

# IP モビリティ実験のための無線環境エミュレータの試作

神谷 弘樹<sup>†1</sup> 渋谷 理恵<sup>†1</sup> 寺岡 文男<sup>†1</sup>

<sup>†1</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科

本研究ではハンドオーバー処理に関するプロトコルの実験や評価に実際の無線アクセス技術を用いることが困難な点に着目し、実際の無線アクセス技術を用いることなくリアルタイムにハンドオーバー実験を行うことのできるツールとして無線環境エミュレータを開発した。無線アクセス技術を用いたハンドオーバー実験の要求事項を具体的に整理した上で、無線環境エミュレータの必要性を検討し、その設計、実装を述べ、実際の応用例を紹介する。無線環境エミュレータはシナリオに基づいて仮想的な無線リンクの特性や接続状態を変化させるだけでなく、物理情報プロトコルを利用して無線リンク状態に関する情報を移動端末に提供することができるという特徴を持つ。

## Experimental Implementation of the Wireless Environment Emulator for IP Mobility Experiment

Koki MITANI<sup>†1</sup> Rie SHIBUI<sup>†1</sup> Fumio TERAOKA<sup>†1</sup>

<sup>†1</sup> Graduate School of Science and Technology, Keio University.

In this research, the Wireless Environment Emulator was developed as a equipment which can conduct a handover experiment on real time without using actual wireless access technology. After summerizing concretely requirements of a handover experiment using wireless access technology, we examine the nessesity of the Wireless Environment Emulator, describe its design and implementation, and introduce its actual example of application. The Wireless Environment Emulator has the feature it not only changes characteristic and connection state of a virtual wireless link based on a scenario, but that it can provide a mobile node with the information about a wireless link state using a physical information protocol.

### 1 はじめに

無線 LAN に代表される多様な無線アクセス技術の普及に伴い、移動しながらインターネットを利用するための IP モビリティ技術の需要が高まりつつある。そして IPv6 や Mobile IP [1]、NEMO [2] など、移動時に通信を継続するための様々なプロトコルが標準化、実用化に向けて提案されている。これらのプロトコルはノードやネットワークが移動し、異なるサブネットへ接続を切替えるハンドオーバーの際に通信継続性を実現するプロトコルとして設計されており、局所的な移動透過性つまりハンドオーバー時のシームレスな通信の実現にはさらなる改良が必要とされている。代表的な改良手法には、ネットワーク層における制御トラフィックの抑制(階層化方式)やパケット損失の回避(転送方式)のほか、リンク層の情報をネットワーク層のハンドオーバー処理のきっかけとして用いる手法(L2 Trigger)が提案されている。

本研究ではハンドオーバー処理に関するプロトコルの実験や評価に実際の無線アクセス技術を用いることが難しいという点に着目した。そして、実際の無線アクセス技術を用いることなくリアルタイムにハンドオーバー実験を行うことのできるツールとして無線環境エミュレータを開発した。本研究では無線アクセス技術を用いたハンドオーバー実験の要求事項を具体的に整理した上で、無線環境エミュレータの必要性を検討し、その設計、実装を述べ、応用例を紹介する。

### 2 要求事項

無線アクセス技術によるハンドオーバーを伴う IP モビリティ実験を行う際の要求事項を整理する。前提として、移動端末と任意のアクセスポイント間が無線アクセス技術によって随時接続・切断し、複数のアクセスポイントが静的にインターネットへ接続していることを想定する。

## 2.1 ハンドオーバーの分類

まず、IP モビリティ実験におけるハンドオーバーはリンク層とネットワーク層を分離して考える。ネットワーク層ハンドオーバーとは、リンク層ハンドオーバーの結果として、移動端末が接続するサブネットや IP アドレスを変更し位置登録等を行う処理を指す。リンク層ハンドオーバーとは、移動端末のインターネットへの接続点を変更する処理を指す。また、リンク層とネットワーク層のハンドオーバーは必ずしも連動しない。例えばリンク層ハンドオーバーが発生しリンク層が接続する無線基地局を変更しても、ネットワーク層が接続するアクセスルータが変化しない場合はネットワーク層ハンドオーバーは発生しない。このような状況は、1 台のアクセスルータに対し複数の無線基地局がブリッジとして接続する際に発生する。

さらに、リンク層ハンドオーバーは Horizontal Handover、Vertical Handover の 2 種類に分類できる。移動端末の搭載する単一のネットワークインタフェースが接続する無線基地局などを通信中に変更することを Horizontal Handover、移動端末が複数のネットワークインタフェースを搭載し、使用するネットワークインタフェースを通信中に変更することを Vertical Handover と呼ぶ。これらのハンドオーバー形態は、リンク層ハンドオーバーという観点では動作が大きく異なるが、ネットワーク層ハンドオーバーの観点では接続するサブネットや IP アドレスの変更を必要とするという点で等しく扱うことができる。

次にハンドオーバーの瞬間の通信形態について考える。現在の通信を中断して新しい接続の確立を開始する完全切替方式、現在の通信を継続中に新しい接続の確立を開始する同時接続方式の 2 種類がリンク層、ネットワーク層それぞれに存在する。特にリンク層は無線通信方式の制約による影響が大きく、Horizontal Handover の場合、無線 LAN のインフラストラクチャモードが完全切替方式、アドホックモードが同時接続方式に相当する。Vertical Handover の場合は特に制約はない。また、特に新旧の両接続において同時に同じ内容のケットもしくはフレームを冗長に送受信する方式があり、Soft Handover と呼ぶ。

## 2.2 ネットワーク構成

図 1 に Mobile IP の場合のネットワーク構成例を示す。2.1 節で分類したハンドオーバーの実験に必要な要素としては、アクセスルータ (Access Router)、無線基地局 (PEER)、移動端末 (Mobile Node)、およびインターネットへの接続性が考えられる。図 1 では通信相手 (Correspondent Node) と通信可能なインターネット上に複数のアクセスルータが存在し、各アクセスルータに対して 1 台以上の無線基地局が静的に接続している。アクセスルータはそれぞれ異なるサブネットを構成し、無線基地局はリンク層のブリッジとして機能する。そして、1 台以上の移動端末が 1 種類以上の無線ネットワークインタフェースを使用し無線基地局に対し動的に接続や切断 (ハンドオーバー) を行う。

図 1 のようなネットワーク構成には次の 3 点の特徴がある。第一に、アクセスルータと無線基地局の対応を 1 対多と定義したため、ネットワーク層とリンク層のハンドオーバーの対応を柔軟に設定することができる。第二に、移動端末が複数の種類のネットワークインタフェースを持ち、接続先の候補と

なる無線基地局が複数存在するため、Horizontal Handover と Vertical Handover の両方を実現できる。第三に、無線通信方式と IP モビリティ関連プロトコルの組合せを任意に設定することで様々なハンドオーバーの瞬間の通信形態を実現できる。このような特徴から、本節で述べるネットワーク構成はハンドオーバーを伴う IP モビリティ実験に適している。ただし、複数の無線基地局の設置が必要となるため、やや広いスペースを必要とするほか、その物理的な配置について慎重に検討する必要がある。

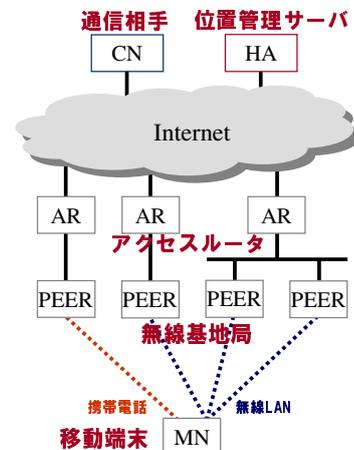


図 1: ハンドオーバー実験に必要なネットワークの構成例

図 1 は位置管理サーバ (Home Agent) が存在するなど Mobile IP の特定の状況を想定しているが、ハンドオーバー実験のためのネットワーク構成はネットワーク層のプロトコルとは関係なく応用することができる。

## 2.3 実験の自動化と環境の再現

IP モビリティ実験においては頻りに端末を移動させてハンドオーバーを発生させる必要がある。また、何度も同じ実験を繰り返して情報を収集することも必要と考えられる。実用段階では任意の環境において手動で移動し動作を確認する必要があるものの、実験段階ではある程度単純化された環境の中で自動的かつ再現性のある実験を行う方が有意義なデータを収集することができる。そして、実ネットワーク上でリアルタイムに実験を行う場合は、自動で端末を繰り返し移動させる、もしくは無線アクセス部分の電波強度等のパラメータを自動で操作して疑似的な移動を再現する必要がある。また、無線による通信は周囲の電波環境や障害物の影響を受けるため、周囲の環境が不確定な要素とならないよう考慮する必要がある。したがって、無線技術を伴う実験を再現可能な形で行いたい場合は特殊な環境や専用の装置を用意することが望ましい。

## 2.4 無線リンク特性の変化

IP モビリティ実験において、移動端末・アクセスルータ間の無線リンクの存在は大きな意味を持つ。様々な無線アクセス技術はそれぞれ帯域が異なり、信号やノイズの強弱により

フレーム損失、フレームの伝送遅延などが発生する。まれにフレームの重複、順序の逆転などが生ずることも知られている。さらに、これらの無線リンクの特性は移動や周囲の環境の影響を受け、時間とともに変化する。そのため、無線リンク特性の変化を無視して IP モビリティ実験を行うことは難しい。

## 2.5 無線リンク状態に関する情報の利用

IP モビリティを最適化する手法としてリンク層の情報を利用する手法が期待されていることは 1 章で述べた。リンク層では無線リンク状態を情報として保持しており、これを必要に応じてネットワーク層に提供することで無駄の少ない移動検知や移動予測を実現できる。IETF では DNA (Detecting Network Attachment) WG、IEEE では IEEE802.21[3] (Media Independent Handoff Working Group) において議論され、様々な検討がなされている。IP モビリティ実験を行う際には無線リンク状態に関する情報の扱いを考慮する必要がある。しかし前述したように、無線アクセス技術に密接に関連した IP モビリティプロトコルについて再現性のある実験をリアルタイムに行うことは容易ではない。

## 3 無線環境エミュレータの必要性

2 章では無線アクセス技術によるハンドオーバを伴う IP モビリティ実験を行う際の要求事項を整理した。結果として、リアルタイムに実ネットワークで実験を行う場合、実際の無線アクセス技術を実験に用いるのは容易ではないということが判明した。理由には次の 3 点が挙げられる。第一に、複数の無線基地局の設置は空間と配置に大きく影響を受けるため、任意の状況をつくり出すのは困難と考えられる。第二に、頻繁なハンドオーバを再現するためには自動的な端末や無線基地局の操作と、環境による不確定要素の影響を受けない特殊な空間を必要とする。第三に、任意のリンク特性を実際の電波を制御して実現することは容易ではない。いずれの理由も代替手段として無線環境エミュレータを開発する根拠になり得ると考えられる。また、2 章で述べた要求事項は無線環境エミュレータに対する要求事項とみなすことができる。

## 4 無線環境エミュレータの設計

本章では、無線環境エミュレータを利用したネットワークの構成例、および無線環境エミュレータの内部構成と各機能の詳細について解説する。

### 4.1 ネットワーク構成

本研究ではハンドオーバ処理に関するプロトコルの実験や評価に実際の無線アクセス技術を用いることが困難な点に着目したことは 3 章で述べた。そこで、本研究では無線アクセスの部分置き換えのように無線環境エミュレータを設計した。無線環境エミュレータを利用したネットワークの構成例を図 2 に示す。図 2 で示すように、無線環境エミュレータはアクセッスルータと移動端末に対して有線で接続する。原則として、アクセッスルータに対してはそれぞれ 1 本のケーブルで接続し、移動端末に対しては移動端末が保持すると想定する無線ネットワークインタフェースの数だけケーブルで接続する。

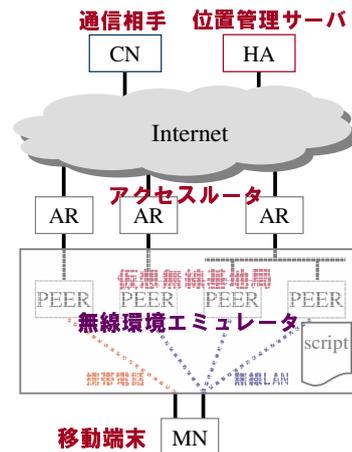


図 2: 無線環境エミュレータ使用ネットワークの構成例

### 4.2 物理情報プロトコルの導入

無線環境エミュレータは、無線基地局の接続する有線ネットワークから移動端末に搭載する無線ネットワークインタフェースまでを全て 1 台のコンピュータに収めた装置といえる。このような構成はエミュレータの観点からは理想的だが、移動端末側に無理を生じている。移動端末とその無線ネットワークインタフェースが不必要に分離されてしまう構成のため、移動端末はエミュレータの再現する仮想無線ネットワークインタフェースの状態を取得、変更することができない。

そこで、本研究では物理情報プロトコルという情報伝達の仕組みを設計した。物理情報プロトコルでは物理情報パケットを送受信することで無線リンク状態などの制御情報を交換する。そして、物理情報パケットをケーブル上で伝送するために制御フレームを導入した。制御フレームには無線リンク特性のエミュレーションは一切適用されない。

物理情報プロトコルでは、無線環境エミュレータから移動端末に対し、各仮想無線基地局の識別子と通信品質、接続・切断の状態を通知できる。また、移動端末から無線環境エミュレータに対し、接続・切断、仮想無線基地局のリスト (スキャン) を要求できる。ただし、この機能を利用するためには移動端末側に変更を加える必要がある。また、制御フレームは 2 台以上の無線環境エミュレータの同期処理にも用いられる。

### 4.3 フレームの中継と送受信

無線環境エミュレータによるフレーム中継、およびフレーム生成の設計を図 3 に示す。

無線環境エミュレータ (Emulator) は、通常のデータフレームに対してはリンク層の特殊なブリッジとして機能し、ネットワーク層以上の処理は一切行わない。例えば移動端末がのトランスポート層がセグメントを送受信する場合、無線環境エミュレータのリンク層ブリッジ、アクセッスルータのネットワーク層の経路制御が中継点として機能する (図 3 黒実線、右灰実線)。無線環境エミュレータのブリッジは、無線リンクをエミュレートする機能を備えている。その機能とは、フレー

ムの扱い方を変化させてリンク特性を再現する、ブリッジの接続先を異なるアクセスルータに変更してネットワーク層ハンドオーバを再現する、などがある。

また、無線環境エミュレータは制御フレームに関しては中継ではなく送信と受信を行う。無線環境エミュレータと移動端末 (Mobile Node) 間の制御フレームの交換は図 3 に点線で示されている。その結果として、移動端末が制御フレームから得た無線リンク状態に関する情報が、上位層の処理のきっかけ (L2 Trigger) として利用できる場合の情報伝達を図 3 左側の灰色の 2 本の実線で示した。

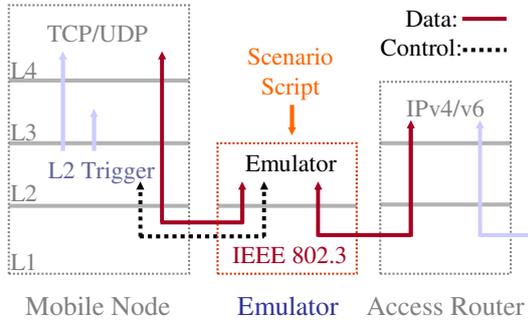


図 3: 無線環境エミュレータの設計

#### 4.4 無線リンク特性の再現

無線環境エミュレータがデータフレームを中継する際の仮想無線リンクの特性は、各リンクについてそれぞれ帯域、フレーム損失率、フレーム伝送遅延を設定できる。帯域は 1bps 以上任意に設定できるが最大は実行環境に制限される。フレーム損失率とフレーム伝送遅延は一定値、一様分布、正規分布、対数正規分布のいずれかを任意の値とともに指定できる。

#### 4.5 シナリオによる自動実行

IP モビリティ実験を再現可能な形で実現するには、あらかじめシナリオを定義する必要がある。無線環境エミュレータでは設定、イベント、制御の 3 種類の記述が可能となっている。シナリオを実行すると、最初に設定の記述が読み込まれる。次に、時刻と連動してイベントや制御の記述が順次読み込まれ、実験に必要な現象を発生させる。追加的な機能として、シナリオを実行する代わりに手動で対話的に実験を行うこともできる。以下、シナリオの記述の詳細を例とともに説明する。

```

シナリオの例
setmnif mnif=em0 mnid=0 //設定
setarif arif=em1 arid=0
setpeer mnid=0 arid=0 num=1
setlink mnid=0 peer=0.0 bw=11M err=1,-1
000000000 connect mnid=0 peer=0.0 //イベント
000010000 quality mnid=0 peer=0.0 val=70
000020000 disconnect mnid=0 peer=0.0
000030000 end //制御

```

#### 4.5.1 設定

設定に関する記述としては、ネットワークの構成、仮想的な無線リンク特性の初期設定が挙げられる。ネットワーク構成の設定はネットワークインタフェースの定義、仮想無線基地局の定義の 2 段階になっている。第 1 段階では、無線環境エミュレータが搭載するネットワークインタフェースの接続先をアクセスルータと移動端末のどちらかに分類し、それぞれに識別子を定義する。第 2 段階では、アクセスルータと接続したネットワークインタフェースそれぞれに対して仮想的な無線基地局を 1 台以上定義し、各仮想無線基地局に識別子を付与する。実験では、移動端末と接続したネットワークインタフェースと仮想無線基地局の間の仮想的な無線リンクに対してイベントなどを発生させる。また、無線環境エミュレータ・移動端末間では通常データフレームに加えて無線リンク状態に関する制御フレームを交換するため、両フレームを異なるケーブルを通じて伝送する設定も可能となっている。

#### 4.5.2 イベント

イベントは時刻とともに記述する。代表的なイベントには接続先の変更や切断、リンク特性の変化がある。ただし、接続先の変更や切断は移動端末主導で行われるべきであり、移動端末が無線環境エミュレータへ制御フレームを送信して変更することが可能となっている。

#### 4.5.3 制御

シナリオの実行を制御する記述としては、繰り返し、中断、実行中の状態初期化、2 台目の無線環境エミュレータとの同期などが挙げられる。無線環境エミュレータは 1 台では搭載できるネットワークインタフェース数に限りがあるため、2 台を接続し同期的に実験を行えるよう設計されている。

### 5 実装

無線環境エミュレータは複数の有線ネットワークインタフェースを搭載する 1 台の PC 上に実装された。その他の実装としては、有線ネットワークインタフェースをあたかも無線ネットワークインタフェースのように扱い、物理情報プロトコルを理解するよう移動端末に対して変更を加える必要があるが、アクセスルータ等への変更の必要はない。

#### 5.1 実装環境

無線環境エミュレータとして使用するコンピュータは 3.2GHz の Pentium4 プロセッサ、2GBytes のメモリ、4 ポートの Gigabit Ethernet (1000BASE-T)、4 ポートの Fast Ethernet (100BASE-TX) を搭載する。OS は FreeBSD5.1-RELEASE 上に dummynet を有効にしたカーネルを基礎として用いる。無線環境エミュレータはユーザ空間とカーネルの両方に変更を加える形で実装されている。

#### 5.2 実装設計

図 4 に無線環境エミュレータの実装の構成を示す。無線環境エミュレータ (Emulator) はカーネル内の拡張 DUMMYNET (Extended DummyNet) モジュール、ユーザ空間のイベント生成 (L2 Event Generator) モジュールの 2 部で構成されて

いる。カーネル内の拡張 DUMMYNET はアクセスルータ・移動端末間のデータフレーム中継処理のみを担当する。中継においては帯域の制限、フレーム損失、フレーム伝送遅延が設定に応じて適用される。無線リンクの接続の切り替えは 2.1 節で定義した完全切替方式のみをサポートするが、同時接続方式についても機能追加を検討している。ユーザ空間のイベント生成モジュールはテキストで記述されたシナリオを読み込み、一旦バイナリ化してから実行する。そしてシナリオに応じて拡張 DUMMYNET の設定変更、BPF を介した制御フレームの送受信などを行う。制御フレームにはタイプフィルドの値を変更した特殊な Ethernet フレームを使用した。

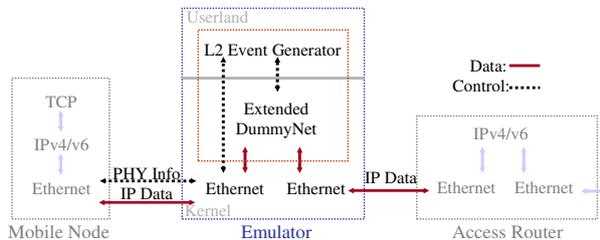


図 4: 無線環境エミュレータの実装

## 6 応用例

本章では、無線環境エミュレータの応用例を紹介する。

### 6.1 Horizontal Handover 実験

Mobile IP や NEMO を用いた単純な移動のデモンストレーションとして、Horizontal Handover を繰り返し行う実験に無線環境エミュレータを使用する例について紹介する。最小構成では無線環境エミュレータを 1 台の移動端末および 2 台のアクセスルータと合計 3 本のケーブルを用いて接続することで、移動端末が単一のネットワークインタフェースを用い 2 箇所のサブネット間を移動するハンドオーバー実験が可能となる。また、リンク特性の設定を変更することで様々な状況を容易に再現できる。複数のリンクの帯域とフレーム伝送遅延を変えて設定することにより疑似的に通信相手までの伝送経路の違いを再現できるほか、フレーム損失率の分布や値を時系列とともに変化させることでより現実に近い無線アクセスを利用した移動を再現することができる。当然ながら、用途に応じてより複雑な実験も可能となっている。2004 年 3 月より、主に上記のデモンストレーションの目的で、IPv6 モビリティの実現を目指す Nautilus6 Project[4] のテストベッドに無線環境エミュレータが導入されている。

### 6.2 リンク層情報利用ハンドオーバー実験

リンク層情報を利用した IP モビリティプロトコルの実験に無線環境エミュレータを使用する例について紹介する。2004 年 2 月、抽象化したリンク層情報をネットワーク層で用いることにより、無線リンク状態に応じてネットワーク層主導で接続する無線基地局を切り替える実験を行った。ネットワーク層プロトコルには LING6 を用いた。この実験は 6.1 節と同じ

形態のネットワーク構成で実現できるが、移動端末はリンク層情報を利用するメカニズムを備えている必要がある。慶応義塾大学の寺岡研究室ではレイヤ間情報交換アーキテクチャ MITAC[5] をさらに改良し LIES を提案しており、移動端末のカーネル内には LIES の無線環境エミュレータ対応版を、ユーザ空間には無線リンクを状況に応じて切り替えるためのデーモン (swd) を搭載した。swd の論理的な位置付けはネットワーク層となっている。

ネットワーク層主導ハンドオーバーに関する実験の流れは次のようになっている。まず、シナリオでは 2 台のアクセスルータに対しそれぞれ仮想無線基地局を定義し、一方の電波強度を徐々に下げ、他方の電波強度を徐々に上げていく。同時に、無線環境エミュレータは移動端末に対し、電波強度など無線状態に関する情報を物理情報プロトコルを利用して随時伝達する。次に、移動端末は受信した物理情報を LIES を通じてリンク層情報としてネットワーク層に伝達する。そして移動端末のネットワーク層は無線基地局の切り替えを判断し、必要だと判断した場合はその決定を再び LIES と物理情報プロトコルを介して無線環境エミュレータへ伝達する。最後に、無線環境エミュレータは接続の切り替えを実行する。

上記の例はネットワーク層主導ハンドオーバーの実現に向けた実験の一例に過ぎないが、ほぼ同様の仕組みを用いることでリンク層ハンドオーバーの発生をあらかじめ予測し、その情報を利用するといった実験を容易に実現できる。このような機構は Mobile IP に転送方式とリンク層情報を用いる改良を加えた FMIP[6] などのプロトコルの実験に有用と考えられる。

### 6.3 Vertical Handover 実験

Vertical Handover 実験に無線環境エミュレータを利用する例について紹介する。Vertical Handover は実際には移動端末内部で使用するネットワークインタフェースを切り替えるハンドオーバーなので、無線環境エミュレータはそれぞれの無線リンクを提供するが、Vertical Handover そのものには直接関係しない。ネットワーク構成は移動端末が複数の無線ネットワークインタフェースを搭載するため、無線環境エミュレータと移動端末を図 2 のように複数のケーブルで接続する。移動端末が同時に複数のネットワークインタフェースで通信を行うことも想定し、無線環境エミュレータは同時に 2 つ以上の仮想的な無線リンクで通信が行うことができる設計となっている。ハンドオーバーのポリシーや具体的な手段については移動端末の実装に依存するが、現在は方式を検討している段階にある。

## 7 考察

本研究で試作した無線環境エミュレータを使用する利点と欠点を整理する。

まず、利点としては次の 3 点が挙げられる。第一に、無線装置部以外は実際に近いネットワーク構成で Horizontal Handover や Vertical Handover など様々なハンドオーバー実験をリアルタイムに行うことができる。第二に、実際の無線装置を使用しないため、特殊な無線実験装置や環境なしにリンク特性の制御と状況の再現が可能なハンドオーバー実験を自動的に行うことができる。第三に、リンク層情報を必要とす

るネットワーク層プロトコルに必要な物理情報の生成が可能となっている。これらの利点は本研究の目的に沿った特徴といえる。

次に、欠点としては次の3点が挙げられる。第一に、無線リンク部分以外を実際のネットワーク構成に合わせたため、無線環境エミュレータが必要とするネットワークインタフェース数が多く接続数に限界がある。第二に、定義した仮想無線基地局の数、アクセスマルチメディアや移動端末の接続数、イベントの発生頻度、中継するフレームの量などの要因により処理能力の限界に達した場合、通信のボトルネックとなる可能性がある。第三に、無線リンク特性が単純な分布しか考慮されておらず、現実に必ずしも忠実ではない。第一と第二の欠点に関しては実用上許容可能だが、第三の欠点に関しては、さらなる調査が必要と考えられる。

## 8 関連研究

既存のIPネットワークエミュレータは、実ネットワークを用いることなくリアルタイムに機能や性能を評価できるツールとして、ネットワークアプリケーション開発などに広く利用されている。このようなIPネットワークエミュレータは有線系のネットワークを想定しており、そのための帯域の制御機能、パケット損失や伝送遅延を発生させる機能を持っている。さらに、無線LAN環境のエラー特性を考慮したIPネットワークエミュレータ [7] が株式会社 KDDI 研究所により開発されている。無線LANを多段に接続した実ネットワークで発生するエラー特性をほぼ忠実に再現できるという特徴を持つ。

移動端末・アクセスマルチメディア間の無線アクセスの部分に着目し、無線リンクをエミュレートする装置としてリンクエミュレータ [8] が株式会社 NTT ドコモによりテストベッドの一部として開発されている。帯域とハンドオーバーの頻度を指定できるという特徴を持つ。本研究で試作した無線環境エミュレータとは仮想無線基地局の定義手法、ハンドオーバー形態、物理情報プロトコルなどの点において異なっている。また、リンク層情報を利用したハンドオーバーをエミュレートする装置として Wireless Handover Emulator が DoCoMo Communications Laboratories USA, Inc. によりテストベッドの一部として開発されている。詳細は公開されていない。

## 9 まとめ

本研究では無線アクセス技術によるハンドオーバーを伴うIPモビリティ実験の要求事項を具体的に整理し、実際の無線アクセス技術を実験に用いることが困難な点に着目した。そして、実際の無線アクセス技術を用いることなくリアルタイムにハンドオーバー実験を行うことのできるツールとして無線環境エミュレータを開発した。

無線環境エミュレータは実際の無線装置全てを置き換える形で設計され、仮想的な無線基地局を内部的に複数定義して使用する。特徴として、シナリオによるネットワーク構成の定義とイベントの自動実行ができる、無線リンク特性を帯域、フレーム損失率、フレーム伝送遅延に関して分布と値を設定できる、移動端末が物理情報プロトコルにより無線リンク状態を取得、操作できる、の3点が挙げられる。また、無線環境エミュレータの欠点としては物理的な接続点の多さ、処理

の集中による過負荷等の装置としての限界の他に、無線リンク特性の忠実さに問題が残る。

応用例としては単純な Mobile IP や NEMO ハンドオーバーのデモンストレーション、リンク層情報を用いたネットワーク層手動ハンドオーバー実験を行い、無線環境エミュレータを実際に使用した。また、Vertical Handover 実験など、今後はさらに無線環境エミュレータを使用した IP モビリティ実験を行い、プロトコルについての評価を行いたい。

## 謝辞

無線環境エミュレータの開発は Nautilus6 Project [4] の活動として実施し、株式会社創夢の井上潔様、株式会社エムメディアの武内信夫様、株式会社インターネットオートモビリティ研究所の植原啓介様にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", Internet Draft, IETF, Jun. 2003. work in progress.
- [2] Devarapalli, et al., "Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol", Internet Draft, IETF, Dec. 2003. work in progress.
- [3] <http://www.ieee802.org/handoff/>
- [4] <http://www.nautilus6.org/>
- [5] 神谷弘樹, 國司光宣, 寺岡文男, "リンク層情報を利用した高速ハンドオーバー支援機構の設計と実装", 情報処理学会マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム論文集, pp.1-4, Jun. 2003.
- [6] R. Koodli et al., "Fast Handovers for Mobile IPv6", Internet Draft, IETF, Jan. 2004. work in progress.
- [7] 廣瀬功一, 久保孝弘, 山崎克之, 柴田義孝, "無線LANエラー特性とネットワークエミュレータの開発", 情報処理学会研究報告 高品質インターネット (QAI) No.007-005, pp.25-30, May. 2003.
- [8] 高橋秀明, 小林亮一, 岡島一郎, 梅田成視, "Hierarchical Mobile IPv6 with Buffering Extension の通信品質評価", 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム論文集, pp.193-196, Jun. 2003.