロットに搭載し，iBurst の User Terminal (UT) を Ethernet 経由で接続した．EV-DO

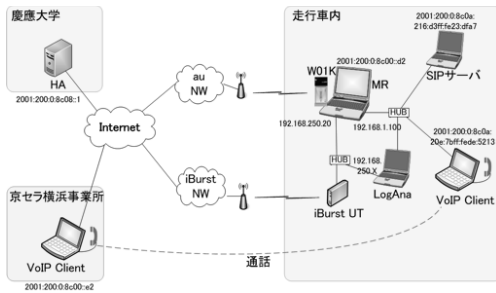


図 5 実験環境

Fig. 5 Experimental environment.

端末は au の商用ネットワーク (au NW) と PPP 接続し, IPv4 global address が割り当てられる. iBurst 端末は京セラの実験ネットワーク (iBurst NW) を PPPoE 接続し, IPv4 global address が割り当てられる. 移動ルータは, 慶應大学内に設置された Dynamic Tunnel Configuration Protocol (DTCP) サーバを介して, IPv6 接続性を得ている.

VoIP クライアントは走行車内に 1 台, 京セラ横浜 R&D センターに 1 台設置した. また, SIP サーバは, 走行車内に設置した. VoIP クライアントには Linux PC を用い, 音声コーデックとして G729 を使用したので, 20 ミリ秒ごとに 20 byte ペイロードの RTP パケットが送受信されることになる.

VoIP の送信側では周期的に音声 RTP パケットを送信しているが, 受信側では中継ネットワークの影響で到着間隔は揺らいでしまう. そのため, 受信側では遅延や揺らぎを吸収するために, 一定時間バッファリングを行ったうえでデコードの処理を行う. バッファリング期間中に到達できなかったパケットは破棄されデコードされない. 受信側で音声を再生する場合, このバッファリングをする時間分だけ, 再生タイミングが遅れてしまうが, バッファリングによってデコードされる RTP パケットが増えるため, 再生される音声の品質は向上する.

バッファ長を過度に大きくしてしまうと通話時に違和感が生じるため, 再生タイミングと音声品質のトレードオフを考慮して, ジッタバッファの時間を決定する必要がある. バッファ時間は固定 IP 網では 80 ミリ秒程度とれば十分であるが, 無線ネットワークの場合は端末の無線状態, 基地局のキャパシティ等の影響により遅延, 揺らぎは大きくなる. 本実験では検証の結果, 160 ミリ秒のジッタバッファを用いた.

5.2 リンク品質劣化イベントの閾値設定

一般に, 端末における送受信の無線品質は, 以下にあげるパラメータによってほぼ把握することができる.

- EV-DO
RSSI (受信電界強度), 搬送波対干渉波比 (CIR), 端末送信パワー
- iBurst
RSSI (受信電界強度), 信号対干渉雑音比 (SINR), 端末送信パワー, 端末送信レート, 端末受信レート

本実験では, iBurst から EV-DO への 1 方向のハンドオーバのみを実施するため, EV-DO のパラメータは使用しない. これは, 商用の EV-DO はあらゆるエリアで利用可能であるのに対して, iBurst が実験システムのため利用可能なエリアが限定されていて, 品質劣化条件を用意に再現できるためである. なお, 逆方向でも同じロジックでハンドオーバが行えると考える.

iBurst は, 商用ネットワークではなく, 実験ネットワークを利用するため, 他のユーザの影響がない. そのため, 干渉が少なく, RSSI 値が無線品質を表していると考えられる. よって, iBurst の品質劣化判定には, RSSI 値のみを利用した. また, この RSSI 値は, L2 ライブラリで 500 ミリ秒間隔の平均化が行われるため, フェージング等による瞬時的な RSSI 値劣化に起因する誤判定を極力避けることができる.

本実験では, ハンドオーバにともなうパケットロスやネットワーク遅延が品質に多く影響する VoIP を, 評価アプリケーションとして用いている. VoIP の品質が劣化し, 会話に障害が開始するときの RSSI 値を, ハンドオーバの閾値 (リンク品質劣化イベント B の閾値) として利用する.

VoIP の品質を表す指標として, 4.2 節で述べた ITU-T G.107 の R 値を用いたい. しかし, R 値を算出するには 60 秒から 10 分程度のサンプリングが必要であるため, 動的に通信品質が変化する無線環境では R 値を算出することが難しい. そこで, 車内で実際に VoIP の音声を聞きながらハンドオーバの予備実験を行い, 閾値の微調整を行った. その結果, RSSI 値が -98 dBm の際に実際に聞いた音声が悪化しているため, この値を実験で使用するリンク品質劣化イベント B の閾値とした. なお, 実証実験では, 実際にやりとりされた VoIP の品質を評価し, この閾値の妥当性を検証する必要がある.

即座にハンドオーバを実施するために, リンク品質劣化イベント B の時点で, EV-DO の PPP 接続が完了している必要がある. そのため, リンク品質劣化イベント A の閾値は, EV-DO の PPP 接続にかかる時間分だけ, リンク品質劣化イベント B より早いタイ

ミングに設定する必要がある。しかし、変動の予測が難しい無線品質においてこのタイミングの予測は困難であるため、この予測は本実験の対象外とした。本実験では、事前の走行実験にて調査し、PPP 接続に十分な時間をとれる値として、リンク品質劣化イベント B より 5 dBm 高い値 (-93 dBm) をリンク品質劣化イベント A の閾値とした。

5.3 計測方法

本実験では、評価のために Correspondent Node (CN) と Mobile Network Node (MNN) 側の各ポイントでパケットキャプチャを行った。VoIP Client (CN と MNN) では、全パケットをキャプチャした。車内のログ記録用 PC では、iBurst 端末-MR 間と MR-VoIP Client (MNN) 間の CN→MNN 方向の RTP パケットのみをキャプチャした。

また、MR からは、iBurst の無線リンク情報と IEEE802.21 のイベント通知をログ記録用 PC に送信し、ログ記録用 PC で無線リンク情報とイベントを表すグラフを表示し、記録した。

5.4 ハンドオーバー遅延の定義

MNN の VoIP Client における(下りの)ハンドオーバーの遅延は、ハンドオーバー時に MNN の VoIP Client が iBurst で受信した最後の RTP パケットと EV-DO で受信した最初の RTP パケットの受信時間差から計算した。その際 iBurst で受信したパケットと EV-DO で受信したパケットを区別するために、ログ記録用 PC でキャプチャした iBurst 端末-MR 間のパケットを用いた。iBurst 端末-MR 間でのキャプチャパケットに存在する RTP のシーケンス番号と同一のシーケンス番号を持つパケットは iBurst で受信したものと、それ以外の RTP パケットは EV-DO で受信したものととして判別した。

CN の VoIP Client における(上りの)ハンドオーバーの遅延は、MCoA ありの実験以外では、CN の VoIP Client でのキャプチャにおいて、下りと同程度のパケット受信間隔がある時間をハンドオーバーのポイントとし、遅延を計算した。MCoA を用いた実験の場合は、下りのハンドオーバーの直前の時間をハンドオーバーのタイミングとした。

5.5 リンク品質劣化イベントの妥当性の検証方法

5.2 節では、感覚的にリンク品質劣化イベント B の閾値を設定したが、実証実験でのリンク品質劣化イベント B 付近の R 値を測定することでその閾値の妥当性を検証する。測定は、MNN と CN 双方の VoIP Client でキャプチャしたそれぞれの受信パケットに対して行った。パケットの測定範囲は、Multihomed

Make-Before-Break 手法のリンク品質劣化イベント B 通知があった前 50 パケット (1 秒相当) とした。

R 値は、通常 60 秒から 10 分間程度の音声で評価されることが望ましい。しかし、本実験では、車で走行しながら通話を行っているため、60 秒の間に無線状態が変化してしまい、リンク品質劣化イベント B 付近の R 値とはいえなくなる。そこで、パケットキャプチャに基づいて遅延やロス等のネットワークの状況を再現するソフト (“Network Emulator”) を開発した。リンク品質劣化イベント B 付近の 50 パケット (1 秒相当) のキャプチャーデータを用い、Network Emulator でネットワーク環境を再現し、1 秒分の RTP パケットを繰り返し送受信することで、R 値測定ソフト “RTP テスタ” をもってリンク品質劣化イベント B の前 1 秒分の音声を評価した。

6. 実験結果

Make-After-Break 手法の実験結果を図 6~8、Make-After-GoinToBarek 手法の実験結果を図 9~11、Make-Before-Break 手法の実験結果を図 12~14、Multihomed Make-Before-Break 手法の実験結果を図 15~17 に表した。

図 6, 9, 12, 15 は、iBurst および EV-DO の RSSI 値の変化とイベント発生タイミングを示したグラフである。図中、リンク品質劣化イベント A は EV-DO のリンク層セットアップを開始するタイミング (-93 dBm) を表し、EV-DO Link UP は EV-DO のリンク層セットアップが完了したタイミング、リンク品質劣化イベント B は iBurst から EV-DO へハンドオーバーしたタイミング (-98 dBm) を表している。実験時の走行ルートはすべての実験で同じであり、表示している時間軸の違いはあるが、同じ傾向で RSSI 値の変化が観測できた。

図 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17 は、MNN (移動ネットワークからみて Downlink) もしくは CN (Uplink) でダンプした、RTP パケットの到着時間間隔を黒丸線で、RTP パケットのシーケンスエラーを × 点、および使用しているリンク層種別を破線で表している。これらの図は、iBurst から EV-DO へのハンドオーバー前後に焦点を当てた部分 (無線グラフ中網掛け部分) を拡大している。横軸は実験での経過時間を秒単位で表している。実験で使用した音声コーデックは G.729 であり、20 ミリ秒ごとに RTP パケットが送信されるため、揺らぎ、ロスのない有線の環境等では、RTP の到着時間差は 20 ミリ秒で揃うことになる。また、RTP シーケンスエラー (× 点) は 1 つ前の RTP

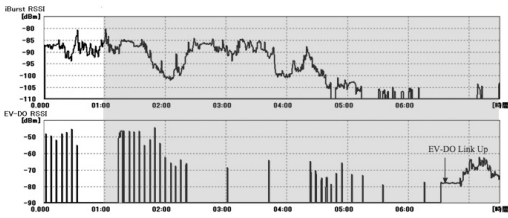


図 6 Make-After-Break 手法 RSSI 値の変化

Fig. 6 Changes of RSSI in Make-After-Break scenario.

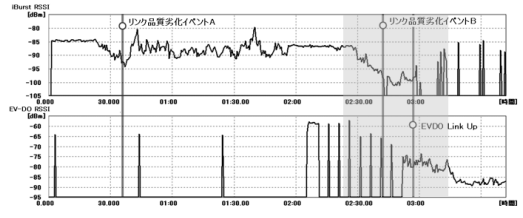


図 9 Make-After-GoingToBreak 手法 RSSI 値の変化

Fig. 9 Changes of RSSI in Make-After-GoingToBreak scenario.

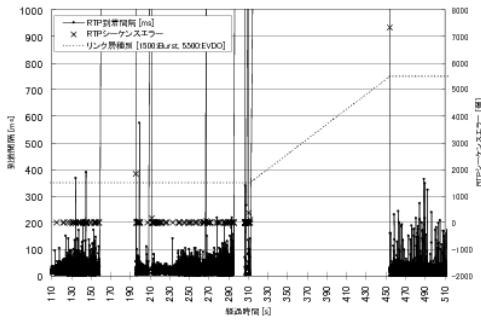


図 7 Make-After-Break 手法 MNN が受信した RTP パケットのトレース

Fig. 7 Downlink RTP packets trace in Make-After-Break scenario.

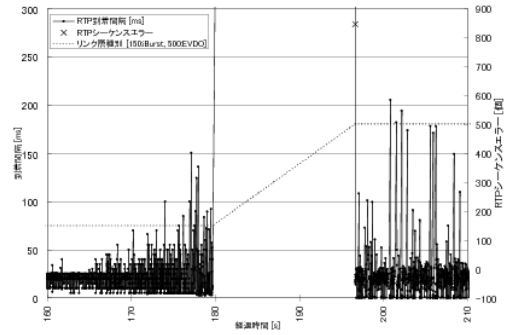


図 10 Make-After-GoingToBreak 手法 MNN が受信した RTP パケットのトレース

Fig. 10 Downlink RTP packets trace in Make-After-GoingToBreak scenario.

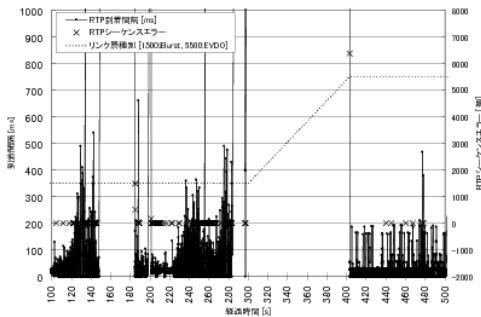


図 8 Make-After-Break 手法 CN が受信した RTP パケットのトレース

Fig. 8 Uplink RTP packets trace in Make-After-Break scenario.

パケットのシーケンス番号との差から 1 を引いた数で表しており、これが正の数の場合にはその数だけパケットロスが発生しており、負の数の場合にはパケットの追い越しが発生していることを表している。リンク層種別は利用している通信媒体が、iBurst であるのか EV-DO であるのかを示している。

6.1 Make-After-Break 手法の実験結果

図 6 は、Make-After-Break 手法の実験での、iBurst および EV-DO の RSSI 値の変化とイベント発生タイミングを表している。この実験では、iBurst の PPP 接続が切断して Link Down イベントが発生した時点で EV-DO の接続を開始し、EV-DO Link Up イベント

で EV-DO の接続確立が確認されると、新経路として EV-DO に切り替えている。図 7、図 8 は、ハンドオーバー前後の MNN (Downlink) および CN (Uplink) における RTP パケット到着間隔を表している。通話断は 2 回確認でき、最初の通話断は切断時間が 37 秒およびこの間のパケットロスが 1,838 個観測された。その後 1 分程度は再び通話可能となり、次の通話断では切断時間が 160 秒およびパケットロスが 7,338 個観測された。Link Down イベントの発生には、iBurst の無線品質が劣化し PPP 接続がタイムアウトすることが必要だが、そのタイムアウトに時間がかかってしまっていることが分かる。

6.2 Make-After-GoingToBreak 手法の実験結果

図 9 は、Make-After-GoingToBreak 手法の実験での、iBurst および EV-DO の RSSI 値の変化とイベント発生タイミングを表している。この実験では、リンク品質劣化イベント B で iBurst を切断し、同時に EV-DO の接続を開始している。その後、EV-DO Link Up で EV-DO の接続が確認されると、新経路として EV-DO を使用している。図 10、図 11 は、ハンドオーバー前後の MNN (Downlink) および CN (Uplink) における RTP パケット到着間隔を示している。切断

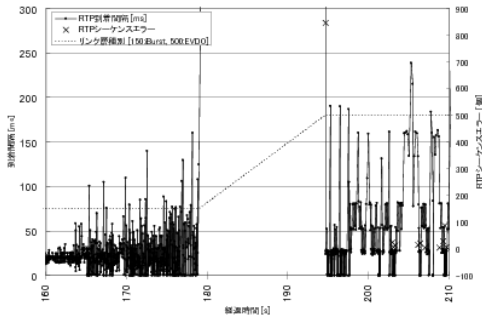


図 11 Make-After-GoingToBreak 手法 CN が受信した RTP パケットのトレース

Fig. 11 Uplink RTP packets trace in Make-After-GoingToBreak scenario.

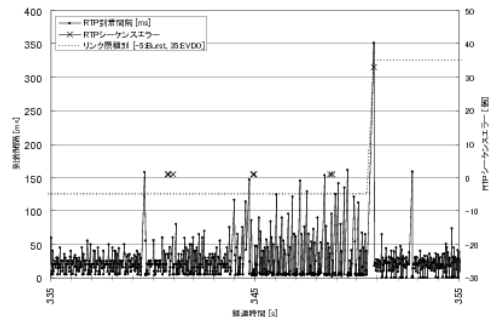


図 13 Make-Before-Break 手法 MNN が受信した RTP パケットのトレース

Fig. 13 Downlink RTP packets trace in Make-Before-Break scenario.

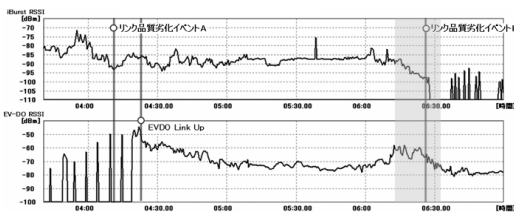


図 12 Make-Before-Break 手法 RSSI 値の変化

Fig. 12 Changes of RSSI in Make-Before-Break scenario.

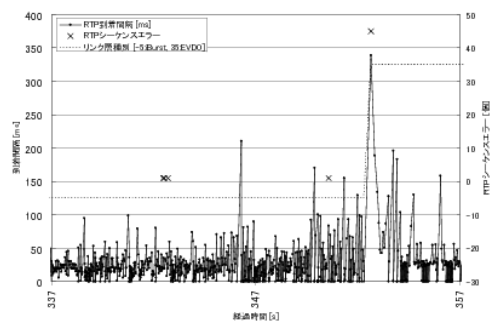


図 14 Make-Before-Break 手法 CN が受信した RTP パケットのトレース

Fig. 14 Uplink RTP packets trace in Make-Before-Break scenario.

時間として 16.9 秒、パケットロスとして 847 個が観測された。これは、ほぼ PPP の接続完了までにかかる時間であった。通常であれば、EV-DO の PPP 接続にかかる時間は通常 8 ~ 10 秒程度であるが、ここでは倍の時間がかかってしまっている。これは、接続開始時の EV-DO の無線状態が悪かったために、無線リンクの接続に時間がかかったものと考えられる。

6.3 Make-Before-Break 手法の実験結果

図 12 は、Make-Before-Break 手法の実験での iBurst および EV-DO の RSSI 値の変化とイベント発生タイミングを示している。この実験では、リンク品質劣化イベント A で EV-DO の接続を開始し、あらかじめ EV-DO の接続確立を確認したうえで、リンク品質劣化イベント B で EV-DO へ切り替える。

図 13, 図 14 は、ハンドオーバー前後の MNN (Downlink) および CN (Uplink) の RTP パケット到着間隔を示している。Downlink に関しては、RSSI の悪化にともない iBurst 側でジッタが大きくなっていたものが、EV-DO へハンドオーバーすることでジッタが小さくなり、安定した状態になっていることが見てとれる。このハンドオーバーにともない、350 ミリ秒程度の瞬断、33 個のパケットロスが観測された。Uplink に関しては、ハンドオーバー後もジッタが大きく、安定した状態にはなっていなかったことが見てとれる。こ

れは、Uplink の帯域が Downlink と比べて限られていることが原因としてあげられる。ハンドオーバーにともない、350 ミリ秒程度の瞬断、45 個のパケットロスが見られた。

Downlink の 33 個、Uplink の 45 個のパケットロスはソフトフォンでのデコード後の 660 ミリ秒、900 ミリ秒になるが、瞬断時間は Downlink, Uplink とも 350 ミリ秒である。これは、6.4 節で詳しく説明するが、ハンドオーバー前経路で累積した遅延の影響を受けているパケットと、新経路で即座に流れたパケットとの差であると考えられる。

6.4 Multihomed Make-Before-Break の実験結果

図 15 は、Multihomed Make-Before-Break 手法の実験における iBurst および EV-DO の RSSI 値の変化とイベント発生タイミングを表している。この実験では、リンク品質劣化イベント A で EV-DO の接続を開始し、あらかじめ EV-DO の接続確立を確認したうえで、2.2 節で説明した MCoA を利用して、iBurst を続けて利用しながら、EV-DO でのネットワーク層

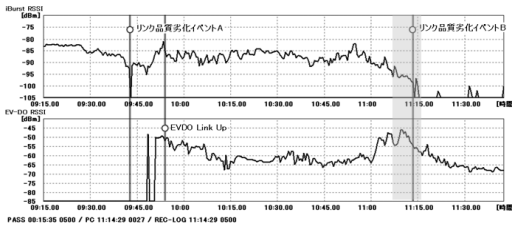


図 15 Multihomed Make-Before-Break 手法 RSSI 値の変化
Fig. 15 Changes of RSSI in Multihomed Make-Before-Break scenario.

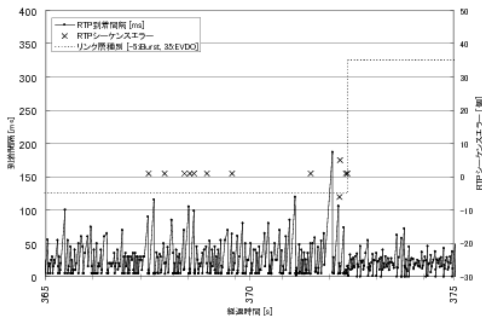


図 16 Multihomed Make-Before-Break 手法 MNN が受信した RTP パケットのトレース
Fig. 16 Downlink RTP packets trace in Multihomed Make-Before-Break scenario.

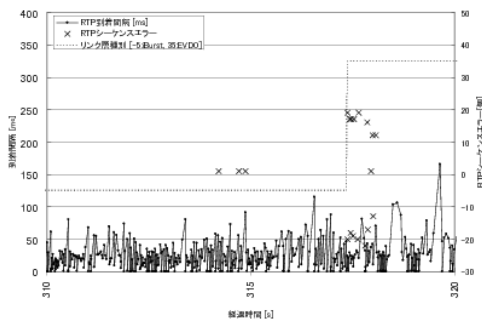


図 17 Multihomed Make-Before-Break 手法 CN が受信した RTP パケットのトレース
Fig. 17 Uplink RTP packets trace in Multihomed Make-Before-Break scenario.

的 (IP モビリティプロトコルの) 接続も同時に確立する。そして、リンク品質劣化イベント B で EV-DO の利用に切り替え、切替えが確認されたのちに、iBurst の接続を終了する。

図 16, 図 17 は、ハンドオーバー前後の MNN (Downlink) および CN (Uplink) の RTP パケット到着間隔を示している。Downlink に関しては、RSSI の悪化にともない iBurst 側でジッタが大きくなっていたものが、EV-DO へハンドオーバーすることでジッタが小さくなり、安定した状態になっていることが見てとれる。このハンドオーバーでは、パケットロスや瞬断は

表 3 リンク品質劣化イベント B 付近の R 値
Table 3 Value R around Threshold-B.

受信ノード	R 値	伝送遅延	ドロップ	ロス
MNN	26.40	960 ミリ秒	2%	0%
CN	-24.26	960 ミリ秒	44%	0%

観測されなかった。

Uplink に関しても同様で、ハンドオーバーにともなう瞬断やパケットロスは観測されなかった。ただし、ハンドオーバー後 500 ミリ秒程度の間、RTP シーケンスエラー大きく起こっている。これは、EV-DO 経由の数パケットが、iBurst 経由のパケットを追い越して CN に混在して届いていることが原因であった。

無線システム固有の遅延を考慮すると、良好な無線状態で、iBurst の RTT \approx 50 ミリ秒、EV-DO の RTT \approx 180 ミリ秒程度と、EV-DO の方が遅延が大きい。片側遅延を単純にこの半分と考えても、70 ミリ秒程度の遅延差がある。このため、良好な無線状態でハンドオーバーした場合、最後に受信する iBurst のパケットから最初に受信する EV-DO のパケットでは、この遅延分の瞬断が見られるはずではある。ところが、この実験では Downlink, Uplink とともに、その瞬断が見られていない。これは、ハンドオーバー直前に iBurst の品質が悪化して往路で累積遅延が発生している一方、新経路の EV-DO ではパケットの滞留がなく、遅延が相殺されているものと考えられる。さらに、Uplink の場合には、iBurst 側で累積遅延が顕著に発生したため、EV-DO でパケットを送信開始後も iBurst ネットワークに累積していたパケットが送信され、EV-DO でのパケットを追い越す結果となった。

次に、リンク品質劣化イベント B の直前に MNN もしくは CN で受信した 50 パケット (1 秒相当) 分の R 値を表 3 に示す。なお、RTP テスタの測定条件は、コーデック: G729, ジッタバッファ: 160-320 ミリ秒固定式, 固定遅延: 32 ミリ秒である。

リンク品質劣化イベント B の直前では、MNN-CN 間の往復時間が約 960 ミリ秒と大きくなっていた。Downlink では、パケットドロップ率が 2% と音声自体は途切れずに届いたものの、遅延が大きいため、R 値が 26.4 と低い値になっていた。また、Uplink では、パケットドロップ率が 44% とより大きいため、R 値もより低い -24.26 となっていた。実際に、音声品質は悪かった。

6.5 考察

6.5.1 IEEE802.21 を用いた IP モビリティシステムの動作確認について

本研究では、IEEE802.21 と IP モビリティの連携

方法について定義し, 3 章であげた 4 つの異なる手法が正しく動作することを実証実験によって証明した. VoIP を用いた通信でそれぞれの通信メディア切替え時の通話断時間を比較すると, Make-After-Break 手法では 160 秒, Make-After-GoingToBreak 手法では 16.9 秒, Make-Before-Break 手法では 350 ミリ秒, Multihomed Make-Before-Break 手法では通話断が観測されず, それぞれの手法で期待される結果が観測された. 特に, Multihomed Make-Before-Break 手法ではパケットロスも観測されず, スムースな通信メディアの切替えができた.

IEEE802.21 を利用するメリットの 1 つに, MIH User, 本研究の場合 IP モビリティスタックがメディア依存の実装をしなくてもよい点があげられる. ところが, 本実験では, メディア依存の情報である RSSI 値を MIH User が使用しているため, この点においてはメディア依存の実装になってしまった. しかしながら, RSSI 値を取得する方法自体は IEEE802.21 で規定されているメディア非依存な方法であり, iBurst でも EV-DO でも同様の方法でリンク層情報にアクセスすることができた.

6.5.2 リンク品質劣化イベントの妥当性について

5.2 節で述べたように, リンク品質劣化イベント A の閾値を, リンク品質劣化イベント B の閾値から 5 dBm より高い値として設定した. 実験では, リンク品質劣化イベント A の発生からリンク品質劣化イベント B の発生までに, 約 90 ~ 135 秒もかかった. EV-DO でネットワーク接続するために平均 8 秒 ~ 10 秒しかかからないことを考慮すると, この時間は長すぎる. そのため, リンク品質劣化イベント B の閾値から 5 dBm より高い値は, リンク品質劣化イベント A としては不適切であったといえる.

また, VoIP の品質が劣化し会話に障害が出始めるタイミングを, リンク品質劣化イベント B とした. VoIP トラフィックを解析した結果, ハンドオーバー直前の R 値は Downlink で 26, Uplink で -24 と低い値であり, VoIP の品質が劣化していたことが分かった. よって, リンク品質劣化イベント B の閾値とした -98 dBm は適切であったといえる.

今回は RSSI 値のみでリンク品質の劣化を判断したが, そのほかの無線情報も利用することで, より正確にリンク品質の変化を把握できることが分かっている⁶⁾⁻¹⁰⁾. 今後, これらの先攻研究も参考にし, より適切なリンク品質劣化イベントの設定方法を議論していきたい.

本実験ではドライバを改変できない制約上, 定期的

にリンク層情報を取得しリンク品質劣化イベントを発生させるといったポーリング型の方法をとった. あらかじめ閾値を設定しその閾値を超えたことを通知させるといったプッシュ型の方法も今後検討していきたい.

7. 結 論

本研究では, スムースハンドオーバを実現する IP モビリティシステム上でリンク層情報の扱い方を整理し, 現在標準化中である IEEE802.21 (メディア非依存ハンドオーバーサービス) がそれを満たしうるか検証を行った.

現在利用もしくは提案されている 4 つの通信メディア切替え手法を解析した結果, 現状の IEEE802.21 では, 単一の品質劣化通知イベントしか定義されていない点, また, 明示的にネットワーク層からリンク層のセットアップ開始/切断を実行できない点で不十分であることが分かった.

本研究では, これらの不十分なサービスを新たに定義し, IEEE802.21 と連携する IP モビリティシステムを設計実装した. その実装を用いて実証実験を行い, IEEE802.21 を用いた IP モビリティシステムが正しく動作することを証明した. また, 自動車内への VoIP トラフィックに対するメディア切替えの影響を調べると, 特に Multihomed Make-Before-Break 手法では, パケットロスが観測されず, スムースな通信メディアの切替えができることが確認できた.

よって, 本研究により, 統一的なリンク層インタフェースを用いる異種メディア間スムーズハンドオーバが実現できた.

参 考 文 献

- 1) Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, IETF, RFC3775 (2004).
- 2) Devarapali, V., et al.: Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol, IETF, RFC3969 (2005).
- 3) Wakikawa, R., et al.: Multiple Care-of Address Registration, IETF, draft-ietf-monami6-multiplecoa (As of Mar. 2006).
- 4) Shima, K., et al.: Operational Experiment of Seamless Handover of a Mobile Router using Multiple Care-of Address Registration, *Journal of Networks*, Vol.1, Issue 3, Academy Publisher (July 2006).
- 5) Shima, K., et al.: SHISA: The Mobility Framework for BSD Operating Systems, *IPv6 Today Workshop - Technology and Development* (Aug. 2006).

- 6) McNair, J. and Fang, Z.: Vertical handoffs in fourth-generation multinet environments, *IEEE Wireless Communications*, Vol.11, Issue 3, pp.8–15 (June 2004).
- 7) Wang, H.J., et al.: Policy-Enabled Handoffs Across Heterogeneous Wireless Networks, *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications*, p.51 (Feb. 1999).
- 8) Fang, Z. and McNair, J.: Optimizations for vertical handoff decision algorithms, *IEEE WCNC 2004*, Vol.2, pp.867–872 (Mar. 2004).
- 9) Zhang, Q., et al.: Efficient mobility management for vertical handoff between WWAN and WLAN, *IEEE Communications Magazine*, Vol.41, Issue 11, pp.102–108 (Nov. 2003).
- 10) Guo, C., et al.: A seamless and proactive end-to-end mobility solution for roaming across heterogeneous wireless networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.22, Issue 5, pp.834–848 (June 2004).
- 11) Media Independent Handover Services, IEEE, P802.21/D01.00 (As of Mar. 2006).
- 12) Mussabbir, Q.B., et al.: Optimized FMIPv6 handover using IEEE802.21 MIH services, *ACM, Mobicarch*, San Francisco CA, pp.43–48 (2006).
- 13) Dutta, A., et al.: Seamless Handover Across Heterogeneous Networks – An IEEE802.21 Centric Approach (May 2006).
<http://www1.cs.columbia.edu/~dutta>
- 14) Shima, K., et al.: SHISA: The Mobile IPv6/NEMO BS Stack Implementation Current Status, *Asia BSD Conference*, Tokyo, Japan (Mar. 2007).
- 15) Lorchat, J., et al.: A NetBSD-based IPv6 NEMO Mobile Router, *Asia BSD Conference*, Tokyo, Japan (Mar. 2007).
- 16) Teraoka, F., et al.: Unified L2 Abstractions for L3 Handover, IRTF, draft-irtf-mobopts-l2-abstractions (As of Mar. 2007).
- 17) 後郷和孝ほか：リンク層情報を利用したネットワーク層主導高速ハンドオーバー機構の設計と実装，モバイルマルチメディア通信研究会（MoMuC）(May 2005).
- 18) Koodli, R. (Ed.): Fast Handovers for Mobile IPv6, IETF, RFC4068 (2005).
- 19) Dutta, A., et al.: MPA assisted Optimized Proactive Handoff Scheme, *ACM, Mobiculous* (2005).

(平成 19 年 4 月 2 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



三屋光史朗

2002 年慶應義塾大学環境学部卒業。2004 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科前期博士課程修了。現在、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程在学。



北地 三浩

1998 年東京理科大学理学部応用物理学科卒業。2000 年東京大学大学院理学系研究課物理学専攻修士課程修了。同年京セラ（株）入社。現在は IP モビリティの研究に従事。



長澤知津子

2005 年同志社大学工学部知識工学科卒業。同年京セラ（株）入社。以降、IP モビリティの研究に従事。



守田 空悟

1989 年岩手大学工学部情報工学科卒業。1991 年岩手大学大学院修了課程修了。同年京セラ（株）入社。以来、画像処理、無線通信技術の研究・開発に従事。



横田 知好

1983 年名古屋大学理学部化学科卒業。同年京セラ（株）入社。AAA (Adaptive Array Antenna) を用いた通信機器の研究開発を経て、現在は IP モビリティの研究に従事。



湧川 隆次

2004 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程修了。2005 年慶應義塾大学環境情報学部専任講師。現在、移動体無線通信システムの研究に従事。ACM sigmobile,

IEEE 会員。



村井 純 (正会員)

1984 年慶應義塾大学大学部理工学研究科博士課程修了。1990 年慶應義塾大学環境情報学部助教授を経て 1997 年より同学部教授。1999 年慶應義塾大学 SFC 研究所所長。1984 年 JUNET を設立, 1998 年に WIDE プロジェクトを設立し, 今日までその代表として指導にあたる。
