

高速鉄道に用いるモバイルネットワークのための クロスレイヤ手法を用いた高速ハンドオーバー提案

有田 哲也^{†1} 寺岡 文男^{†1}

ノードの集合であるネットワークがインターネット内を移動するネットワークモバイルデバイスが注目を集めている。本研究は300km/hで走行する高速鉄道車両に設置された移動ネットワークMOに対して赤外線通信を用いて1Gbpsの通信速度を提供し、IPv6における高速ハンドオーバーを実現することを目標としている。MO用のプロトコルとしてはMOasic Support Protocolを利用し、高速ハンドオーバー実現のためにリンク層の制御情報をネットワーク層に伝達するクロスレイヤ機能であるCross-layer control information change between arbitrary Layers C Lを利用する。提案手法をet SDに実装し、実験ネットワークにおいて基本性能を測定した。その結果、提案手法が有効であることが確認できた。

A proposal of Handover processing for a Mobile Network in High-speed Ground-to-Train

TETSUYA ARITA^{†2} and FUMIO TERAOKA^{†2}

In recent years, network Mobility becomes one of popular topics of research, which a network consisted of some nodes moves in the Internet. The task was to provide 1 Gbps bandwidth for all passengers in High-speed Ground-to-Train which reaches 300 km/h by using an infrared communication system and to achieve fast handover in IPv6. In this paper we used MOasic Support Protocol and Cross-layer control information change between arbitrary Layers C L. C L is the Cross-layer function to transmit information for fast handover from L2 to L3. We implemented the system on et SD and thoroughly evaluated its performance by emulation. In the result, the proposed mechanism was effective.

1. はじめに

本研究の目的は高速列車の乗客が持ち込んだ携帯機器に移動透過かつ高速なインターネット通信環境を提供することである。乗客が持ち込む機器がMobile IPv6¹⁾のようなホストモバイルプロトコルを搭載していることは想定できない。そこで乗客が持ち込む機器はモバイルプロトコルを搭載しない通常の機器を想定し、列車に設置されたMobile Router (MR)にIEEE802.11の無線LANで接続する環境を想定する。そしてMRは地上側に設置されたAccess Router (AR)間をハンドオーバーしながら乗客が持ち込む機器に移動透過なインターネット接続を提供する。すなわち列車内に設置されたLANがインターネット内を移動することになるため、ホストモバイルプロトコルではなくネットワークモバイルプロトコルであるNEMO Basic Support Protocol²⁾の利用が必要となる。また、本研究では列車全体に1Gbps以上の通信帯域を提供することを目標とし、MRとAR間の通信には赤外線通信を用いる。そのための赤外線通信装置は慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント 研究科教授の春山真一郎氏と(財)鉄道総合技術研究所によって現在開発されている。

シーームレスな移動透過通信を乗客に提供するにはハンドオーバーを高速に実行する必要がある。本研究室では、クロスレイヤ協調を利用した無線LAN環境における高速ハンドオーバー手法であるL3-driven fast handover³⁾⁴⁾を実現している。この手法ではリンク層(L2)が受信信号強度からハンドオーバーを予測するとクロスレイヤ協調手法によってネットワーク層(L3)にこの事象を伝える。L3はハンドオーバーの準備を完了した後、L2にハンドオーバー開始を指示する。L2はハンドオーバーが終了すると、この事象をL3に伝える。その後、L3はL3におけるハンドオーバー処理(サーバへの新しいIPアドレスの登録など)を実行する。以上のような仕組みにより、10数ミリ秒でのハンドオーバーを実現している。

しかし、無線LANの場合は受信信号強度からハンドオーバーの事前予測が可能であったが、赤外線通信装置では同様な手法を利用することができないため、L3-driven fast handoverとは異なるクロスレイヤ手法が必要となる。そこで本論文ではMR側の赤外線通信装置がAR側の赤外線通信装置との通信リンクの確立情報(LinkUp/Down)をMRに伝えるようにした。MRのL3はLinkDown後のLinkUpを赤外線通信装置から受け取るとL3のハ

^{†1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科
^{†2} Keio University

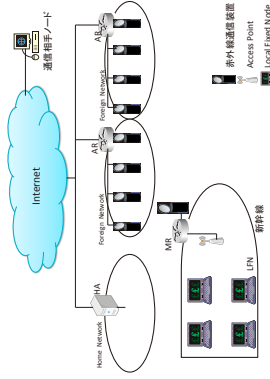


図 1 本研究で用いるネットワーク

ンドオーバー処理を実行し、高速ハンドオーバーを実現する提案手法を NetBSD 上で NEMO Basic Support を実現するソフトウェアである SHISA に実装し、基本性能を測定する。

2. NEMO Basic Support Protocol の概要

NEMO Basic Support Protocol は Mobile IPv6 に基づいたネットワークモビリティプロトコルである。NEMO が移動透過性を提供するネットワークを Mobile Network と呼ぶ。本研究でのネットワークを図 1 に表す。ネットワークは列車内ネットワークと地上側ネットワークに分かれており、赤外線リンクで接続している。列車内ネットワークには MR、乗客が持ち込むモビリティをサポートしない端末である Local Fixed Node (LFN) が Mobile Network を構成している。列車内の赤外線通信装置は MR と接続している。また、Mobile Network の位置を管理するルータである Home Agent (HA)、サブネットの異なる Access Router (AR) によって地上側ネットワークは構成されている。

MR は移動によって変化しない識別子として Home Address (HoA) を持つ。また、移動先のリンクで一時的に割り当てられる位置指示子として Care-of Address (CoA) を持つ。MR は CoA を取得すると HA へ Binding Update (BU) と呼ばれるメッセージを送信することで、HA で HoA と CoA を対応付ける。HA は Binding Cache (BC) と呼ばれる HoA と CoA の対応付けを生成すると Binding Acknowledge (BA) と呼ばれるメッセージを MR へ送信する。HoA、CoA は通常の IPv6 アドレスと同じでネットワークプレフィックスとインタフェース識別子から成る。CoA は Home Link とは別のリンクである Foreign Link に接続したとき、IPv6 Stateless Address Autocon guration や DHCPv6 を利用して CoA を取得する。

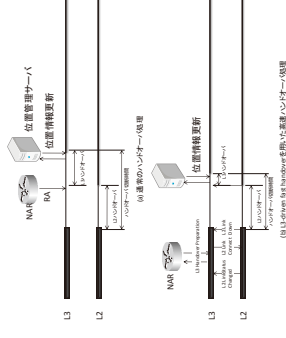


図 2 3-riven ast an over の処理の流れ

MR は Mobile Network への経路情報を広告しない、MR の代わりに HA が Mobile Network への経路情報を広告する。Mobile Network 宛てのパケットはいったん HA に到達する。HA は MR との間で双方向トンネルを設定し、パケットを送信することによって Mobile Network へ移動透過性を提供している。また、Mobile Network からのパケットは MR によってトンネリングされ HA へ転送される。HA は受信したパケットを宛先へ転送する。以上のように NEMO Basic Support を用いることで MR はアドレスが変化しても通信を継続することが可能となる。

3. クロスレイヤ手法を利用した高速ハンドオーバー手法

3.1 無線 LAN における高速ハンドオーバー

本節では無線 LAN における高速ハンドオーバーの処理を、移動端末である Mobile Node (MN) がネットワークを移動するホストモビリティを用いて説明する。

L3-driven fast handover はリンク層の状態の変化に応じたネットワーク層の処理をネットワーク層でも利用できるようにし、リンク層の状態の変化に応じたネットワーク層の処理を速やかに開始する手法である。このリンク層の情報をネットワーク層が利用するためのレイヤ間情報伝達機構 inter Layer Information Exchange System (LIES) を用いる。

図 2 に通常のハンドオーバー処理の流れと L3-driven fast handover による高速ハンドオーバー処理の流れを示す。

通常のハンドオーバー処理では MN は無線リンクが切断すると、L2 ハンドオーバーを実行する。移動したリンクにおいて L3 は Router Advertisement (RA) を受け取ることに伴って、サブネット間ハンドオーバーかどうかを判断する。サブネット間ハンドオーバーと判断した

場合、L3ハンドオーバーを開始する。新たなサブネットワークにおいて、MNはIPアドレスを設定する。設定したIPアドレスが重複していないことを確認するためにMNはDuplicated Address Detection (DAD) 処理を行う必要がある。

ルータはMNからのRouter Solicitation (RS)を受信したあと、RAを返す前にランダム時間待機する。このランダムな時間は0s~0.5sである。またDAD処理において、MNはNeighbor Solicitation (NS)をマルチキャストアドレスに送信する。もしアドレスの重複したノードが新たなサブネットワークに存在した場合、MNが送信したNSに対してノードはNeighbor Advertisement (NA)を返信する。NAはNSを受信してから1s以内に返信するため、DAD処理に必要な時間は1sである。

図2にL3-driven fast handoverによる高速ハンドオーバー処理の流れを示す。MNのL3は、LIESを介してL2-LinkStatusChangedを受信し、L2ハンドオーバーの発生を予測すると、次に接続するAR (Next AR: NAR)へL3 Handover Preparationメッセージを送信し、DAD処理を要請する。NARはMNからL3 Handover Preparationメッセージを受信するとDAD処理を行い、その結果をMNへ返す。MNはLIESを介してL2へL2-LinkConnectを送信し、指定したAccess Point (AP)へのL2ハンドオーバーの開始を指示する。MNのL3はLIESを介してL2からL2-LinkUpを受信しL2ハンドオーバーの完了を検出すると、ハンドオーバー後の位置情報更新のために、位置管理サーバへ位置登録を行う。L3-driven fast handoverでは、L3ハンドオーバー処理の一部であるDADをL2ハンドオーバーの完了前に行うことでL3ハンドオーバーに要する時間の短縮を実現している。また、L3はL2からL2-LinkUpを受信することでL2ハンドオーバーの完了を検知することが可能であるため、L2ハンドオーバー完了からL3ハンドオーバー開始までの待ち時間がない。したがって、L3-driven fast handoverはハンドオーバーに要する処理時間を大幅に短縮することができる。

3.2 赤外線通信装置での問題点

本研究では、通信装置に赤外線通信装置を用いる。本節では赤外線通信装置を用いた場合の問題点について述べる。

本研究で用いる赤外線通信装置は地上側に数百m間隔で設置し、列車上の赤外線通信装置と接続し、次々と切り替えていくことで、列車内のネットワークと地上側のネットワークを接続する。列車上の赤外線通信装置(車上赤外線通信装置)は列車内ネットワークのフォルトルータであるMRとイーサネットケーブルで接続されている。そのためMRから見ると常にリンクの状態がLinkUpとなる。つまり、車上赤外線通信装置と地上側赤外線

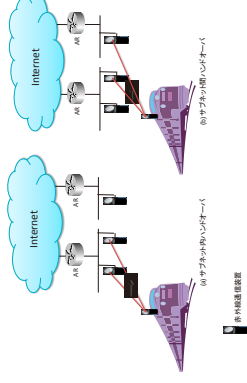


図3 ハンドオーバーの種類

通信装置間のリンクがLinkDownからLinkUpの状態に変化しても、MRはそれを検知することができない。このためL2ハンドオーバー完了した後、L3ハンドオーバーを高速に開始することができないという問題がある。

また、ハンドオーバー直後は赤外線リンクの接続が不安定であるため、通信の再開に適さない場合がある。リンクが不安定な状態で、MRがL3ハンドオーバーを開始すると、HAへの位置情報更新メッセージなどが損失することも考えられる。ハンドオーバー処理中のメッセージの損失は高速ハンドオーバーにおいて致命的な遅延となる。このため、赤外線通信装置がL2ハンドオーバーを完了し、リンクが安定した直後にMRはL3ハンドオーバーを開始しなければならぬ。

図3のように、ハンドオーバーにはサブネットワーク内ハンドオーバーとサブネットワーク間ハンドオーバーの2種類がある。サブネットワーク内ハンドオーバーとは、現在接続中の地上赤外線通信装置と同じARに接続している地上赤外線通信装置に切り替えるハンドオーバーのことをいう。サブネットワーク内ハンドオーバーでは、ネットワーク層から見るとIPアドレスが変化しないため、L3ハンドオーバーは発生しない。そのため、赤外線通信装置の切り替え(L2ハンドオーバー)のみで通信の再開が可能となる。一方、サブネットワーク間ハンドオーバーは異なるARに接続した赤外線通信装置へと切り替えるハンドオーバーをいう。この場合、IPアドレスが変化するため、ネットワーク層から見ても移動しているため、HAへの位置情報登録などの処理が必要となる。高速ハンドオーバーにはハンドオーバーの種類を高速に判断することが必要となる。

4. 提案手法

本章では、本研究における赤外線通信装置を用いた高速ハンドオーバー手法を提案・設計

する。

4.1 L2 状態の取得方法

本研究では赤外線通信装置の組み込み Linux と MR をイーサネットケーブルで接続し、赤外線通信装置の接続状況を検知できるようにする。赤外線通信装置の接続状況を表すために LinkInfo というイーサネットフレームを定義する。LinkInfo は接続を表す LinkUp、切断を表す LinkDown の状態を持つ。MR は LinkInfo を車上赤外線通信装置から受信することで赤外線リンクの状態の変化を検知することができる。赤外線通信装置は L2 ハンドオーバーを完了し、赤外線リンクが安定すると LinkUp を MR の L2 へ送信する。MR 内ではこれを L3 に通知する。これにより MR の L3 は L2 ハンドオーバーの完了を検知し、L3 ハンドオーバーを開始することができる。

4.2 ハンドオーバータイプの判断

高速ハンドオーバーを行うためにはハンドオーバーのタイプを判断する必要がある。MR は LinkUp を受信すると RS を送信する。MR からの RS を受信した AR は RA を送信する。MR は RA を受信するとネットワークブレイクスからハンドオーバーのタイプを判断する。ハンドオーバーがサブネットワーク間ハンドオーバーであると判断した場合、MR の L3 は L2 ハンドオーバーを即時に開始する。

RA を拡張することで MR に様々な情報を知らせることも可能である。

4.3 ハンドオーバー処理の流れ

サブネットワーク間ハンドオーバー時の L2 ハンドオーバーの完了後の手順を本章で説明する。簡略化のため、MR 内でのレイヤ間の制御情報伝達の流れは省略する。

AR は RS を受信すると RA を MR へ送信するが、AR は RA を MR へ送信する前にランダムな時間待機する。これは複数の AR が同時に MR へ RA を送信しないためである。本研究では MR が接続する AR の数は同時に RA を受信しても処理速度に問題ない数を想定しており、ランダムな時間待機する必要がない。そのため、この待機時間は不要であるため、待機時間を 0 s に変更する。

同様に DAD 処理によって起きる遅延であるが、これも本研究では MR のインタフェース ID は重複しないように割り当てられるため、同一サブネットワーク内では MR のアドレスは常に一意である。そのため、MR は DAD 処理を行う必要がない。したがって MR の DAD 処理を行わないことで、DAD 処理によって生じる遅延を回避することができる。

以下にハンドオーバー手順を示す。

(1) MR は車上赤外線装置の組み込み Linux が送信する LinkUp を受信し、L2 ハンド

オーバーの完了を検知する。

(2) MR は全ルータマルチキャストアドレス宛ての RS を送信する。

(3) AR は RS を受信すると即時に RA を返す。

(4) MR は RA を受け取るとアドレス自動設定を行い新しい CoA を生成する。

(5) L3 ハンドオーバーである場合、MR 自身の位置を管理する HA に BU を送信し、新しい CoA を更新する。

(6) MR は HA から BA を受信することにより、通信を再開することが可能となる。

以上のハンドオーバー手順により、MR はサブネットワーク間ハンドオーバーであっても速やかに通信を継続することが可能となる。

5. 実装

本研究では、MR に提案手法の実装をした。オペレーティングシステム (OS) に MR、HA は NetBSD 4.99、AR は Ubuntu 8.0.4 を用いている。MR、HA はソフトウェアに SHISA を使用している。SHISA は NetBSD 4.99 に実装された Mobile IPv6、NEMO Basic Support を実現するソフトウェアである。

本研究では、赤外線通信装置から送られてくる LinkUp を利用し高速にハンドオーバーを行うユーザランドデーモンプロセスである fhod を実装した。図 4 は SHISA のデーモンプロセスと fhod の実装モジュールである。

fhod は LinkUp を受信すると RS を AR へ送信する。これにより、スイッチングハブ内部の経路表を更新する。RS への応答である RA を受信した fhod は RA からブレイクスタック情報を取得し、現在の CoA と比較する。fhod はハンドオーバーがサブネットワーク間ハンドオーバーであると検知した場合、L3 ハンドオーバーを実行する。RA を受信した後に生成される CoA と HoA を格納した mip メッセージを mip socket を通じて SHISA の mrd に送ることで、fhod は mrd に BU を送信することを要求する。mip socket は raw socket であり、raw socket を用いることでリンクレベルヘッダを含まない raw データグラムの送信ができる。fhod は mip socket にパケットを送信することで、同じく mip socket を開いている mrd に BU の送信を要求することができる。

6. 評価と考察

また、実験ネットワーク環境を図 5 に示す。

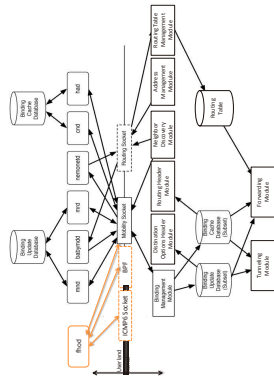


図 4 と o のモジュール図

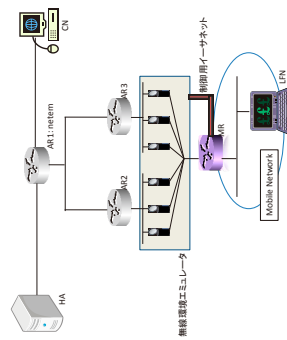


図 5 実験のネットワーク環境

6.1 高速ハンドオーバー手法の性能評価

本研究で提案した高速ハンドオーバー手法を用いた際に生じる通信切断時間を計測した。図 6 における (a)–(e) の意味を以下に示す。

- (a) 赤外線通信装置が L2 ハンドオーバーを完了し、MR に LinkUp を通知する。
- (b) MR の L3 は L2 ハンドオーバーの通知を受け L3 ハンドオーバー処理を開始する。MR は AR に RS メッセージを送信する。
- (c) MR は RA メッセージを受信し、それを基に CoA、デフォルトルータを設定する。
- (d) CoA を更新するため MR は HA に BU メッセージを送信する。
- (e) MR は HA から BA メッセージを受信することで通信を開始する。

通信時間は `fnod` 内で `gettimeofday()` 関数を使用することで測定した。(a)–(e) のそれぞれの時刻を記録し、各区間に要する処理時間を記録した。

まず (a)–(b) の区間は非常に高速であり、通信への影響が少ないことがわかる。(b)–(c) の区間は RS メッセージを受信した AR が RA メッセージを返信する際にランダムな時間待ちしてから返信するために、大きな遅延が生じる。実際に MR から標準設定の AR に RS を送り応答時間を測定した結果、その遅延は平均して 2.2 sec であるが、本提案方式では RA の待機時間を 0 sec にしているため、遅延を回避できていることがわかる。(c)–(d) の区間では、通常のハンドオーバーでは DAD 処理を行うため、さらに大きな遅延が生じる。通常 DAD 処理は約 1 sec を要する。本提案手法では、高速鉄道が走行する環境においては、MR には個別のリンクローカルアドレスを割り当てることが可能であると想定できるため、DAD 処理を行う必要がない。そのため、MR が DAD 処理を行わない設定にしておくことで大幅に遅延を削減することができる。(d)–(e) は CoA の更新時間である

実際の通信切断時間は、本研究で計測した時間に L2 ハンドオーバーの時間が加わる。

6.2 パケットロス率の評価

本項では、研究室で開発した、仮想的に無線基地局を複数生成し、それぞれの無線基地局がどの AR に接続するかを設定することのできる無線環境エミュレータを用いて、高速鉄道が走行している環境をエミュレートしてパケットロスについて評価する。図 7 は実際に想定されるネットワーク環境である。この環境を再現するために、実験では図 5 のようなネットワークポロジを用いた。列車はネットワークに接続しながら走行することを考慮すると、MR - CN 間の遅延と MR - HA 間の遅延はそれぞれ同時に増加すると考えられる。そこで、図 5 に示すように Ubuntu マシンである AR1 において任意の遅延を発生させる機能を持つ `netem` を使用し、HA、CN に対して遅延を発生させることで、実際の環境に近づけることが可能となる。本研究ではケーススタディとして、東京ー新大阪間の東海道新幹線

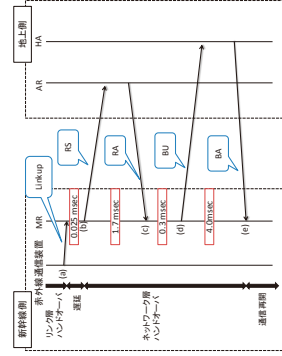


図 6 高速ハンドオーバー手法

における高速通信環境を想定すると、netem が発生させる遅延は大阪までの RTT 程度の遅延を考慮すればよいと考えられる。東京-新大阪間の RTT は約 15 msec となっている。

また、列車の走行速度を 300 km/h と想定すると、MR のハンドオーバーはおよそ 5 秒に 1 回の頻度で発生する。そのうち約 100 回に 1 回の頻度でサブネットワーク間ハンドオーバーが発生する。本研究では、想定する高速鉄道環境よりサブネットワーク間ハンドオーバーの頻度が高い状況で実験を行った。無線環境エミュレータに設定するシナリオスクリプトを作成し、以下のような環境に設定した。

- 1 つの AR に 10 台の Access Point (AP) を接続する。
- 赤外線通信装置によるパケットロス率は 0% であると設定した。
- ハンドオーバーは 5 秒に 1 回の頻度で発生し、10 回に 1 回の頻度でサブネットワーク間ハンドオーバーが発生する。

無線環境エミュレータの設定の下、HA - MR 間、MR - CN 間の RTT を 0 ~ 30 msec の間で変化させ、CN から MR へ UDP を用いて、1 Mbps の帯域で送信し、その平均パケットロス率を測定した。

5 秒に 1 回の頻度でハンドオーバーが発生し、うち 10 回に 1 回の頻度でサブネットワーク間ハンドオーバーをすすめる場合の平均パケットロス率を図 8 に示す。図 8 の x 軸は MR と HA 間の RTT、y 軸はハンドオーバー時の平均パケットロス率である。L2 ハンドオーバーの処理時間に関わらず、MR-HA 間の RTT が増加するにつれて、パケットロス率も増加している。L2 ハンドオーバーの処理時間ごとと比較すると、L2 ハンドオーバーの処理時間とパケットロス率は比例関係にあることがわかる。MR-HA 間の RTT が 30 msec かつ L2 ハンドオーバーの処理時間が 100 msec の場合でも平均パケットロス率は 2% 程度であり、通信の継続に大きく影響

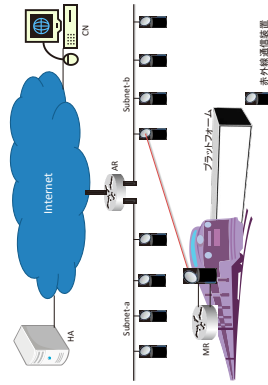


図 7 想定されるネットワーク環境

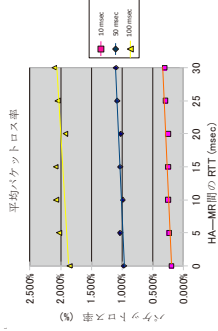


図 8 パケットロス率の測定

しないことがわかった。

本実験によって、高速ハンドオーバー手法の使用によってハンドオーバーの際に生じるパケットロスが通信にほとんど影響を与えない程度のものであることを示した。

7. おわりに

本研究では高速鉄道において高速なインターネット通信を提供するために必要な赤外線通信装置を用いた高速ハンドオーバー手法を提案した。提案手法を NetBSD 上に実装しハンドオーバーに必要な処理時間を計測し、処理時間によって生じるパケットロスが通信に影響を与えない程度のものであることを示した。現在、本研究では Linux 環境で高速ハンドオーバー手法を実装している。

参考文献

- 1) D.Johnson, C.Perkins, and J.Arkko. Mobility Support in IPv6. RFC3775, IETF, Jun. 2004.
- 2) V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu, and P. Thubert. Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol. RFC3963, IETF, Jan. 2005.
- 3) F. Teraoka, K. Gogo, R. Shibui, K. Mitsuya, and K. Mitani. Uni ed Layer 2 (L2) Abstractions for Layer 3 (L3)-Driven Fast Handover. RFC5184, IETF, May. 2008.
- 4) Kazutaka Gogo, Rie Shibui, and Fumio Teraoka. An L3-Driven Fast Handover Mechanism in IPv6 Mobility. In *SAINT 2006 Workshops*, pp. 10-13, January 2006.
- 5) Keiichi Shima, Koshiro Mitsuya, Ryuji Wakikawa, Tsyoshi Momose, and Keisuke Uehara. SHISA: The Mobile IPv6/NEMO BS Stack Implementation Current Status. In *Proceedings of Asia BSD Conference 2007 (AsiaBSDon2007)*, Mar. 2007.