

## 車載 Mobile Router を用いた通信回線共有方式における 動的 Alliance 管理機構の実環境での性能評価

中安 俊行<sup>†</sup> 藤野 信次<sup>††</sup>  
石原 進<sup>‡</sup> 水野 忠則<sup>‡</sup>

筆者らは、無線通信における移動端末の低速な通信を解決する手法として通信回線共有方式 (SHAKE: SHARing multipath procedure for a cluster network Environment) を提案している。SHAKE では、近隣にある複数の移動端末が短距離高速リンクを用いて一時的なネットワーク (Alliance) を構築し、Alliance 内の端末が持つ外部リンクを同時に利用することで通信速度の向上を実現する。さらに筆者らは、Network Mobility (NEMO) の Mobile Router (MR) を搭載した車両間で SHAKE を実現する状況を想定し、近接する車両に搭載された MR を複数相互接続させることで、複数の MR が持つ外部リンクの同時利用を可能とし、MR 配下のネットワークに対して通信帯域および接続の安定性の向上を実現する NEMO SHAKE を提案している。本論文では、実環境において NEMO SHAKE を利用する際に安定したリンクを維持し、高いスループットを実現することを目的とした、各 MR の位置情報、Alliance を構成する MR 間の通信状況を考慮した動的 Alliance 管理機構の実装、ならびに車々間で NEMO SHAKE を用いた性能評価の結果を示す。実環境でのスループット測定の結果、複数経路を用いることによる通信帯域の増大を確認した。

### Performance evaluation of NEMO SHAKE with Mobile Routers on vehicles

TOSHIYUKI NAKAYASU,<sup>†</sup> NOBUTSUGU FUJINO,<sup>††</sup> SUSUMU ISHIHARA,<sup>†</sup>  
and TADANORI MIZUNO<sup>‡</sup>

We have proposed a system that aggregates links between multiple mobile hosts and the Internet, and improves transmission speed between mobile hosts and hosts in the Internet (SHAKE: SHARing multipath procedure for a cluster network Environment). Furthermore, We have proposed an architecture of SHAKE with Network Mobility (NEMO SHAKE). NEMO SHAKE aggregates external links between mobile routers (MRs) on different vehicles that connected each other with short range highspeed wireless links. Therefore this system enables to increase bandwidth and stability of links between the mobile network and the Internet. This paper describes the design of Alliance construction method in consideration of positional information of MRs and communication condition between MRs, and the performance evaluation of NEMO SHAKE on two vehicles in real-world. As a result of the measurement of the throughput, we confirmed the increase of bandwidth by aggregating multiple links.

#### 1. はじめに

近年、ユビキタス環境におけるネットワークサービスの利用拡大とともに、携帯通信端末を持つ人口は増加し、時や場所を選ばずにインターネットに接続できる環境が整えられてきた。また、端末の小型化、高性能化により、複数のネットワークインターフェイスを搭載した端末が登場し、ユーザは状況に応じて通信メディアを使い分けることが可能である。しかし、現在の無線通信環境では、ノイズや障害物等によって通信中に接続が途切れることもあり、通信の安定性に乏しい。また、有線通信に比べて低速な長距離無線通信しか利用できないといった物理

的に通信速度が限られた状況下で高速なインターネット接続を実現するためには、利用可能なネットワーク資源を効率的に使用する必要がある。

そこで筆者らは、無線通信における低速で信頼性の低い通信を解決する手法として通信回線共有方式 (SHAKE: SHARing multipath procedure for a cluster network Environment) を提案している<sup>1)2)</sup>。SHAKE では、移動端末が近隣の端末と短距離高速リンクを用いて、一時的なローカルネットワーク (Alliance) を構築する。Alliance 内の端末が外部のホストと通信する際には、Alliance 内の他の端末が持つ外部リンクを複数同時に利用し、各リンクにトラフィックを分散させることで通信速度および接続の安定性の向上を実現する。筆者らは SHAKE を実現する一手法として、移動ネットワークの移動透過性を保障する Network Mobility<sup>3)</sup> (NEMO) の Mobile Router (MR) を相互接続し、複数の通信経路を同時に利用することで

<sup>†</sup> 静岡大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Shizuoka University  
<sup>††</sup> (株) 富士通研究所  
Fujitsu Laboratories Ltd.  
<sup>‡</sup> 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

ネットワーク全体の通信速度および接続の安定性の向上を図る NEMO SHAKE を提案している<sup>4)5)</sup>。

本稿では、実環境において NEMO SHAKE を利用する際に安定したリンクを維持し、高いスループットを実現することを目的とした MR の位置情報、Alliance を構成する MR 間の通信状況を考慮した Alliance 構築手法の実装、ならびに実環境において車々間で NEMO SHAKE の性能評価を行った結果について述べる。

以下本稿の構成を示す。第 2 章では NEMO SHAKE の概要について説明し、NEMO SHAKE 利用時の MR 間のリンク分断に伴うパケットロスの問題を明らかにする。第 3 章では問題を回避するための MR の位置情報、Alliance を構成する MR 間の通信状況を考慮した Alliance 構築手法の設計を詳細に述べる。第 4 章では実環境における NEMO SHAKE の性能評価、第 5 章では実際に車々間で NEMO SHAKE を利用した際の評価結果を示す。第 6 章では関連研究を紹介し、第 7 章でまとめとする。

## 2. NEMO SHAKE

### 2.1 Network Mobility<sup>3)</sup>(NEMO)

NEMO は、Mobile Network が移動して IP アドレスが変わる場合においても、同一の IP アドレスを用いたまま通信相手との接続を保証する機構である。Mobile Network 内の端末 (MNN: Mobile Network Node) にインターネット接続を提供する MR は、上位ルータが広告しているプレフィックス情報の変化から自身の移動を検知すると共に移動先で利用する IP アドレス (CoA: Care of Address) を生成する。MR は、移動に伴って CoA と MR が通信時に継続的に利用する IP アドレス (HoA: Home Address) を対応付け、Mobile Network 内のプレフィックス (MNP: Mobile Network Prefix) と共に Home Agent (HA) に対して通知する。HA では、MR から通知された HoA と CoA、MNP の対応付けを Binding Cache で管理する。

Mobile Network のアドレスを管理する HA は、MNN 宛のパケットを受信すると、Binding Cache 内に保持している対応付けの中から MNN が属する Mobile Network の MR の CoA を宛先としてカプセル化して転送する。MNN から通信相手 (CN: Correspondent Node) にパケットを送信する場合、MR は HA とのリバーストンネリングを用いて HA 経由で CN に配送する。以上のような処理により、Mobile Network 内の MNN は Mobile Network の移動を CN から隠蔽し、常に同一の IP アドレスを用いて通信を行うことができる。

### 2.2 通信回線共有方式 SHAKE

通信回線共有方式 SHAKE では、複数の移動端末が無線 LAN 等の短距離高速リンクを用いて、一時的なローカルネットワークを構築する。このネットワーク内の端

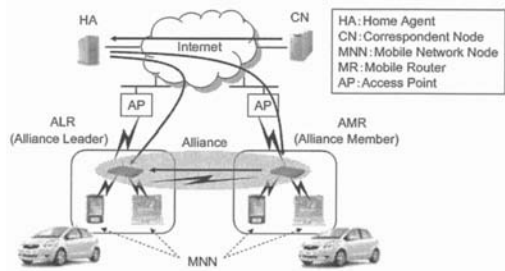


図 1 NEMO SHAKE を用いた通信

末が外部ネットワークの端末と通信する際には、ネットワーク内の他の端末と Alliance を組む。Alliance 内の他の端末が持つ外部リンクを複数同時に利用し、各リンクにトラフィックを分散させることで通信の高速化を図る。Alliance 内の端末は、自身の外部リンクが利用不可能な場合でも、Alliance 内の他の端末が所有する外部リンクにトラフィックを動的に振り分け直すことで通信の遮断を防ぐことができる。

### 2.3 NEMO SHAKE

NEMO SHAKE では、NEMO を用いた通信の安定性の向上、複数経路通信、通信帯域の増大を実現するため、自動車等の異なる複数の移動体に搭載された MR が複数相互接続し、Alliance を構築する。ここで、Alliance 内の他の MR が持つ外部リンクを用いて通信する MR を Alliance Leader Router (ALR)、ALR 宛のトラフィックを中継する MR を Alliance Member Router (AMR) と呼ぶ。図 1 に NEMO SHAKE を用いた通信の概要を示す。

NEMO SHAKE を実現するためには、Alliance 外部にいる CN から Alliance への経路上にトラフィックを分配するための中継ホストが必要である。この分配ホストが Alliance 内の端末への外部リンクの共通の経路上に存在しない場合には、CN はその分配ホストの存在を知っている必要がある。NEMO SHAKE では、NEMO を用いた通信において MNN-CN 間でやり取りされるパケットが必ず HA を経由するという特徴を利用し、トラフィックの分配機構を ALR および ALR の HA に設置する。

#### 2.3.1 複数経路の登録

NEMO SHAKE では、AMR の外部リンクを利用して通信を行うため、ALR の CoA として ALR の HA に AMR の持つ外部リンクの IP アドレスを登録する必要がある。NEMO SHAKE では、他の MR による不正な経路登録を避けるため、ALR が代表して AMR の外部リンクの IP アドレスの登録を行う。NEMO の仕様では、1 つの HoA に対して 1 つの CoA しか登録することができない。そこで、ALR の HA に登録する複数の CoA を識別するため、各 CoA に対して Binding Unique Identification number (BID)<sup>6)</sup> を割り当てる。これにより、登録先である ALR

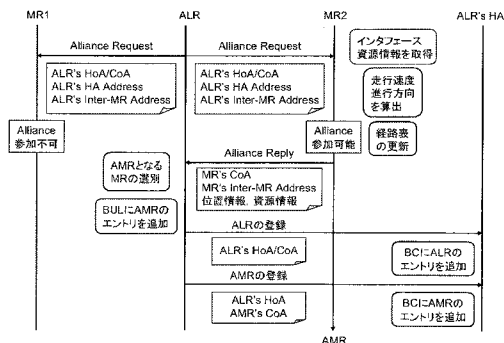


図 2 Alliance の構築手順

の HA に対して、複数の CoA 登録を可能にする。ALR の HA では、ALR および AMR との間にトンネルを構築し、ALR および AMR の Binding 情報を BID によって識別し、Binding Cache で管理する。

### 2.3.2 NEMO SHAKE を用いた通信

ALR の HA では、ALR の Mobile Network Prefix 宛の packets を代理受信すると、Binding Cache 内に一致する MNP のエントリがあるかどうか確かめる。該当する MNP のエントリがあった場合、その MNP に対応付けられた MR が ALR となっている Alliance 内の各 MR の CoA 宛に packets をカプセル化して転送する。AMR では、ALR の HA から配送された packets を MR 間の直接リンクを介して ALR に転送する。一方、MNN から CN に packets を送信する場合、MNN のデフォルトルータである ALR が自身の HA および AMR に packets を分配する。ALR が直接自身の HA に packets を転送する場合、NEMO Basic Support のプロトコルに従い、ALR と自身の HA との双方向トンネルを用いる。ALR が packets を AMR 経由で転送する場合、ALR は直接 ALR の HA に転送する packets を AMR の Alliance 間の通信で用いるインタフェースのアドレス宛にカプセル化し、MR 間の直接リンクを介して AMR に転送する。AMR では、ALR から配送された packets をカプセル解除し、AMR の外部リンクを用いて ALR の HA に転送する。

### 2.4 NEMO SHAKE の実利用における課題

実環境において、ユーザが NEMO SHAKE を利用することを想定すると、Alliance を構成する MR を搭載した車両の目的地、移動速度、進行方向がそれぞれ異なるため、通信中に突然 ALR-AMR 間の通信が途絶えることが予想される。ALR は AMR の位置情報やインタフェース資源情報を常に監視し、ALR-AMR 間のリンク断に先立ち、AMR の登録解除を行い、切断された AMR 経由の packets 分配による packets ロスを防ぐ必要がある。さらに、安定した通信を維持するために、ALR は移動する先々で近隣の MR の中から良質な通信品質が得られるも

のを選び、動的に Alliance を再構築する必要がある。そこで、NEMO SHAKE の実現にあたり、以下の要件を考慮する。

- 長時間維持可能な MR 間接続の選択および使用
- 動的に変化する Alliance 内の MR の位置情報およびインタフェース資源情報の管理
- AMR の Alliance 脱退に先だつトラフィック分配の停止および Alliance の解消

本稿では、上記の要件を実現するにあたり、各 MR の位置情報およびインタフェース資源情報を Alliance 構築時に考慮することで、信頼性の高い Alliance の構築および管理を行う。

## 3. 動的 Alliance 管理機構

### 3.1 近隣 MR の発見

図 2 に Alliance の構築手順を示す。ALR は、Alliance を構築する相手となる MR を見つけるために、定期的に Alliance 側のインタフェースから Alliance 要求メッセージ (AReq: Alliance Request) をブロードキャストする。AReq には、ALR に packets を転送するのに必要な ALR の HoA, CoA, ALR の HA の IP アドレス、Alliance 内の通信で用いるインタフェースのグローバルアドレスが含まれる。AReq を受信した MR は、AMR として Alliance に参加可能ならば、Alliance 応答メッセージ (ARep: Alliance Reply) を ALR にユニキャストで返信する。ARep には、AMR として経路を新たに登録するのに必要な各 MR の CoA, Alliance 内の通信で用いるインタフェースのグローバルアドレスに加えて、AMR の選別に用いる各 MR の位置情報、インタフェース資源情報が含まれる。ALR は、ARep から取得した各 MR の情報をもとにして、位置情報とインタフェース資源情報を考慮した 2 段階の AMR 選別を行う。

### 3.2 位置情報を考慮した AMR の選別

走行中の車両に搭載された MR 間で NEMO SHAKE の利用を考えた場合、車間距離が Alliance を構成する MR 間で用いる通信メディアの通信可能距離より大きくなると、ALR は AMR との通信を維持することができず、AMR を経由する経路で packets ロスが発生する。ALR は、通信状態が良好な MR と Alliance を構築するため、Alliance 構築時に AMR の候補となる MR の座標、移動速度、移動方向を考慮し、長時間 Alliance を維持することが可能な MR を AMR として選出する。各 MR は定期的に GPS から自身の位置情報を取得し、その履歴を保持する。MR は AReq を受信し、その ALR の Alliance に参加可能ならば、自身の移動速度および進行方向を求める。移動速度は、現在の座標と位置情報の履歴の最新の位置座標から、その 2 点間の距離を球面三角法を用いて算出し、測位間

隔当たりの移動距離から求める。各 MR が自身の移動情報（緯度、経度、車両の速度、進行方向）を ARep に付加することで、ALR では Alliance 構築時に各 MR の位置情報を AMR の選別に反映させることができる。

ALR は、GPS から取得した自身の位置情報と ARep に含まれる各 MR の位置情報から現在の車間距離  $d$  をそれぞれ求める。ALR-MR 間の通信可能範囲を  $R$  とすると、Alliance を構築する MR は  $d \leq R$  を満たす必要がある。さらに、ALR は MR を搭載した各車両が同速度で進むと仮定し、MR の現在位置、MR を搭載した各車両の移動速度、進行方向の値から  $\Delta t$  秒後の車間距離  $D(t + \Delta t)$  を推定する。ALR は、式 (1) の条件式を満たす  $\Delta t$  の最大値、つまり Alliance を維持できると考えられる時間が閾値以上の MR を AMR の候補として選出する。

$$D(t + \Delta t) \leq R \quad (1)$$

なお、実際の走行状況において、 $R$  は障害物等の要因により一意に決められないので、NEMO SHAKE の対象となる車両は同じ車載機を搭載し、MR 間の通信状況は良好であると仮定し、Alliance を構成する MR 間の通信で使用する通信メディアの通信可能距離の平均値を用いることとする。

### 3.3 インタフェース資源情報を考慮した AMR の選別

Alliance を構成する各 MR は、所有するインタフェース資源やその状態がそれぞれ異なる。ALR は、利用可能な帯域を増やすために、ALR が利用可能な広帯域の外部リンクを持つ MR を AMR として選出する。また、すでに他の Alliance の AMR として動作している MR は、ALR が利用可能な帯域が少ないと考えられるので AMR としては望ましくない。そこで、各 MR は AReq 受信時に以下の情報を取得する。

- 外部リンクおよび Alliance 内通信のためのインタフェース数
- 各インタフェースの IP アドレス
- 各インタフェースの帯域
- 各インタフェースのリンク状態
- Received Signal/Strength Indicator (RSSI)
- Alliance 参加数

Areq を受信した MR は、AMR として Alliance に参加可能ならば、AReq に含まれるアドレス情報をもとにルーティングテーブル上に ALR および ALR の HA で分配されたパケットを転送するためのエントリを追加する。このエントリには有効期間を設け、ARep を返したが AMR として選ばれなかった MR がいつまでもエントリを保持しないようにする。また、各 MR が ARep にインタフェース資源情報を付加することで、ALR は Alliance 構築時に各 MR が持つインタフェース資源情報を AMR の選別に反映させることができる。

3.1 章の処理で選出された AMR の候補の中から、ALR

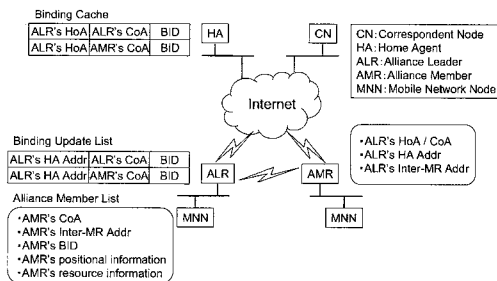


図3 各端末が保持する情報

は各 MR が持つ外部リンクの帯域幅および MR 間の RSSI が閾値以上であり、帯域幅の値が上位  $N$  個の MR を選出する。 $N$  は Alliance を構成する MR 数の上限である。帯域幅の閾値は、ALR の外部リンクの帯域幅とし、RSSI の閾値は NEMO SHAKE を利用する環境に応じて設定する。ALR は、以上の手順で選出された  $N$  個の MR から他の Alliance に参加していない MR を AMR として利用する。

### 3.4 AMR の Alliance 脱退に対する対策

Alliance 内で通信が突然切断されると、AMR 経由で転送されるはずのパケットが到達不能になってしまう。また、AMR の外部リンクが通信不可能になった場合にも、AMR が中継端末としての機能を果たさないため問題となる。よって、ALR は早期にそのような状況を検知、または予見して対応する必要がある。そこで、ALR は Alliance を構成する AMR の Alliance からの脱退に先だって複数経路へのトラフィック分配を停止するために、Alliance 構築後も定期的に AReq をブロードキャストし、返信された ARep をもとに AMR の通信状況を監視する。ALR は、Arep によって得られた AMR の情報を Alliance Member List として保持する (図3)。また、ALR が持つ AMR の情報には有効期間を与える。

AMR のアドレス情報が有効である間に ARep を受信した場合、ALR は返信された ARep に含まれる AMR の位置情報から式 (1) を満たす  $\Delta t$  の最大値を再計算する。Alliance を維持できると想定される時間  $\Delta t$  が閾値を下回る場合には AMR に対してトラフィックを分配するのを停止し、AMR の登録を解除する。AMR の登録解除は、ALR の HA に対し、Lifetime フィールドを 0 にした AMR の Binding Update を送信することで行う。また、ALR は返信された ARep に含まれる AMR のインタフェース資源情報から AMR が持つ外部リンクと ALR-AMR 間のリンクの帯域幅および RSSI の値が閾値を下回る場合においてもトラフィックを分配するのを停止し、AMR の登録を解除する。

## 4. NEMO SHAKE の実装と性能評価

### 4.1 実装

本研究で提案している MR の位置情報およびインタフェース資源情報を考慮した動的 Alliance 管理機構を FreeBSD 5.4-RELEASE 上で、KAME Project<sup>7)</sup> で公開されている IPv6 プロトコルスタック (2005 年 9 月 26 日のスナップ) を拡張して実装した。

Areq および Arep は、ICMPv6 プロトコルの一機能として追加した。動的 Alliance 管理機構および ALR の HA に対する複数の CoA の登録処理は、ユーザ空間で実装を行った。一方、ALR の HA でのパケット分配処理は、カーネル空間で実現した。ALR の HA におけるパケット振り分け方法に関しては、先行研究において各経路の遅延と遅延揺らぎを考慮した分配方式<sup>8)</sup> や帯域変動を考慮した分配方式<sup>9)</sup> が考えられているが、本実装ではラウンドロビンを用いている。

### 4.2 基本性能評価

1 台の固定された ALR と 1 台の歩行速度で移動する AMR を用いた実験により、NEMO SHAKE の基本動作および本稿で述べた動的 Alliance 構築機構の有効性を検証した。

#### 4.2.1 実験環境

図 4 に実験に用いたネットワーク構成を示す。ALR が近隣の MR と Alliance を構築し、ALR 配下の MNN が外部ネットワーク上の CN と通信する状況を想定した。NEMO SHAKE は IPv6 上で動作するように設計されているが、PHS アクセス網が IPv4 しか対応していないため、IPv6 over IPv4 トンネルを用いて Router1-Router2 間および Router1-Router3 間の接続性を確保した。このため、MR は直接インターネットに接続するのではなく、トンネリング処理を行うルータを介してインターネットに接続するものとした。同ルータがインターネットへの接続に用いるリンクには WILLCOM の 32kbps PIAFS を用いた。また、ALR-AMR 間、ALR-MNN 間の通信には IEEE802.11b を用い、各無線 LAN リンクのチャンネルにはそれぞれ 6、13 を用いた。

#### 4.2.2 実験内容

図 5 に実験環境を示す。MR 間で利用するインタフェースの電波出力を 1mW に弱めた状態で、屋外で ping6 を用いて ALR-AMR 間の通信可能距離  $R$  を測り、初期状態において ALR-AMR 間で直接通信不可能なトポロジを作成した。ping6 による測定により、 $R$  は 35[m] と分かったため、図 5 の地点 P から AMR を 30 [m] 離して配置した。AMR の候補となる MR と Router3 を図 5 のように ALR からの垂線の長さが  $\Delta x$  [m] である直線上を移動させた。等速での移動を実現するため、1m 間隔に印をつけ、メトロノームでタイミングを確認しながら MR と

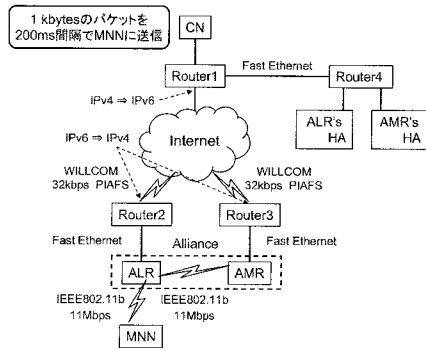


図 4 ネットワークトポロジ

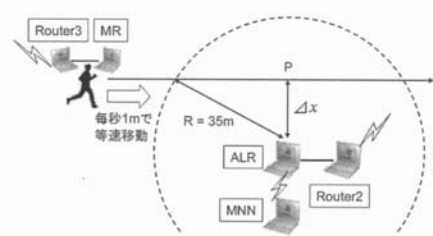


図 5 実験環境

Router3 を 1m/s で徒歩によって移動させた。

MR が ALR との通信可能範囲内に移動することで、ALR は ARep を用いて MR を検出し、AMR として利用するか判断する。理論上、 $\Delta x$  が 31.6 m までは Alliance を維持できると考えられる時間  $\Delta t$  が閾値を上回るため、ALR は NEMO SHAKE を用いて通信を行うことになるはずである。

上記の条件で、CN から 1kbytes の UDP パケットを 200msec 間隔で MNN に送信し、 $\Delta x$  が 28m と 33m の場合の Alliance 構築前後のスループットを測定した。また、3.4 章で述べた AMR の Alliance 脱退に対する対策の有効性を検証するため、Alliance 間のリンク分断前に AMR の登録解除を行う機構を用いた場合と用いない場合の AMR の Alliance 脱退前後のスループットを測定した。また、今回の実験では Areq 送信間隔を 3 秒、Alliance 構築時の  $\Delta t$  の閾値を 30 秒、Alliance 解除時の  $\Delta t$  の閾値を 5 秒、Areq 受信時の RSSI の閾値を -80 [dBm] に設定した。

#### 4.2.3 実験結果

Alliance 構築前後の CN-MNN 間のスループットの測定結果を図 6 に示す。 $\Delta x$  が 28m の場合、MNN と CN が通信している状態で ALR-MR 間の距離を近づけると、ALR は実験開始から 7.6 秒後に Areq を受信し、MR を検出した。ALR は、Areq 受信後に AMR の選別を行い、Alliance の推定維持時間  $\Delta t$  および RSSI の値が閾値以上であったため、NEMO SHAKE による通信に移行することでスループットが向上した。一方、 $\Delta x$  が 33 m の

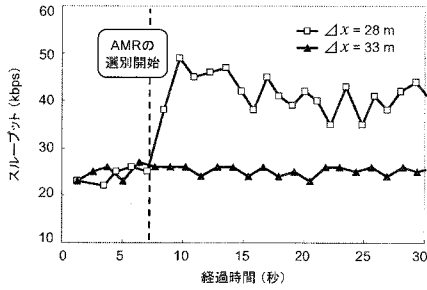


図6 AMR 選別機構の基本動作の検証結果

場合、ALR は実験開始から 10.9 秒後に近づいてきた MR から Areq を受信したが、Alliance の推定維持時間  $\Delta t$  が Alliance 構築時の  $\Delta t$  の閾値を下回ったため、通常の NEMO による通信を続けている。

ALR-AMR 間のリンク分断前後の CN-MNN 間のスループットの測定結果を図 7 に示す。MNN と CN が NEMO SHAKE を用いて通信している状態で ALR-AMR 間の距離を遠ざけていくと、AMR の Alliance 脱退に対する対策を行っていない NEMO SHAKE では、実験開始から 43.8 秒後に ALR-AMR 間のリンクが切断された直後から AMR を経由する経路でパケットロスが発生し、スループットが通常の NEMO を用いた場合よりも低い値で推移した。一方、MR 間のリンク分断前に AMR の登録解除を行う機構がある場合、実験開始から 42.9 秒後の ALR-AMR 間のリンク分断に先立ち、実験開始から 36.8 秒以降は通常の NEMO による通信に移行し、AMR を経由する経路でのパケットロスによるスループットの低下を回避している。

## 5. 車両を用いた NEMO SHAKE の性能評価

4.2 章の NEMO SHAKE の性能評価によって、NEMO SHAKE の基本動作および動的 Alliance 管理機構の有効性を確認することができた。続いて、実際に車々間で NEMO SHAKE を利用した場合のスループットを測定した。

### 5.1 実験内容

2 台の自動車に図 4 の ALR、Router2、MNN の 3 台の端末、AMR、Router3 の 2 台の端末をそれぞれ載せ、両車両を走行させて Alliance の構築、NEMO SHAKE による通信、Alliance の解消の動作を確認した。まず、Alliance 間の

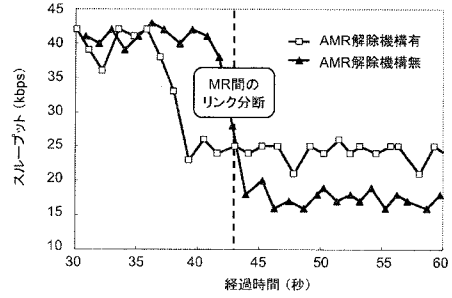


図7 AMR 脱退に先立つ Alliance 解消の検証結果

通信で用いる無線 LAN カードが車両の外部に出るように ALR、AMR を車両に配置し、ping6 を用いて ALR-AMR 間の通信可能距離  $R$  を測定した。静止状態での ping6 による測定により、 $R$  は 45m と分かったため、ALR-AMR 間を 50m 離して配置した。

図 8 に車両の移動シナリオを示す。初期配置から ALR を搭載した車両を 20km/h、AMR を搭載した車両を 30km/h で移動させ、AMR を搭載した車両が ALR を搭載した車両の横に並んだ時点で同速度で並走させた。車両が並走を開始して 20 秒後、再び AMR を搭載した車両を 30km/h で移動させた。

上記の条件で、CN から 1kbytes の UDP パケットを 200msec 間隔で MNN に送信し、スループットを測定した。また、今回の実験では Areq 送信間隔を 5 秒、Alliance 構築時の  $\Delta t$  の閾値を 30 秒、Alliance 解除時の  $\Delta t$  の閾値を 10 秒、Areq 受信時の RSSI の閾値を  $-80$  [dBm] に設定した。

### 5.2 実験結果

5.1 章で述べた移動シナリオに従って移動する車々間で NEMO SHAKE を利用した際のスループットの測定結果を図 9、図 10、図 11 に示す。

図 9 では、実験開始から 13.8 秒までは、ALR の外部リンクのみが用いられ、スループットは平均 21.4kbps であった。13.8 秒で Areq に含まれる Areq 受信時の AMR での RSSI が閾値  $-80$  [dBm] を上回り、接近してくる車両に搭載された MR が AMR として動作する基準を満たした。これにより、2 本の通信経路を用いた NEMO SHAKE による通信が開始され、スループットが平均 39.3kbps、通

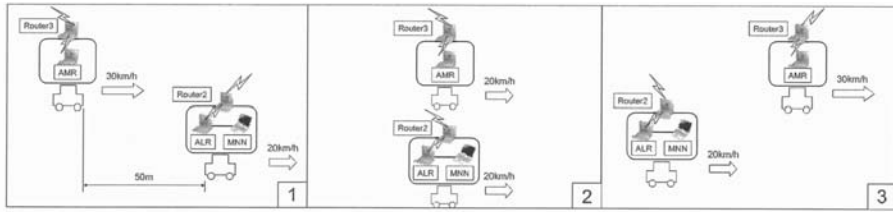


図 8 車両の移動シナリオ

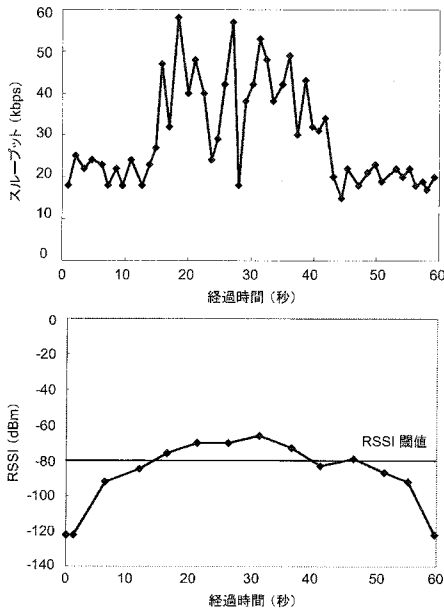


図 9 車々間で NEMO SHAKE を用いた際のスループット (ケース 1)

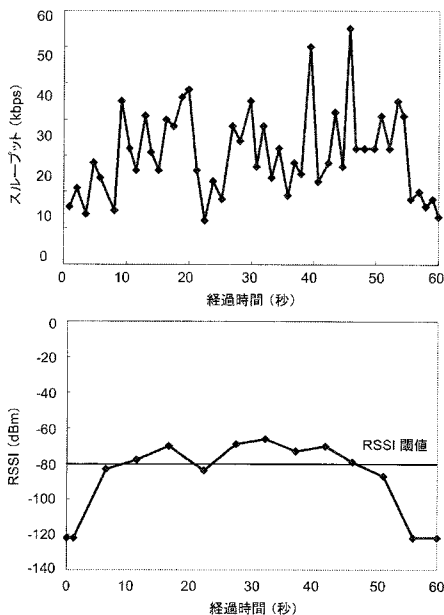


図 10 車々間で NEMO SHAKE を用いた際のスループット (ケース 2)

常の NEMO による通信の約 1.84 倍に増加した。41.9 秒で Arep に含まれる Areq 受信時の AMR での RSSI が閾値  $-80$  [dBm] を下回るため、AMR として動作していた MR が Alliance 脱退条件を満たし、通常の NEMO による通信に移行した。この結果、スループットは平均 20.0kbps に下がった。

図 10 では、実験開始から 22.1 秒後に AMR から返信された Arep に含まれる RSSI の値が閾値を下回ったため、AMR の外部リンクが利用可能であるにも関わらず、通常の NEMO による通信に移行した。また、実験開始から 27.3 秒後に RSSI の改善により AMR として動作する基準を再び満たし、NEMO SHAKE による通信に移行した。

なお、今回の実験では、事前に設定した端末間距離に対する閾値  $R$  ならびに式 (1) による Alliance の解消は行われず、RSSI の閾値によるものばかりとなった。これは、車両走行時の RSSI が静止時よりも悪化したためである。より速い速度での走行時には式 (1) による Alliance 解消も有用となると考えられるため、走行時の状態を想定した  $R$ 、RSSI の値の閾値の設定が必要である。

今回の実験では、制御パケットのロスにより、Alliance 構築がうまくいかない場合もあった。図 11 は、ALR による AMR の外部アドレスの Binding Update がパケットロスによって失敗したことにより、ALR が自身の外部リンク経由の HA との接続性も失ったと判断し、NEMO SHAKE および NEMO の動作を維持することができなくなった場合の例である。その他、ALR-ALR の HA 間での Binding Update、Binding Ack のロスに起因すると推測される失敗例も観測された。

これらの問題を解決するため、ALR による ALR、AMR の外部アドレスの Binding Update 処理が互いの失敗に影響を与えない仕組みが必要がある。また、Binding Ack が ALR-ALR の HA 間の経路でロスした場合、ALR では自身の HA が Binding 情報を更新したことを知らないため、ALR と ALR の HA で保持している Binding 情報の不整合がおきてしまう。そこで、Binding Ack を受信した ALR は、HA に Binding Ack を受信したことを通知する Ack を返信する仕組みが必要と考える。

## 6. 関連研究

NEMO SHAKE のように NEMO 環境下で複数の通信

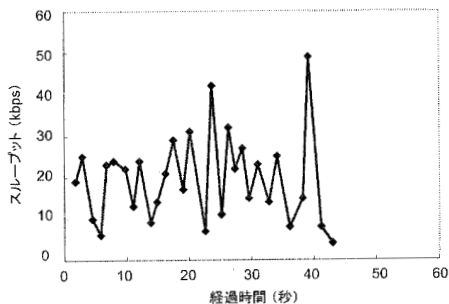


図 11 車々間で NEMO SHAKE を用いた際のスループット (ケース 3)

経路を同時に利用することで通信の高速化を図る研究がなされている<sup>10)11)</sup>。

文献 10) では、単一の Mobile Network 内に複数の MR が存在する状況下で、複数 MR が持つ外部との接続性を有効に利用する手法として、Multiple Mobile Router Management (MMRM) を提案している。MMRM を各 MR に導入することにより、Mobile Network 側のインタフェース間で MR-MR 間トンネルを確立し、各 MR が持つ外部リンクを共有する。MR 配下にある MNN が Mobile Network 外部のホストと通信する際、MNN のデフォルトルータである MR は、MNN からのトラフィックが自身が持つポリシーに従えば、そのまま HA へ転送し、そうでなければ、MR 間トンネルを通して適切な MR へトラフィックを振り分ける。

文献 11) では、MR に搭載された複数の通信メディアを同時に使用することでリンクの広帯域化を実現する機構を提案している。この文献では、複数のインタフェースを搭載した MR を実装し、CDMA2000 1x と CDMA2000 1x EV-DO を用いた実験を行っている。また、トラフィック分配時の性能向上のために、パケットスケジューリング、順序制御機能、ポリシーリングを実現している。

これらの研究では、単一の Mobile Network または MR が持つ複数の外部リンクを利用するため、Mobile Network の位置によっては Mobile Network 全体が通信できない状況が考えられる。一方、NEMO SHAKE では、異なる Mobile Network 間で外部リンクを共有するため、例えば 1 つの Mobile Network の外部リンクが利用不可能な状況でも、Alliance 内の他の MR が持つ外部リンクを利用することで外部との通信を維持することが可能である。また、各 MR が複数のインタフェースを搭載している必要がないという利点がある。

## 7. まとめ

本稿では、実環境で NEMO SHAKE 利用時に安定したリンクを維持し、高いスループットを実現するため、MR の位置情報、Alliance を構成する MR 間の通信状況を考

慮した動的 Alliance 管理機構の実装を行い、走行中の車々間で NEMO SHAKE を用いた性能評価を行った。車々間で NEMO SHAKE を利用した際のスループットを測定した結果、NEMO SHAKE を用いることで通常の NEMO による通信の約 1.84 倍のスループットを実現した。

今回の実験では、制御パケットのロスに伴う Alliance 構築の失敗例もあった。今後、制御パケットロスに対する実装上の対策が必要である。また、使用する経路の通信状況に応じて動的にパケットの分配方法の切り替えや各経路の遅延差に伴うパケットの到着順序の逆転および不必要な再送処理を避けるためにバッファリングを行い、パケットの順番を補正することが必要である。

## 参考文献

- 1) 舩田知広, 大木一将, 峰野博史, 石原進, “Mobile IPv6 を用いた通信回線共有方式の実装”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.9, pp2214-2225 (2005-9).
- 2) K. Koyama, Y. Ito, H. Mineno, S. Ishihara, “Performance evaluation of TCP on Mobile IP SHAKE”, IPSJ Journal, Vol.45, No.10, pp2270-2278 (2004).
- 3) V. Devarapalli, et al. : Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol, RFC 3963 (2005).
- 4) 舩田知広, 石原進: “複数 Mobile Network による経路アグリゲーションの提案と実装”, 情報処理学会研究報告 MBL, Vol.2006, No.14, pp85-90 (2006).
- 5) 中安俊行, 藤野信次, 石原進: “車載 Mobile Router を用いた通信回線共有方式の実環境での性能評価”, 情報処理学会研究会報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol.2007, No.14, pp.101-108 (2007-2).
- 6) R. Wakikawa, K. Uehara, T. Ernst and K. Nagami: Multiple Care-of Address Registration, Internet Drafts (draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-05) (2006).
- 7) KAME Project: <http://www.kame.net/>.
- 8) 川島佑毅, 峰野博史, 石原進, 水野忠則: “利用経路を動的に制御する複数経路集約通信方式の評価”, 情報処理学会研究報告 MBL, Vol.2005, No.113, pp45-52.
- 9) 櫻木伸也, 峰野博史, 鈴木偉元, 石川憲洋, 水野忠則: “複数経路通信における動的帯域推定を用いたパケット分配方式”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2006) シンポジウム論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol.2006, No.5, pp13-16.
- 10) M. Tsukada, T. Ernst, R. Wakikawa and K. Mitsuya: Dynamic Management of Multiple Mobile Routers, IEEE Malaysia International Conference on Communications and IEEE International Conference on Networks (MICC & ICOIN 2005), Vol.2, pp.1108-1113 (2005).
- 11) N. Imai, M. Isomura and H. Horiuchi: Inverse-Multiplexing for Mobile Routers with Multiple Wireless Network Interfaces, The First International Workshop on Network Mobility (WONEMO) (2006).