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

中安　俊行†　　藤野　信次††　　石原　進‡

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 Alliance 構築手法の実装，ならびに NEMO SHAKE を実環境において動作させた時の性能評価について述べる．

Performance evaluation of NEMO SHAKE with Mobile Routers on vehicles

TOSHIYUKI NAKAYASU ,† NOBUTSUGU FUJINO ††
and SUSUMU ISHIHARA‡

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 rage 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 in real-world.

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，移動先であっても時や場所を選ばず，インターネットに接続できる環境が整えられてきた．携帯通信端末の中にはネットワークインターフェイスを複数搭載したものも珍しくなく，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，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．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とき，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により通信速度および接続の安定性の向上を実現する．SHAKE を実現する一手法として，筆者らは移動ネットワークの移動透過性を保障する Network Mobility （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[1)2)]．

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，ならびに実環境での評価結果について述べる．

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

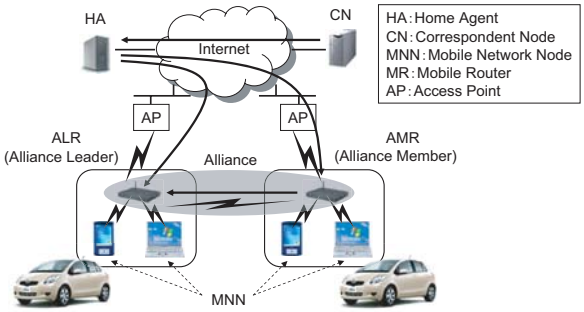

図 1　NEMO SHAKE を用いた通信

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について明らかにする．第 3 章では同問題を回避する 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 構築手法の設計について詳細に述べる．第 4 章では実環境における NEMO SHAKE の性能評価を行い，第 5 章で関連研究，そして第 6 章でまとめとする．

2. NEMO SHAKE

2.1 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（Alliance）を構築する．Alliance 内の端末が外部ネットワークの端末と通信するとき，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を用いることで，外部ネットワークとの通信が可能となり，接続の安定性を向上させることができる．

2.2 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．

NEMO SHAKE を実現するためには，Alliance 外部にいる通信相手（CN：Correspondent Node）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 において MR 配下の端末である Mobile Network Node（MNN）と CN が通信を行う際にやり取りされるパケットが必ず Home Agent（HA）を経由するという特徴を利用して，トラフィック分配機構を ALR の HA に設置する．こうすることで，CN には特別な機構をもたせる必要なく，複数経路を用いた通信を実現することができる．

ALR は，AMR の外部リンクを利用して通信を行うために，自身のホームアドレス（HoA：Home Address）に対する気付けアドレス（CoA：Care-of Address）として，自身の CoA の他に AMR の外部リンクに割り当てられているアドレスを自身の HA に登録する．

ALR の HA では，ALR の Mobile Network Prefix 宛のパケットを代理受信すると，ALR および AMR にパケットを分配する．AMR は，ALR の HA から配送されたパケットを MR 間の通信により ALR に転送する．一方，MNN が Alliance 外部の CN に対してパケットを送信する場合，ALR が自身の HA および AMR にパケットを分配する．AMR は，ALR から配送されたパケットを自身の外部リンクを用いて ALR の HA に転送する（図 1）．

2.3 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，AMR の Alliance への参加，脱退が頻繁に起こり，AMR を経由する経路でのパケットロスが増大することが考えられる．したがって，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，AMR の Alliance 脱退に先立ち，AMR の登録解除を行う必要がある．さらに，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，以下の要素を考慮する．

- 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，上記の要素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. 高品質な Alliance 構築手法

3.1 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，Alliance を構成する MR 間で使用する通信メディアの通信可能距離より車間距離が大きくなると，ALR は AMR との通信を維持することができず，

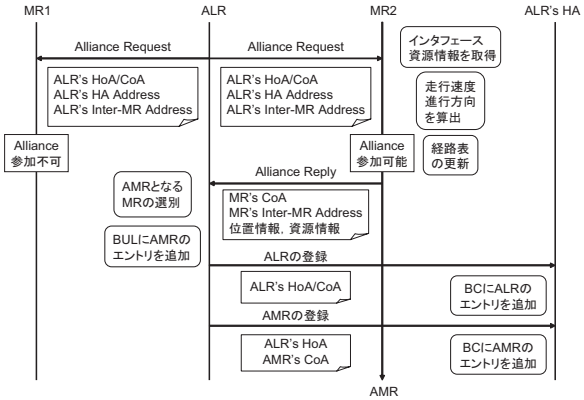

図 2　Alliance の構築手順

パケットロスが発生する．Alliance を構成する MR 間の接続の安定性を向上させるためには，Alliance を構築する際に，ALR が AMR の候補となる MR の位置情報を考慮し，長時間 Alliance を維持することが可能な MR を AMR として利用することが望ましい．そこで，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．ALR から Alliance 要求メッセージ（AReq：Alliance Request）を受信し，Alliance に参加可能な MR は，この位置情報の履歴をもとに自身の移動速度および進行方向を算出する．各 MR が自身の移動情報（緯度，経度，車両の速度，進行方向）を Alliance 応答メッセージ（ARep：Alliance Reply）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（図 2）．

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 $d \leqq R$ を満たす必要がある．また，ALR は自身と ARep を返した MR の Δt 秒後の位置を各端末の現在位置，移動速度，進行方向の値から推定し，車間距離の推定値 $D(t+\Delta t)$ を求める．そして，式（1）を満たす Δt 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．

$$D(t+\Delta t) \leqq R \tag{1}$$

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．

3.2　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 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 が AMR を介して利用可能な帯域を増やすためには，ALR が利用できる広帯域な外部リンクを持つ MR を AMR として選ぶことが望ましい．また，すでに他の Alliance の AMR として動作している MR は，ALR が利用できる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，MR は AReq 受信時にインタフェース資源情報を OS のカーネルから取得する．OS のカーネルから取得するインタフェース資源情報を以下に示す．

- インタフェース数
- インタフェースの IP アドレス
- インタフェースの帯域
- インタフェースのリンク状態
- Received Signal/Strength Indicator（RSSI）
- Alliance 参加状況

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．さらに，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（図 2）．

3.1 章の処理で得た AMR の候補の中から，ALR は ARep に含まれる各 MR が所有する外部リンクと MR 間のリンクの帯域幅かつ RSSI が大きい上位 N 個の MR を AMR として選出する．ここで N は Alliance を構成する MR 数の上限である. 帯域幅に関しては，ALR の外部リンクの帯域と同等の帯域を持つことを前提とし，RSSI の値も通信環境に応じた閾値を設ける．ここで，AMR の候補に同等の帯域幅を要求するのは，文献 1) の各経路の帯域差による影響に関する評価から，同質のリンクを利用することによって，NEMO SHAKE による実効帯域の向上が得られることが期待できるからである．また，各 MR の他の Alliance への参加状況をもとに，他の Alliance に参加していない MR を優先して AMR とする．

3.3　AMR の登録

前述した 2 段階の AMR の選別後，ALR は Binding Update List（BUL）上に AMR のエントリを追加し，自身のルーティングテーブル上に AMR 宛の経路を追加する．さらに ALR は，Binding Update を用いて自身の HoA に対する CoA として，AMR の外部リンクに割り当てられたアドレスを複数対応付け，自身の HA に ALR および AMR の登録を行う．しかし，NEMO の仕様では，一つの HoA に対して一つの CoA しか登録することができない．そこで，登録する複数のエントリを識別するために，各 CoA に対して Binding Unique Identification number（BID）[3] を割り当てる．また，登録先である ALR の HA では，ALR

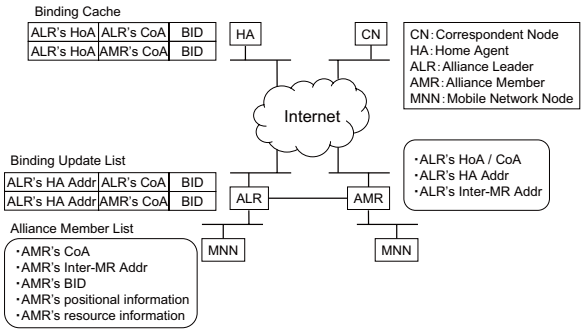

図 3　各端末が保持する情報

および AMR のエントリをそれぞれ Binding Cache（BC）に保持する（図 3）.

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，NEMO SHAKE を利用したサービスに支障をきたし，通信品質の低下を招く．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．このような場合，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 のアドレス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 Δt の最大値を再計算し，Alliance を維持できると想定される時間 Δt 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．また，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 の実装と実環境での性能評価

4.1　実　　装

MR の位置情報を考慮した高品質な Alliance 構築機構は，文献 2) において FreeBSD 5.4- RELEASE 上で，KAME Project[4] の IPv6 プロトコルスタックを拡張して実装済みである．現在，Alliance を構成する MR が所有するインタフェース資源情報を考慮した AMR 選別機構を実装している．

ALR の HA に対する複数の CoA の登録処理をユーザ空間で実装した．一方，ALR の HA でのパケット分配は，カーネル空間でその機能を実現した．ALR の HA での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[5] や帯域変動を考慮した分配方式[6] が考えられているが，本実装ではラウンドロビンで行っている．

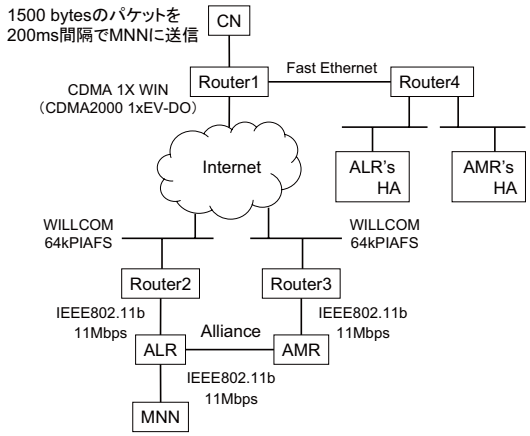

図 4　ネットワークトポロジ

4.2　実　　験

実環境において，実装した NEMO SHAKE のプロトタイプ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 Alliance 構築機構の有効性を検証する．以下に実験概要を述べる．

4.2.1　実 験 環 境

ALR が AMR 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．実際の環境では，ALR および AMR は基地局に対して PHS 等の長距離無線通信メディアを用いて接続するが，今回は MR-基地局間の通信は IEEE802.11b を用い，基地局と外部ネットワーク間の通信には WILLCOM の 64kPIAFS を用いた（図 4）．また，MR 間の通信には IEEE802.11b を用いた．本実験環境は IPv6 ネットワークで構成されているため，ISP の IPv4 ネットワークに接続するために図 4 の Router1，2，3 間で IPv6 over IPv4 トンネルを用いた．ノードの配置にあたり，ALR および AMR が MR 間で利用するインタフェースの電波出力を弱めた状態で，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 間は直接通信不可能なトポロジを作成した．これにより，ALR-AMR 間の距離は 20 [m] となった．

4.2.2　パラメータ

ALR が近隣の MR に対して AReq をブロードキャストする間隔を 2 [sec] とし，Alliance を維持できると考えられる時間 Δt の閾値を 10 [sec] に設定した．

4.2.3　実 験 方 法

AMR の候補となる MR は図 5 のように，ALR からの

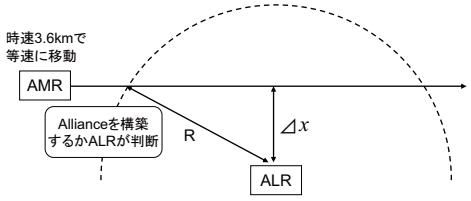

図 5　実験環境

垂線の長さが Δx [m] である直線上を移動する．MR の移動速度は，できる限り等速での移動を実現するために，1 m 間隔に印をつけ，メトロノームを用いながら 1 m/s で移動するようにした．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 AMR の候補となる MR を検出する．そして，ALR は ARep を返した MR を AMR として利用するか本稿で述べた AMR 選別機構を用いて判定する．理論上，Δx が 14 m までは Alliance を維持できると考えられる時間 Δt が閾値を上回るため，ALR は NEMO SHAKE を用いて通信することができるはずである．上記の条件下で，CN から 1500 bytes の UDP パケットを 200 [msec] 間隔で MNN に送信し，Alliance 構築前後，AMR の Alliance 脱退前後のシーケンス番号のロスを Δx の値を変えて測定した．今回の実験では，Δx が 10 m と 15 m の場合において，ALR の外部リンクおよび Alliance 間の内部リンクで受信したパケットを tcpdump を用いてキャプチャーした．

4.3　結果と考察

CN から MNN に UDP パケットを送信している状態で，ALR の外部リンクおよび Alliance 間の内部リンクにおいて，パケットのキャプチャーした際の，Δx が 10 m の場合の結果を図 6，Δx が 15 m の場合の結果を図 7 に示す．

（1）NEMO SHAKE の基本動作の検証

MNN と CN が通信している状態で ALR-MR 間の距離を近づけたところ，受信パケットのシーケンス番号が 50 付近から Alliance 間の内部リンクからも MNN 宛のパケットを受信し，複数経路による通信が確認できた（図 6）．これは，ALR が移動してきた MR を AMR として自身の HA に登録したことにより，NEMO SHAKE を用いた通信が行われたためである．

（2）AMR 選別機構の動作検証

測定の結果，Δx が 10 m の場合には，ALR は AMR を検出し，複数経路による通信が確認できたのに対し，Δx が 15 m の場合には，単一経路による NEMO を用いた通信しか確認できなかった（図 6，7）．よって，MR が ALR の通信可能範囲にいても，その MR が ALR との通信可能範囲内に滞在する推定時間 Δt が閾値を下回る場合には，ALR はその MR を AMR とした NEMO SHAKE を用いた通信をしないことが確認できた．

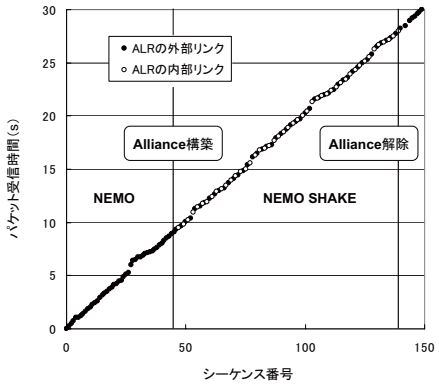

図 6　パケット受信時刻の推移（Δx = 10 の場合）

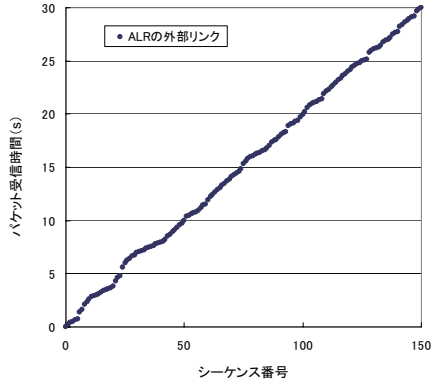

図 7　パケット受信時刻の推移（Δx = 15 の場合）

（3）AMR の Alliance 脱退における処理の検証

MNN と CN が複数経路を用いて通信している状態で ALR-AMR 間の距離を遠ざけたところ，受信パケットのシーケンス番号が 140 付近からパケットロスを生じることなく，単一経路の通信へと移行していることが確認できた（図 6）．よって，ALR-AMR 間のリンクが利用できなくなる前に，ALR は AMR の登録を解除していることが分かった．

5. 関 連 研 究

NEMO SHAKE のように NEMO 環境下で複数経路を同時に使用することで通信の高速化を図る研究がなされている[7)8)]．文献 7) では，一つの Mobile Network 内に複数の MR が存在する状況において，複数の MR が持つ外部リンクを同時に使用する手法を提案している．文献 8) の方式は，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図るものである．

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 の MR が持つ外部リンクを利用するため，例え一つの 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．

6. ま と め

本稿では，NEMO SHAKE を実環境において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ために，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 Alliance 構築機構の実装を行い，その基本動作を実環境で評価した．

ALR と直接通信できない位置にいる MR を直接通信できる位置まで移動させせることで，Alliance の自動構築の動作を確認した結果，Alliance は自動的に構築され，複数経路による通信が確かめられた．また，NEMO SHAKE を利用して通信を行っている状態で AMR を ALR と直接通信不可能な位置まで移動させせることで，AMR の登録解除の動作を確認した結果，ALR-AMR 間のリンクが切れる前に自動的に AMR の登録解除が行われることが確かめられた．

今後の課題として，トラフィック分配機構によるパケット分配方法の検討および自動車を使った実環境での測定が挙げられる．また，現在の実装では，NEMO SHAKE による複数経路を用いた通信時に，各経路の遅延差に伴ってパケットの到着順序が逆転し，TCP を利用した場合に期待したスループットが得られない．今後は，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を切り替えること，および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．将来的には，より正確な情報を用いて AMR の選別を行うために，自動車のウィンカーや車載 GPS から得られる位置情報およびユーザの目的地等の情報を利用することを考えている．

参 考 文 献

1) 舛田知広, 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).
2) 中安俊行, 舛田知広, 石原進: “車載 Mobile Router を用いた通信回線共有方式における Alliance の構築手法の設計および実装”, 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.6, pp669-672, 2006.
3) R.Wakikawa, K.Uehara, T.Ernst and K.Nagami: Multiple Care-of Address Registration, Internet Drafts (draft-wakikawa-mobileip-multiplecoa-05) (2006).
4) KAME Project: http://www.kame.net/.
5) 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.
6) 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.
7) 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).
8) 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).