

新幹線車内インターネット環境の高速化に関する一考察

寺田雅徳^{†1,a)} 寺岡文男^{†2,b)}

概要: 現在, 東海道新幹線では漏洩同軸 (LCX) システムを利用して新幹線車内に安定性の高いインターネット接続環境を提供している. 当研究室では 1 Gbps の通信速度を提供するために高速ハンドオーバー手法を用いた赤外線 (IR) システムについての研究を行ってきた. 本稿では通信速度の高速化と耐故障性を備えたシステムの実現のため, IR システムと LCX システムの協調について考察した. 協調のため, 既存の LCX システムに IR システムを導入するためのシステム構成と, システム切り替えのために Network Mobility Basic Support Protocol を拡張した機構を提案した. 提案方式を Linux 上に実装し, 実験ネットワークを構築してハンドオーバー時間を測定したがその時間は十分短いことがわかった.

キーワード: ネットワークモビリティ, 列車通信, 高速ハンドオーバー, モバイル IP

A Consideration on Making Internet Environment in Shinkansen Faster

TERADA MASANORI^{†1,a)} TERAOKA FUMIO^{†2,b)}

Abstract: Currently, Tokaido-Shinkansen provides a stable Internet environment in the train using leaky coaxial cable (LCX). We have been developing an infrared (IR) communication system with a fast handover mechanism to provide more than 1 Gbps bandwidth. This paper considers the collaboration between the IR system and the LCX system to realize a system that has broader bandwidth and fault tolerance. The proposed system incorporates the IR system in the LCX system and improves Network Mobility Basic Support Protocol. We implemented the proposed system on Linux and measures the basic performance in our test network. The results show that the overhead is small enough.

Keywords: Network Mobility, Communication to train, hi-speed handover, Mobile IP

1. はじめに

東海道新幹線では車内にインターネット接続サービスが提供されており, 乗客は WiFi を装備した機器を車内 LAN を介してインターネットに接続することができる. 文献 [1] によるとこのシステムは次のように構築されている. 通信媒体としては線路沿いに漏洩同軸ケーブル (LCX: Leaky

Coaxial Cable) が敷設され, 車上の移動ルータ (MR: Mobile Router) と LCX 間で無線通信を行っている. 文献 [2] によると, 東海道・山陽新幹線では東京・博多間 1,069.1 km を 59 の基地局による無線ゾーンでカバーしている. 1 基地局あたり約 18 km の範囲をカバーしていることになる. 最大通信速度は地上から車上方向で最大 2 Mbps, 車上から地上方向で最大 1 Mbps であり, 回線品質は符号誤り率で 1×10^{-5} 以下 (符号誤り訂正あり) である. モビリティサポート技術としては「モバイル IP 技術を導入した」と記述されているので, おそらく Mobile IPv4 を移動ネットワーク (NEMO: Network Mobility) に拡張した Network Mobility Extensions for Mobile IPv4 (NEMOv4)[3] を利用しているものと思われる. したがって, IPv4 での通信機

^{†1} 現在, 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Presently with Graduate School of Science and Technology,
Keio University

^{†2} 現在, 慶應義塾大学理工学部
Presently with Faculty of Science and Technology, Keio University

a) george@inl.ics.keio.ac.jp

b) tera@ics.keio.ac.jp

表 1 列車内インターネット接続サービスの比較
Table 1 Comparison of the Internet service in trains

	通信方式	最大帯域	パケットロス率	平均スループット	最大スループット
東海道新幹線	LCX	2 Mbps	0.1 %	0.7 Mbps	0.9 Mbps
つくばエクスプレス	無線	54 Mbps	16.2 %	1.4 Mbps	3.0 Mbps
成田エクスプレス	WiMAX	40 Mbps	10.8 %	1.1 Mbps	4.2 Mbps

能を有する機器であればハンドオーバを意識すること無く通信を継続することができる。

東海道新幹線の他にもつくばエクスプレスや成田エクスプレスはインターネット接続サービスを提供している。東海道新幹線、つくばエクスプレス、成田エクスプレスに実際に乗車して測定した各システムの性能を表 1 に示す [4]。表から分かるように、東海道新幹線のシステムはスループットは低いもののパケットロス率は低く、安定した通信サービスを提供している。これに対して他の 2 つのシステムはスループットは高いもののパケットロス率が高く、使い勝手が悪いことが想像される。しかし成田エクスプレスのシステムはスループットが高いといっても高々 4 Mbps 程度であり、1 列車の全乗客で共有するには到底不十分である。

我々は高速列車に IPv6 による 1 Gbps 以上のブロードバンドインターネット環境を提供するため、赤外線通信装置 [5] を用いたシステムについて研究を進めている。2010 年 1 月から 2 月に行った東海道線を使用した実験においては、約 130 km/h で走行する列車において IPv6 レベルで 124 msec でのハンドオーバを実現し、また双方向の動画転送にも成功した [6]。

本稿では、東海道新幹線の既存システム（以降、LCX システム）と我々が研究している赤外線システム（以降、IR システム）を共存させ、車内に 1 Gbps 以上のブロードバンド環境を提供する方法について検討する。LCX システムはすでに商用サービスとして利用されているものであり、また乗客へのインターネット接続サービスの他に列車の制御にも使用されている。そこで本稿での提案方式は、「LCX システムへの変更を極力少なくし、LCX システムと IR システムを協調させることにより 1 Gbps のブロードバンド環境を提供するとともに耐故障性を実現すること」を目標とする。また提案方式を Linux に実装し、実験室におけるテストネットワーク環境で測定した基本性能についても述べる。

2. 既存技術

2.1 LCX システム

LCX システムにおけるモバイルネットワークのシステム構成を図 1 に示す。新幹線は高速で走行しており、車内に搭載された移動局は通信する基地局を切り替えるため

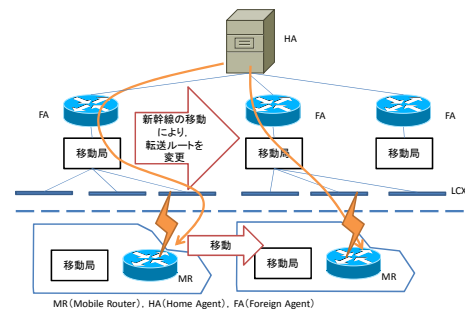


図 1 LCX システムにおけるモバイルネットワーク
Fig. 1 Mobile Network of LCX system

にハンドオーバ処理を行う。LCX システムでは高速ハンドオーバに対応するためにモビリティサポートプロトコルである Mobile IPv4 を改良してモバイルネットワークを構成している。さらに、パケット損失の早急な検知と高速再送の技術、新幹線の進行方向の基地局にデータの前方向転送をする技術をもつ独自のミドルウェアを開発し、ハンドオーバ時のオーバーヘッドを減少している。列車内ネットワーク全体が移動するため、MIPv4 を NEMO に拡張した NEMOv4 を利用していると考えられる。

新幹線が走行すると Mobile Router (MR) が接続する Foreign Agent (FA) が切り替わる。これを MR がグローバルインターネットに接続する Home Agent (HA) に通知することで HA は新幹線の位置情報を更新する。これにより新幹線が移動しても HA は車内の移動ネットワーク (NEMO) 宛の packets を正しく MR まで転送することができる。

また Mobile Router (MR) は新幹線ネットワークにおいて DHCP サーバとして働く。各号車に 2 台搭載された Access Point (AP) を用いた無線 LAN (Local Area Network) 技術によって車上の端末に IPv4 によるインターネット接続環境を提供している。このようなモバイルネットワークの仕組みにより車内の端末はネットワークの移動を意識せずに IPv4 を用いた通信を行うことができる。

2.2 IR システム

本研究で使用する赤外線通信装置 (IR-CD) 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春山研究室において設計・開発されている。また本研究室では赤外線装置の高速ハンドオーバのためにモビリティサポートプロトコルである Network Mobility Basic Support (NEMO BS)[7] を改良した。

2.2.1 赤外線装置

赤外線装置は新幹線 1 編成ごとの最後尾車両に 1 台、東京-新大阪間の線路にも複数台設置される。これらをそれぞれ車上赤外線装置、地上赤外線装置と呼ぶこととする。車上赤外線装置と地上赤外線装置が赤外線を送受信することによって通信する。

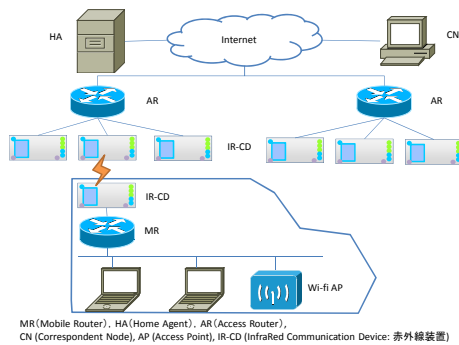


図 2 IR システムにおけるモバイルネットワーク
Fig. 2 Mobile Network of IR system

赤外線通信装置の最大通信速度は 1.25 Gbps, 通信距離は 300 m を目指している。1 台の赤外線装置だけでは走行区間をすべてカバーできないため, 車上赤外線装置は走行に伴って地上赤外線装置のハンドオーバーを行う。

2.2.2 システム構成

図 2 に IR システムによる車内インターネットのためのシステム構成を示す。高速ハンドオーバーに対応するためにモビリティサポートプロトコルとして NEMO BS を利用する。地上では一つの AR に地上赤外線装置が複数接続し, AR は地上赤外線装置を介して MR に IPv6 アドレスのプレフィックスを Router Advertisement (RA) によって広告する。MR は RA を受信すると, プレフィックスから一時的な Care-of Address (CoA) を生成する。また MR は CoA とは別に移動によって変化しない識別子として Home Address (HoA) を持つ。MR は移動によって接続する AR が切り替わり CoA が変化すると Home Agent (HA) に CoA の変更を通知する。HA は HoA と CoA の対応を管理し, パケットを転送することで NEMO に移動透過性を提供する。新幹線内では MR が WiFi AP と接続し, 車内の端末にインターネット接続環境を提供する。

2.2.3 高速ハンドオーバー処理

IR システムのハンドオーバー処理には, 車上赤外線装置が接続する地上赤外線装置を切り替える L2 ハンドオーバーと MR が接続する AR を切り替える L3 ハンドオーバーが存在する。同一 AR に接続する地上赤外線装置間の切り替えの場合は L2 ハンドオーバーのみ行われるが, 異なる AR に接続する地上赤外線装置間の切り替えでは L2 ハンドオーバーの完了後に L3 ハンドオーバーが行われる。

しかし, MR と車上赤外線装置のリンクは常に接続しているために MR は赤外線装置間のリンクの確立状況を検知することができず, L3 ハンドオーバー処理に遅延が発生するという問題が存在する。当研究室ではこれを解決してハンドオーバーを高速化するための研究を行い, 赤外線装置間のリンクの確立状況が変化したとき, 車上赤外線装置が MR に対して LinkUp, LinkDown を送信するようにした。MR は LinkDown 後に LinkUp を受信すると, 速やかに L3 ハ

ンドオーバー処理を実行する。

以下に IR システムにおける高速ハンドオーバー手順を示す。(1) 車上赤外線装置は地上赤外線装置とのリンクが切断すると, MR に LinkDown を送信する。(2) 車上赤外線装置が新たな地上赤外線装置と接続すると, LinkUp を MR に送信し, MR は L2 ハンドオーバー完了を検知する。(3) MR は Router Solicitation (RS) を AR に送信する。(4) MR は AR から RA を受信し, プレフィックスが以前受信したものと同一の場合は L3 ハンドオーバーではないのでハンドオーバー処理を終了する。(5) プレフィックスが以前と異なる場合には L3 ハンドオーバーであり, 新たな CoA を生成し, HA に Binding Update (BU) を送信して CoA の変更を通知する。(6) MR は Binding Acknowledgement (BA) を MA から受信し, L3 ハンドオーバーを終了する。以上のハンドオーバー手順により, MR は L3 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。

AR は通常, RA の衝突を避けるために RS 受信後にランダムな待ち時間の後に RA を送信するが, 想定環境では AR の衝突は生じないために, AR は RS 受信後すぐに RA を送信するようにした。また通常の NEMO BS では CoA 取得後 Duplicate Address Detection (DAD) 処理を行うが, 想定環境においてインターフェース ID の重複は生じないと考えられるため, DAD 処理を行わないようにした。これによりハンドオーバー処理時間をさらに短縮した。

2.3 両システムの比較

表 2 に IR システムと LCX システムの比較を示す。帯域や RTT に関しては IR システムが有利である。IR システムの場合, リンク層によるオーバーヘッドが小さいため, 実効でも 900 Mbps 以上のスループットが出る。LCX システムの最大帯域は 2 Mbps であるが, 表 1 に示すように実効では 1 Mbps 以下である。また, 東海道新幹線の車内からグローバルインターネットまでの RTT の実測値について文献 [4] の著者に尋ねたところ, 200 msec 以上であることが分かった。おそらく LCX 通信の部分で遅延が大きくなっているのではないかとと思われる。それに対して赤外線通信では遅延はほとんど発生しないので, 車内からグローバルインターネットまでの RTT は数 msec 程度になるのではないかと予想される。

一方, 安定性に関しては LCX システムの方が有利である。赤外線通信は視界の状態に左右され, 濃霧や大雪のように相手の装置が肉眼で見えないような場合は通信不能になる。LCX システムは天候に左右されない。

3. LCX システムと IR システムの協調方式

3.1 システム構成

1 章で述べたように, 提案方式は「LCX システムへの変更を極力少なくし, LCX システムと IR システムを協調さ

表 2 IR システムと LCX システムの比較

Table 2 Comparison of the IR system and LCX system

	最大帯域	外部までの RTT	備考
IR システム	1 Gbps	数 msec 程度	天候の影響あり
LCX システム	2 Mbps	200 msec 以上	安定

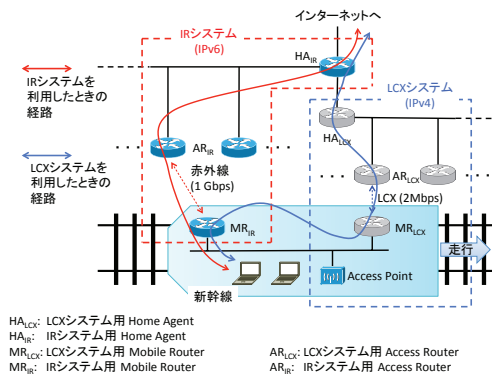


図 3 システム構成

Fig. 3 System configuration

せることにより 1 Gbps のブロードバンド環境を提供するとともに耐故障性を実現すること」を目標としている。そこで、図 3 に示すシステム構成を提案する。図の右側には既存システムである LCX システムがある。LCX システムは NEMOv4 を使用しており、機器としては地上側には Home Agent (HA_{LCX}) と多数の Access Router (AR_{LCX}) が設置され、車上側には Mobile Router (MR_{LCX}) と Access Point が設置される。Access Point は LCX システムと IR システムで共用する。

IR システムは LCX を包み込むように設置する。すなわち、IR システム用 Home Agent (HA_{IR}) を HA_{LCX} よりも上流 (グローバルインターネット寄り) に設置する。こうすることによって HA_{IR} はグローバルインターネットから新幹線に向かうパケットを IR システムまたは LCX システムに振り分けることができる。地上側には多数の Access Router (AR_{IR}) を設置する。車上側には Mobile Router (MR_{IR}) を設置する。

LCX システムには 1 点のみ変更を加える。それは MR_{LCX} 上で動作する DHCP サーバを停止することである。代わりに MR_{IR} 上で DHCP サーバを稼働させる。こうすることにより、車内の機器に対するデフォルトルータを MR_{IR} に設定する。すると MR_{IR} は車内からグローバルインターネットに向かうパケットを IR システムまたは LCX システムに振り分けることができる。

3.2 IR システムと LCX システムの使い分けのストラテジー

図 3 のようなシステム構成にした場合、IR システムや LCX システムの使用手法としては次のようなストラテジーが考えられる。

- (1) 両方のシステムを同時に使用し、スループット向上を図る。
- (2) アプリケーション毎に使用するシステムを決め、負荷分散を図る。
- (3) 極力 IR システムを使用し、IR システムが使用不能な場合のみ LCX システムを使用する。

一見すると (1) が望ましいと考えられる。このようなシステムは、文献 [8] にあるように NEMO 内の MR が複数の CoA (Multiple CoA) を持つことで実現できると考えられる。しかし IR システムは高速・低遅延であるのに対し LCX システムは低速・高遅延であるため、1 つの TCP フローを両方のシステムに振り分けた場合 (いわゆる multi-path TCP), パケットの順序逆転 (out of order) が頻繁に発生し、逆にスループットが低下してしまうことが知られている。また 1 つの UDP フローを両方のシステムに振り分けた場合でもパケットの順序逆転により画像や音声通信の品質が大幅に低下することが考えられる。次に (2) であるが、表 2 に示すように両システムでは帯域の差が大きすぎるため、負荷分散の効果もほとんどないと思われる。したがって、提案方式では (3) のストラテジーを採用する。

IR システムが使用不能な場合としては次の 3 つの原因が考えられる。

- ハンドオーバーによる通信途絶
- 濃霧, 大雪など視界不良による通信途絶
- 装置の故障

ハンドオーバーの場合、文献 [6] で述べているように現在のところ通信途絶時間は最短で 124 msec である。そこで通信途絶時間時間が TCP のスループットにどのような影響を与えるかを調べるための実験をした。2 台の PC を PC ルータを介して接続し、PC ルータで周期的に一定時間通信を途絶し、TCP のスループットを測定した。リンクは実験環境の制約により 100 Mbps の Ethernet である。IR システムでは地上側の Access Router を 300 m おきに設置すると仮定し、そこを 270 km/h の新幹線が通過すると 4 秒おきにハンドオーバーが発生することになる。実験では 5 秒周期の中で長さを変えた通信途絶を発生させ、iperf コマンドにより両端の PC 間での TCP スループットを測定した。結果を表 3 に示す。表から分かるように、5 秒周期の中で 3.5 秒 (すなわち 70%) の通信途絶が発生しても 11 Mbps のスループットが出ている。リンクの帯域が 100 Mbps ではなく 1 Gbps だったら単純にこの 10 倍にはならないかもしれないが、100 Mbps 程度のスループットが出ることが予想され、LCX システムの 2 Mbps よりはるかに高速である。したがって、ハンドオーバーのような短い途絶時間に IR システムから LCX システムに切替えても効果がないことが分かった。一方、濃霧や大雪による視界不良は長時間続くことが予想されるので、このようなときには IR システムから LCX システムに切替えるのが妥当である

表 3 100Mbps のリンクにおける 5 秒毎の切断時間と TCP スループットの関係

Table 3 Relation between cutting time every 5 seconds and TCP throughput in a 100 Mbps link

切断時間	0 秒	0.5 秒	1.0 秒	2.0 秒	3.0 秒	3.5 秒
スループット	94.2	81.0	64.3	35.4	31.9	11.0
	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps	Mbps

と判断できる．装置の故障の場合も同様である．

以上をまとめると，長時間 IR システムが使用不能のときのみ IR システムから LCX システムに切替えるのが妥当であるという結論に至った．“長時間”とはどの程度の時間なのかは，今後さまざまな実験を通して決定することになる．

4. 提案方式の設計

本稿では NEMO にインターネット接続環境を提供するために，NEMO BS を拡張した機構を提案する．本節では提案方式の設計について説明する．

4.1 通信手順

NEMO に対して移動を意識させずにグローバルインターネットとの通信環境を提供するため，通信に IP トンネルを利用する．IP トンネルではその始点でパケットに IP ヘッダを付与し，終点で IP ヘッダを削除することで元のパケットの IP ヘッダを変更することなく転送することができる．

IR システム使用時には， MR_{IR} - HA_{IR} 間に IPv4-in-IPv6 トンネルと IPv4-in-IPv4 トンネルが存在する．IPv4 と IPv6 いずれのパケットも HA_{IR} - MR_{IR} 間で IPv6 ヘッダが付与される．

NEMO に存在する Mobile Network Node (MNN) とグローバルインターネットに存在する Correspondent Node (CN) が通信するときの手順は以下ようになる．また，このときの通信経路は図 4 のようになる．

(1) CN が MNN へパケットを送信すると， HA_{IR} は MNN 宛のパケットを代理受信する．(2) HA_{IR} は IPv6 ヘッダでパケットをカプセル化し，AR 経由で MR_{IR} に転送する．(3) MR_{IR} が CoA 宛のパケットを受信するとカプセル化のための IPv6 ヘッダを削除し，パケットを MNN に転送する．(4) 一方 MNN が CN へのパケットを送信する場合，MNN はパケットを Mobile Network (NEMO) のデフォルトルータである MR_{IR} に転送する．(5) MR_{IR} がパケットを受信すると，IPv6 ヘッダでカプセル化して AR 経由で HA_{IR} に転送する．(6) HA_{IR} がパケットを受信すると，カプセル化のための IPv6 ヘッダを削除して CN に転送する．

一方，LCX システム使用時には， MR_{IR} - HA_{IR} 間に IPv6-in-IPv4 トンネルが存在する．また既存システムの NEMOv4 によって MR_{LCX} -FA 間と MR_{LCX} - MR_{LCX} 間に

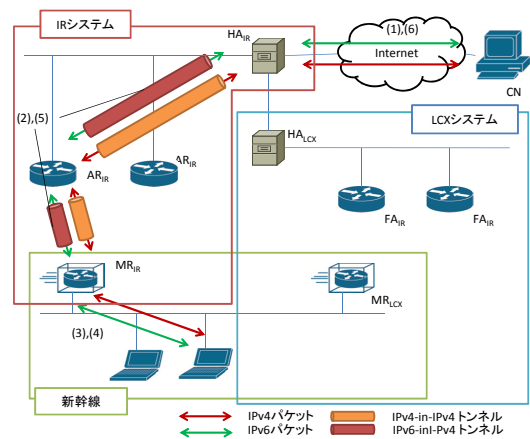


図 4 IR システム使用時におけるパケット転送経路

Fig. 4 Packet forwarding route when IR system using

IPv4-in-IPv4 トンネルが存在する．IPv6 パケットの場合， MR_{IR} - HA_{IR} 間では IPv4 ヘッダが付与される．IPv4 と IPv6 いずれのパケットも MR_{LCX} - HA_{LCX} 間で IPv4 ヘッダが付与されることになる．

MNN と CN の通信手順は以下ようになる．また，このときの通信経路は図 5 のようになる．

(1) CN が MNN へパケットを送信すると， HA_{IR} は MNN 宛のパケットを代理受信する．(2) HA_{IR} は受信したパケットが IPv6 パケットであった場合は IPv4 ヘッダでカプセル化して，IPv4 パケットの場合はパケットをカプセル化せず， HA_{LCX} に転送する．(3) HA_{LCX} はパケットを IPv4 ヘッダで 2 重にカプセル化し， MR_{LCX} が接続する FA へ転送する．(4) FA はパケットの IPv4 ヘッダを一つ削除し， MR_{LCX} に転送する．(5) MR_{LCX} は IPv4 ヘッダを一つ削除し，パケットを MR_{IR} に転送する．(6) MR_{IR} は受信したパケットが元々 IPv6 パケットの場合は IPv4 ヘッダを削除し，元々が IPv4 パケットの場合はそのまま，MNN へ転送する．(7) 一方 MNN が CN へパケットを送信する場合，MNN はパケットを NEMO のデフォルトルータである MR_{IR} に転送する．(8) MR_{IR} は IPv6 パケットであった場合 IPv4 ヘッダでカプセル化して，IPv4 パケットの場合はパケットをカプセル化せず，パケットを MR_{LCX} に転送する．(9) MR_{LCX} は受信したパケットを IPv4 ヘッダでカプセル化し，FA に転送する．(10) FA は受信したパケットを IPv4 ヘッダでカプセル化し， HA_{LCX} に転送する．(11) HA_{LCX} がパケットを受信すると，カプセル化のための IPv4 ヘッダを二つ削除して， HA_{IR} に転送する．(12) HA_{IR} がパケットを受信すると，元々のパケットが IPv6 パケットの場合は IPv4 ヘッダを一つ削除して，元々が IPv4 パケットの場合はそのまま CN に転送する．

4.2 ハンドオーバー処理

MR_{IR} が使用システムの変更を行う際， MR_{IR} の CoA が変わるためにハンドオーバー処理を行う必要がある．NEMO

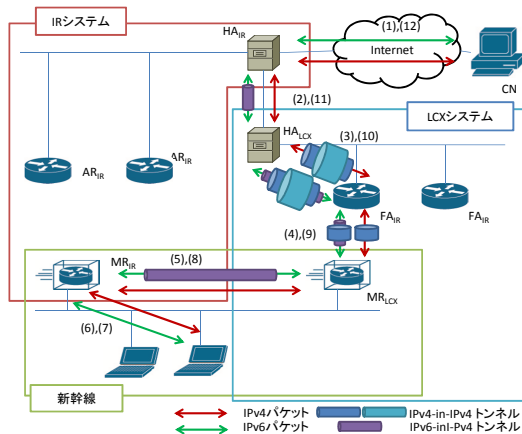


図 5 LCX システム使用時におけるパケット転送経路

Fig. 5 Packet forwarding route when LCX system using

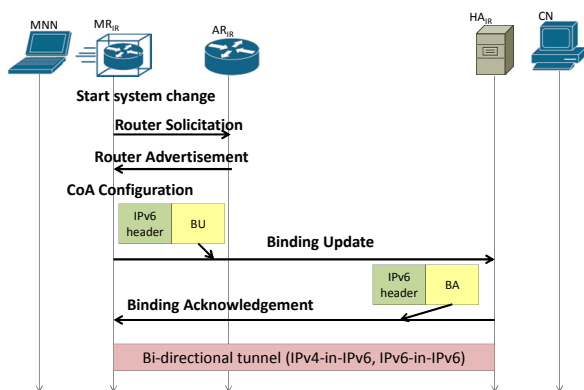


図 6 IR システム使用時のハンドオーバー

Fig. 6 Handover procedure when IR system using

BS では移動ネットワークの IPv6 プレフィックスや HoA について経路表やトンネルの設定を行うが、本研究では IPv4 についても同様の設定を行えるように拡張した。さらに使用システムの切り替えを MR_{IR} から HA_{IR} に通知するため、シグナリングメッセージに変更を加えた。一方、LCX システムによるハンドオーバー処理は IR システムとは独立して行われ、 MR_{LCX} - HA_{LCX} 間には常に IPv4 only network が存在していると考えられる。

まず LCX システムから IR システムへの切り替えについて説明する。LCX システムから IR システムに切り替えるときのハンドオーバー処理は赤外線装置の切り替えによる L3 ハンドオーバーと同様の手順で行う。この手順を図 6 と以下に示す。

MR_{IR} は LCX から IR へと使用システム変更を開始すると、RS を AR に送信する。次に MR_{IR} が AR から RA を受信すると、RA に含まれるプレフィックスから CoA を設定する。 MR_{IR} は NEMO に IPv4 と IPv6 の通信環境を提供するため、NEMO で MR が広告している IPv4 および IPv6 のプレフィックスの情報を BU に付加し、 HA_{IR} に送信する。 HA_{IR} が BU を受信すると IPv6 と IPv4 のプレフィックスについて経路の設定を行い、MR の IP アドレ

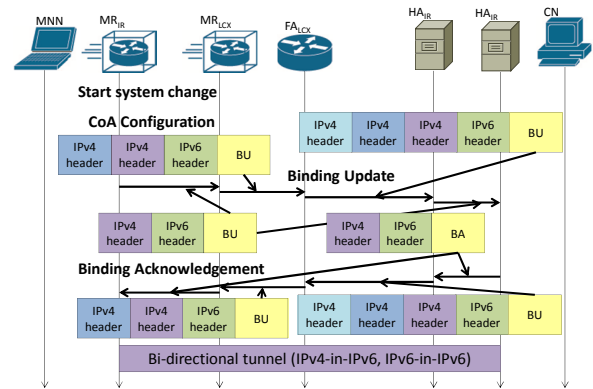


図 7 LCX システム使用時のハンドオーバー

Fig. 7 Handover procedure when LCX system using

スの情報と共に Binding Cache (BC) として保存し、 MR_{IR} に BA を送信する。 MR_{IR} が BA を受信するとハンドオーバー処理は終了し、 HA - MR 間に IPv6-in-IPv6 の IP トンネルと IPv4-in-IPv6 の IP トンネルが作られ、通信可能な状態となる。

次に IR システムから LCX システムへの切り替えについて説明する。LCX システム使用時、 MR_{IR} は NEMO サブネットにおける自身の IPv4 アドレスと IPv6 アドレスを CoA のように用いる。 MR_{IR} NEMO サブネットの接続ポイントは変化せず一定なのでこれらのアドレスは変化しない。そのため、RS、RA の交換や DAD 処理を行う必要がない。この手順を図 7 に示す。

MR_{IR} は IR から LCX へと使用システム変更を開始すると、NEMO における MR_{IR} の IPv6 アドレスを CoA として設定する。次に MR_{IR} NEMO の IPv4、IPv6 のプレフィックスの情報を付加した BU を作成し、LCX システムの経路を経由して送信するために BU を IPv4 ヘッダでカプセル化し、 MR_{LCX} へ転送する。 MR_{LCX} は LCX の経路を用いてカプセル化された BU を HA_{LCX} へ転送する。このとき NEMOv4 を用いるため、この区間で制御メッセージはさらに IPv4 ヘッダでカプセル化される。 HA_{LCX} が BU を受信すると HA_{IR} に転送する。BU を受信した HA_{IR} は Binding Cache (BC) を更新し、IPv4 ヘッダでカプセル化した BA を LCX システムの経路を経由して MR_{IR} に送信する。 MR_{IR} が BA を受信すると、新たな IPv6 アドレスの CoA を用いた IPv6-in-IPv4 トンネルが HA_{IR} - MR_{IR} 間に確立される。

4.3 使用システム決定アルゴリズム

3.2 節で述べたように、IR システムと LCX は同時に使用しない。したがって、どちらのネットワークを使用するかを決定する仕組みが必要である。そのために、2.2.3 項で述べた LinkDown control message と LinkUp control message を利用する。 MR_{IR} は受信した control message によって赤外線装置間のリンク状況を判定する。

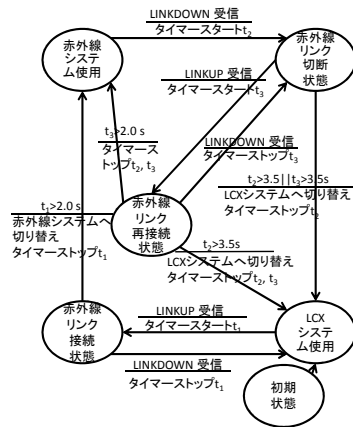


図 8 使用システム決定アルゴリズム

Fig. 8 The algorithm to determine using system

本稿では IR システム使用時に (1) 赤外線装置が長時間切断し続ける状況、(2) 赤外線装置が短時間に切断と接続を繰り返す状況、の 2 種類の状況には赤外線装置を使用不能と判断し、LCX システムに切り替えることとした。

逆に LCX システム使用時に赤外線装置が一定時間接続したままであれば赤外線装置を使用可能と判断し、IR システムに切り替えることとした。この MR_{IR} の使用システム決定アルゴリズムは図 8 に示すようになる。

今回の実装では定数として 3.5 sec や 2.0 sec という値を用いたがこれは便宜上定めた値である。今後の研究においてはシミュレーションを行い、適切な値やアルゴリズムを決定する必要がある。

4.4 提案方式の実装

本研究で実装するモビリティサポートプロトコルは Mobile IPv6 (MIPv6) を拡張したプロトコルであるため、MIPv6 の Linux 用公開実装 umip-0.4[9] の MIPv6 実行デーモンである mip6d を拡張し、Linux2.6.29.5 上に前節で提案方式を実装した。mip6d にはトンネルの作成やシグナリングメッセージの送受信など、MR や HA の機能モジュールを備えている。MR と HA は BU や BA よる情報をそれぞれ Binding Update List Entry (BULE), Binding Cache Entry (BCE) として保持する。

また使用システムの決定アルゴリズムを ir-sd daemon (ir-sdd) として実装した。ir-sdd は LinkUp/LinkDown の受信処理を行い、使用システム決定アルゴリズムに従い IR システムに切り替えるときには MR のデータ線に接続するインターフェース ($I_{face_{IR}}$) を Up させる。一方 LCX システムに切り替えるときには $I_{face_{IR}}$ を Down させる。mip6d はインターフェースのアップ・ダウンを検知する。この結果接続しているネットワークが変わるのでそれに伴って mip6d はハンドオーバー処理を行う。

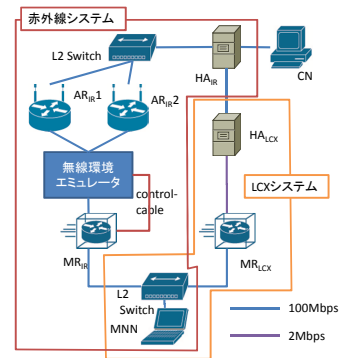


図 9 実験ネットワーク

Fig. 9 Experimental network

5. 提案方式の評価

本論文では提案したプロトコルにおける使用システム変更のためのハンドオーバー処理時間を測定した。

5.1 評価環境

図 9 に実験環境ネットワークを示す。無線環境エミュレータは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することができる評価用システムとして開発されている。無線環境エミュレータは本測定において MR_{IR} と AP との間に擬似的な無線接続環境を提供している。MNN 以外のマシンの CPU は Intel(R) Celeron(R) M CPU 1.86 GHz, MNN の CPU は Intel(R) Core(TM)2 DUO CPU 2.20 GHz, すべてのマシンのメモリは 2 GB である。HA, MR, AR, FA, MNN, CN の OS として Linux を用い、無線環境エミュレータは Free BSD に実装した。また IR システムによる経路と LCX システムによる経路による HA_{IR} - MR_{IR} 間の RTT はそれぞれ 0.41 msec, 1.62 msec であった。

5.2 ハンドオーバーの性能評価

MR_{LCX} のハンドオーバーには以下の 3 つのハンドオーバー処理のパターンが考えられる。

- LCX システムから IR システムへの切り替えによるハンドオーバー処理 (LCX → IR)
- IR システムから LCX システムへの切り替えによるハンドオーバー処理 (IR → LCX)
- IR システム使用時の赤外線装置切り替えによるハンドオーバー処理 (IR → IR)

本論文では LCX → IR と IR → LCX のハンドオーバー処理について測定した。処理時間は mip6d, ir-sdd 内で gettimeofday() 関数を使用することで測定した。

まず、LCX システムから IR システムへの切り替えによる MR_{IR} のハンドオーバーの手順と処理時間の測定結果を図 10 に示す。また、(a)-(e) の処理の概要を以下に示す。

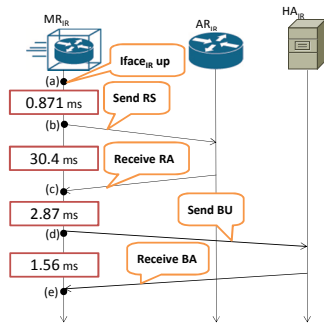


図 10 LCX システムから IR システムへの切り替えによるハンドオーバー処理手順と処理時間

Fig. 10 The handover procedure and processing time of system change from LCX to IR

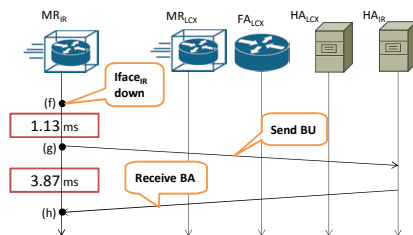


図 11 IR システムから LCX システムへの切り替えによるハンドオーバー処理手順と処理時間測定結果

Fig. 11 The handover procedure and processing time of system change from IR to LCX

(a) ir-sdd が $Iface_{IR}$ を Up させ、ハンドオーバーを開始する。(b) mip6d が $Iface_{IR}$ の Up を検知し、CoA を取得するために AR に RS メッセージを送信する。(c) mip6d が RA メッセージを受信し、それを基に IP アドレス、デフォルトルータを設定する。(d) mip6d が HA に位置情報を更新するために BU メッセージを送信する。(e) mip6d が HA から BA メッセージを受信して BULE を更新し、ハンドオーバーを終了する。

処理時間を見ると、(b)-(c) 区間で非常に長くなっている。AE の通常の RA 送信間隔が 0.03-0.07 sec であり、また RA が RS 受信後 0-0.5 sec のランダムな待ち時間の後に RA を送信するためである。RS 受信後すぐに RA を送信するように AR の設定を変更することで、よりハンドオーバー時間を短縮でき、5 msec 程度になると考えられる。

次に、LCX システムから IR システムへの切り替えによる MR_{IR} のハンドオーバーの手順と処理時間の測定結果を図 11 に示す。また、(f)-(h) の処理の概要を以下に示す。

(f) ir-sdd が $Iface_{IR}$ を Down させ、ハンドオーバー処理を開始する。(g) mip6d が $Iface_{IR}$ を Down を検知し、NEMO における IPv6 アドレスを CoA として設定し、HA に BU メッセージを送信する。(h) mip6d が HA から BA メッセージを受信して BULE を更新し、ハンドオーバー処理を終了する。

NEMO BS における通常のハンドオーバー処理と比べる

と、CoA 入手のための処理がなく $Iface_{IR}$ が LinkDown してから BU を送信するまでの時間が非常に短くなっており、全体の処理時間も、LCX IR のハンドオーバーより短くなっている。しかし LCX システムでは、車内からグローバルインターネットまでの RTT が 200 msec であるので、実際にはシグナリングメッセージ交換により、ハンドオーバー時間も 200 msec 程度の時間がかかると考えられる。

以上の結果より、今後の改良次第でハンドオーバー処理時間は LCX IR は 5 msec、IR LCX は 200 msec 程度になると考えられる。事前実験の 5 秒周期の中で 3.5 秒途切れても通信可能であったことを考慮すると車内ユーザの通信に大きな影響を与えないと考えることができる。

6. まとめ

本稿で IR システムと LCX システムの協調により、新幹線車内への 1Gbps 以上の高速インターネット環境提供と耐故障性を備えたネットワークシステムについて提案した。また提案システムを Linux 上に実装し、ハンドオーバー処理時間を計測しこれが通信には影響を与えない程度のものであることを示した。IR システムと LCX システムの切り替え方法について、アルゴリズムそのものや IR システム使用不可能と判断するまでの通信不能時間の最適値をシミュレーションなどで、検討していくことが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- [1] 古田武志, 前野博明, 杉山寛之: 東海道新幹線列車無線のデータ通信について, サイバネティクス, Vol. 15, No. 2, pp. 13-17 (2010).
- [2] 岸本利彦, 佐々木伸: LCX 通信システム, 電子通信学会 (1982).
- [3] Leung, K., Dommetty, G., Narayanan, V. and Petrescu, A.: *Network Mobility (NEMO) Extensions for Mobile IPv4* (2008).
- [4] 正源司智博: 列車向け高速光空間通信システムにおけるデュアルスタックモバイル IP 技術, 修士論文, 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 (2010).
- [5] Haruyama, S., Urabe, H., Shogenji, T., Ishikawa, S., Hiruta, M., Teraoka, F., Arita, T., Matsubara, H. and Nakagawa, S.: New Ground-to-Train High-Speed Free-Space Optical Communication System with Fast Handover Mechanism, *Proceedings of OFCNFOEC 2011* (2011).
- [6] Arita, T. and Teraoka, F.: Providing a High-Speed Train with a Broadband NEMO Environment, *Proceedings of AINTEC 2010* (2010).
- [7] Devarapalli, V., R.Wakikawa, Petrescu, A. and Thubert, P.: *Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol* (2005).
- [8] Kuntz, R.: Deploying reliable IPv6 temporary networks thanks to NEMO Basic Support and Multiple Care-of Addresses registration, *Proceedings of the 2007 International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINTW'07)* (2007).
- [9] UMIP.org: <http://www.umip.org/>.