

NTMobileにおける 仮想IPアドレスの管理方法の提案と評価

加古 将規^{1,a)} 鈴木 秀和² 内藤 克浩³ 渡邊 晃^{2,b)}

概要:我々は, IPv4/IPv6 混在環境において通信接続性と移動透過性を同時に実現する技術として NTMobile (Network Traversal with Mobility) を提案している. NTMobile では, NTMobile の機能を実装した端末 (NTM 端末) に対して, 実 IP アドレスとして利用されないアドレス空間の中から一意な仮想 IP アドレスを割り当てる必要がある. そのため, IPv4 においては, 十分な仮想 IPv4 アドレス数が確保できないという課題があった. また, IPv6 においては, 詳細な仮想 IP アドレスの管理方法が未検討であった. そこで, 本論文では仮想 IPv4 アドレスと仮想 IPv6 アドレスそれぞれにおける管理手法について提案する.

Proposal of Management Method of Virtual IP Addresses in NTMobile and its Evaluation

KAKO MASANORI^{1,a)} SUZUKI HIDEKAZU² NAITO KATSUHIRO³ WATANABE AKIRA^{2,b)}

1. はじめに

現在の IP ネットワークでは IPv4 アドレスの枯渇が問題となっており, 短期的な解決策として NAT を導入し, NAT 配下のネットワークにプライベートネットワークを構築することが一般的となっている. また, IPv4 アドレス枯渇問題の長期的な解決策として IPv6 アドレスが検討されているが, IPv6 アドレスは IPv4 アドレスと互換性がないプロトコルとして定義されているため, 即座に IPv6 ネットワークに移行することができない. そのためしばらくの間, IP ネットワークは IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークが混在した環境が続くことが想定される. そのため, アドレス空間として IPv4 プライベート, IPv4 グローバル, IPv6 の 3 種類が混在し, 通信接続性が確保できない場合があるという課題が存在する. 即ち, IPv4 において

はグローバルアドレス空間側からプライベートアドレス空間に対して通信を開始することができない (NAT 越え問題). また, IPv4 と IPv6 の互換性がないため, 直接通信を行うことができない.

一方, 公共無線網の普及や携帯端末の発達により, 移動しながら通信を行いたいという要求が増加している. しかし, ネットワークの切り替えに伴い IP アドレスが変化すると, 通信を継続することができない. そのため通信中に IP アドレスが変化しても通信を継続できる技術 (移動透過性技術) が必要である.

上記の課題を解決する既存技術として DSMIP (Dual Stack Mobile IPv6) [7] が存在する. DSMIP は, IPv6 ネットワークにおける移動透過性技術 MIPv6 (Mobile IPv6) [8] と, IPv4 ネットワークにおける移動透過性技術 MIPv4 (Mobile IPv4) [9] を結合した技術である. MIPv6 は経路最適化などが導入され, IPv6 環境を前提とすれば実用でできる規格と言えるが, IPv6 環境でないと利用できないという課題が存在する. 一方, MIPv4 は, NAT 環境を想定する必要があり, 以下のような課題が存在する. Mobile IP Traversal of NAT Devices[10] は, MIPv4 を NAT 環境でも利用できるように拡張したものである. しかし, この規格では, NAT 配下の端末への通信接続性を確保するため

¹ 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University

² 名城大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Meijo University

³ 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology

a) masanori.kako@wata-lab.meijo-u.ac.jp

b) wtnbakr@meijo-u.ac.jp

に HA (Home Agent) をグローバル空間に設置する必要がある。即ち、移動端末には HoA (Home Address) としてグローバル IP アドレスを割り振る必要があり、グローバル IP アドレスの枯渇に相反するという課題がある。移動端末に対してプライベート IP アドレスを割り当てながら移動透過性を実現する技術 [11], [12] も存在するが、NAT に特殊な機能を追加するため、既存のネットワークに導入することは難しい。

そこで我々は IPv4/IPv6 混在環境において通信接続性と移動透過性を同時に実現する技術として、NTMobile (Network Traversal with Mobility) [1], [2], [3], [4], [5], [6] を提案している。NTMobile では、NTMobile の機能を実装した端末 (NTM 端末) に対して、端末の位置に依存しない仮想 IP アドレスを割り当てる。端末のアプリケーションは仮想 IP アドレスを通信相手の IP アドレスと認識し通信を行う。仮想 IP アドレスに基づくパケットは実 IP アドレスでカプセル化し、通信相手に送信する。仮想 IP アドレスは実ネットワークのアドレス体系の違いやネットワーク切り替えによるアドレス変換に影響されないため、アプリケーションはネットワークの制約を一切受けないという利点がある。NTMobile の仮想 IP アドレスは、実 IP アドレスと重複することを防ぐために実ネットワークで利用されないアドレス帯域から生成し、端末に割り当てる。しかし、IPv4 においては、仮想 IP アドレス帯域として利用可能なアドレス帯域が小さいため、NTMobile を大規模システムに適用できない。そのため、このままでは NTMobile の拡張性がないという課題があった。また、IPv6 においては、具体的な仮想 IP アドレスの管理方法が未検討の状態である。

そこで、本論文では、自端末の仮想 IPv4 アドレスと通信相手の仮想 IPv4 アドレスを端末内部で自律的に生成する方式を提案する。端末内部で生成された仮想 IPv4 アドレスは NTMobile の通信を一意に識別する通信識別子 Path ID と関連付ける。通信中は、Path ID をキーとして通信相手の仮想 IPv4 アドレスの検索を行い、パケット内の仮想 IPv4 アドレスを端末が管理する仮想 IPv4 アドレスへと変換する。また、仮想 IPv6 アドレスにおいては明確な管理方法を定義する。仮想 IPv6 アドレスに DC (Direction Coordinator) のグローバル IPv4 アドレスを付加することで、DC 単位で仮想 IPv6 アドレスを管理する。以上の手法により、IPv4 における仮想 IP アドレスに係わる制約を除去することができる。IPv6 においては、仮想 IPv6 アドレスが DC 間で重複しないことを保証できるため、アドレス管理を容易にすることができる。

以下、2 章で NTMobile の概要と仮想 IP アドレスの管理について説明する。そして、3 章で提案方式の動作、4 章で提案方式の実装、5 章で提案方式の評価について述べ、6 章でまとめる。

2. NTMobile

2.1 NTMobile の概要

図 1 に NTMobile の概要を示す。NTMobile は、NTM 端末、通信経路を指示する DC (Direction Coordinator)、エンドエンドでの通信が行えない場合にパケットの中継を行う RS (Relay Server) によって構成される。DC および RS は、デュアルスタックネットワークに設置し、ネットワークの規模に応じて複数台設置することができる。

NTMobile は、NTM 端末に対して位置に依存しない仮想 IP アドレスを割り当て、アプリケーションは仮想 IP アドレスに基づいた通信を行う。仮想 IP アドレスは端末の移動により変化しないため、通信中に端末がネットワークを切り替えた場合でも、アプリケーションや CN に対して IP アドレスの変化を隠蔽し、移動透過性を実現する。仮想 IP アドレスに基づくパケットは、実 IP アドレスでカプセル化を行い、通信相手に送信される。NTM 端末間の通信は DC の指示により常に最適な通信経路で通信を行うことができる。端末どうしが直接通信を行えない場合 (例えば、両端末が IPv4 only ネットワークと IPv6 only ネットワークに接続されている場合)、RS 経由で通信を行う事ができる。その場合であっても複数の RS の中から適切な 1 台を選択し、冗長経路の少ない経路を生成できる。

2.2 仮想 IP アドレスの管理に係わる課題

現状の NTMobile では、IPv4 の仮想アドレスとして、IANA (Internet Assigned Numbers Authority) で規定された「198.18.0.0/15」[13] のアドレス帯域を利用している。このアドレス帯域はネットワーク性能試験用に確保された帯域であるため、実 IP アドレスとして利用されないことがない。この帯域を、DC 同士が連携して管理し、全ての NTM 端末の仮想アドレスが重複しないように割り当てている。しかし、このアドレス空間はわずか 13 万個しかなく、NTMobile の普及を考えると少ない。この制約を除去することが NTMobile の最大の課題となっている。また、IPv6 の仮想アドレスについては、これまでに具体的な規定がなかった。IPv6 ではアドレスが潤沢に存在するため、上記のような制約はないものの、重複しないような管理が必要である。

3. 提案方式

本論文では、IPv4 における仮想アドレスに係わる制約を一切除去する。また、IPv6 における規約を明確に定義する。さらに、DC 間の連携を不要とし、アドレス管理を容易にする。

3.1 提案方式の概要

IPv4 と IPv6 のアドレスの制約条件が異なるため、異な

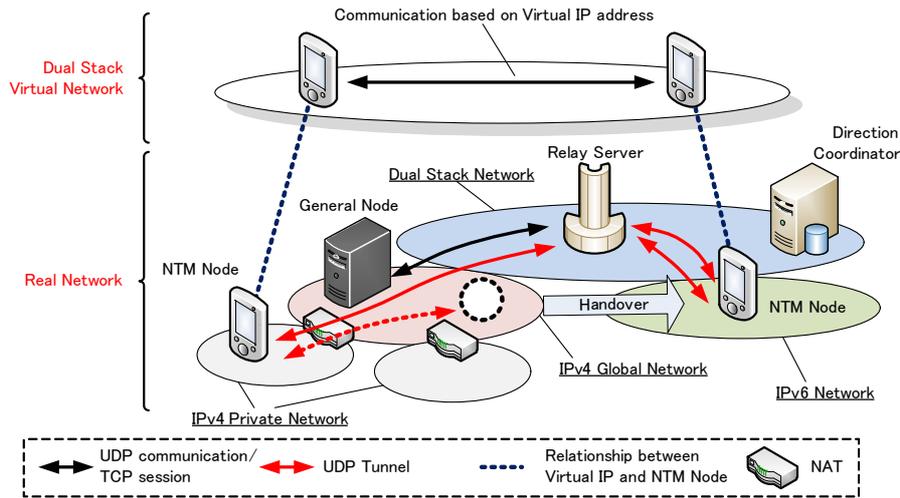


図 1 NTMobile の概要

る方法を用いて仮想 IP アドレスを決定する。仮想 IPv4 アドレスにおいては、NTM 端末が仮想 IPv4 アドレスを自律的に生成し、Path ID と呼ぶ通信識別子を用いて NTMobile の通信を一意的に識別する。パケットの受信側で仮想 IP アドレスを変換することにより通信を実現する。また、仮想 IPv6 アドレスにおいては、DC が自身のグローバル IPv4 アドレスと個々の DC 内で重複しない乱数を付加することにより、一意な仮想 IPv6 アドレスを生成する。IPv6 はアドレスが十分に存在するため、アドレス変換は不要である。

3.2 通信開始端末の仮想 IP アドレスの生成

図 2 に端末起動時に仮想 IP アドレスを生成する動作を示す。通信開始端末 MN は端末起動時に MN を管理する DC_{MN} に対して、NTM Registration Request を送信し、NTM 端末の実 IPv4/v6 アドレス (RIP4_{MN}, RIP6_{MN}) の登録を行う。DC_{MN} は、この時点で、NTM 端末の仮想 IPv6 アドレスを DC_{MN} 内で重複しないように生成し、NTM 端末の端末情報とともにデータベースに登録する。DC_{MN} は登録後、MN に NTM Registration Response を送信し、MN の仮想 IPv6 アドレスを通知する。

図 3 に仮想 IPv6 アドレスのフォーマットを示す。仮想 IPv6 アドレスは、IPv6 アドレスの上位 64bit をネットワーク部とし、下位 64bit をホスト部として定義する。ネットワーク部の上位 32bit は仮想 IP アドレス領域のネットワークプレフィックスと定義し、実ネットワークで利用されない「2001:db8::/32」[14] を用いる。このアドレス帯域は APNIC (Asia Pacific Network Information Centre) によって文書作成用に予約された帯域であり、実 IP アドレスとして利用されないことが保証されている。ネットワーク部の下位 32bit には、仮想 IPv6 アドレスを管理する DC のグローバル IPv4 アドレスを記述する。これにより、DC が異なれば仮想 IPv6 アドレスが重複しないことが保証さ

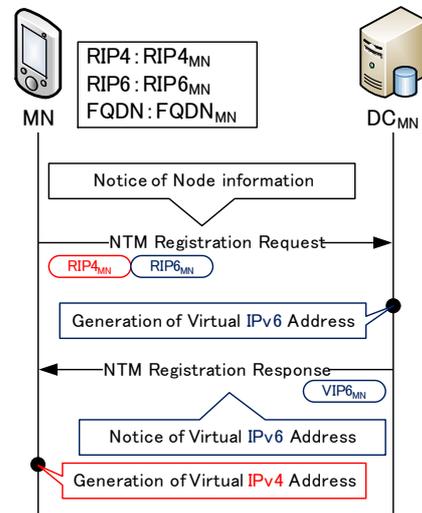


図 2 端末起動時の動作

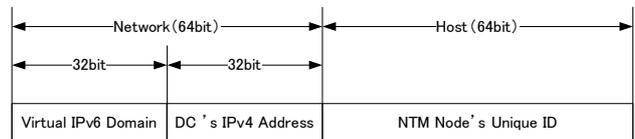


図 3 仮想 IPv6 アドレスのフォーマット

れる。ホスト部の 64bit には、DC 内で重複しないように生成した乱数を用いる。

次に、MN は NTM Registration Response を受信した際に、静的に自らの仮想 IPv4 アドレスを生成する。この仮想 IPv4 アドレスは固定値でよく、これまでに利用してきた仮想 IP アドレス帯域「198.18.0.0/15」の中から、198.18.0.1 とする。その後、MN は自端末の IP アドレスとして、仮想 IPv4 アドレス (198.18.0.1) と仮想 IPv6 アドレス (図 3 の形式) をアプリケーションに認識させる。

3.3 通信相手端末の仮想 IP アドレスの生成・通知

図 4 に、通信開始時において通信相手の仮想 IP アドレスをどのように生成・取得を行うかを示す。

MN と CN が IPv4 アプリケーションを利用している場合、MN と CN がそれぞれ相手の仮想 IP アドレスを自動的に生成する。即ち、通信相手がどのような仮想 IPv4 アドレスを使用しているかには関与しない。MN は DC_{MN} に対して NTM Direction Request を送信し、通信相手端末 CN の名前解決およびトンネル構築の指示を依頼する。 DC_{MN} は DNS の仕組みを利用して、NS レコードから DC_{CN} を探索し、NTM Information Request / Response にて CN の端末情報を取得する。CN の端末情報を取得した DC_{MN} は NTM Route Direction に通信識別子 $Path ID_{MN-CN}$ 、通信相手の仮想 IPv6 アドレスを含む通信経路の指示を載せて MN および CN に送信する。このとき、仮想 IPv4 アドレスの情報は含まない。 DC_{MN} から NTM Route Direction を受信した MN は、端末内部で一意となる CN の仮想 IPv4 アドレスとして VIP_{4A} を生成する。 VIP_{4A} を生成した MN は、 VIP_{4A} を $Path ID_{MN-CN}$ と関連付けて、トンネル通信の情報を記録するトンネルテーブルに登録する。MN は DNS 応答メッセージ内の通信相手の IPv4 アドレスを VIP_{4A} に変更し、アプリケーションに渡す。同様に、 DC_{MN} の NTM Route Direction を DC_{CN} から受信した CN は、端末内部で一意となる MN の仮想 IPv4 アドレスとして VIP_{4B} を生成し、自端末のトンネルテーブルに $Path ID_{MN-CN}$ とともに登録する。

MN と CN が IPv6 アプリケーションを利用している場合、IPv4 で示したような変換は行わず、 VIP_{6CN} を記載した DNS 応答メッセージをそのままアプリケーションに渡す。

3.4 トンネル通信時の動作

図 5 に、NTM 端末間において提案方式によるトンネル通信時のアドレス遷移を示す。図中において、矢印は「送信元アドレス→宛先アドレス」であることを示す。

- IPv4 アプリケーションの場合

MN の IPv4 アプリケーションは、自身の仮想 IPv4 アドレスを VIP_{4MN} 、CN の仮想 IPv4 アドレスを VIP_{4A} として認識している。また、CN の IPv4 アプリケーションは、自身の仮想 IPv4 アドレスを VIP_{4CN} 、MN の仮想 IPv4 アドレスを VIP_{4B} として認識している。MN の IPv4 アプリケーションが CN へパケットを送信する際、送信元アドレスに VIP_{4MN} 、宛先アドレスに VIP_{4A} が記載された仮想 IP パケットが生成される。この仮想 IP パケットは実 IP アドレスでカプセル化された後、CN へ送信される。このとき、カプセル化されたパケットには NTMobile の情報を記載した NTM ヘッダが付加されている。NTM ヘッダには

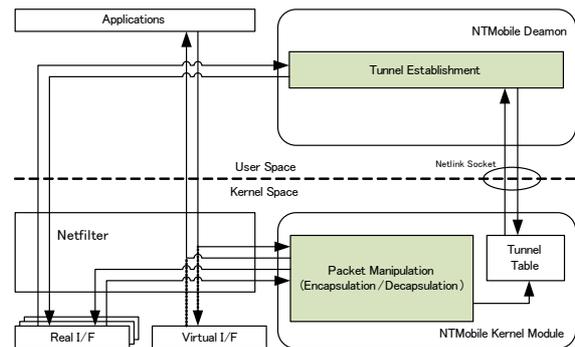


図 6 NTM 端末のモジュール構成

$Path ID$ が含まれる。CN はカプセル化パケットを受信すると、パケットのデカプセル化を行い仮想 IP パケットを抽出する。その後、 $Path ID$ を元に自身のトンネルテーブルを検索し、MN の仮想 IPv4 アドレス VIP_{4B} を取得する。CN はパケット内の送信元アドレスを VIP_{4MN} から VIP_{4B} へ、宛先アドレスを VIP_{4A} から VIP_{4CN} へ変換し、CN の IPv4 アプリケーションへ渡す。

また、CN の IPv4 アプリケーションが MN へパケットを送信する際は、MN が同様にデカプセル化時にパケット内の仮想 IPv4 アドレスを変換を行う。

- IPv6 アプリケーションの場合

IPv6 においては、仮想 IPv6 アドレスが DC により一意に配布されるため、IPv4 のような通信中のアドレス変換は行わない。そのため、IPv6 では、図 5 のような仮想 IP パケットのカプセル化・デカプセル化のみで通信を行う。

4. 実装

NTMobile の基本動作は Linux において既に動作が検証されている。そこで NTM 端末の NTMobile モジュールに提案方式に係わる改造を加えた。

図 6 に NTM 端末のモジュール構成を示す。NTM 端末はユーザ空間の NTMobile デーモンと、カーネル空間の NTMobile カーネルモジュールにより動作する。NTMobile デーモンは DC への NTM 端末情報の登録と仮想 IP アドレスの取得、および DC の指示に従ったトンネル構築を行う。カーネルモジュールはパケットのカプセル化/デカプセル化および暗号化処理を行う。

提案方式による仮想 IPv4 アドレスの管理は、NTMobile デーモン内のトンネル構築を行うモジュールを改造する。また、トンネル通信中の処理は、NTMobile カーネルモジュール内のデカプセル化を行うモジュールを改造する。

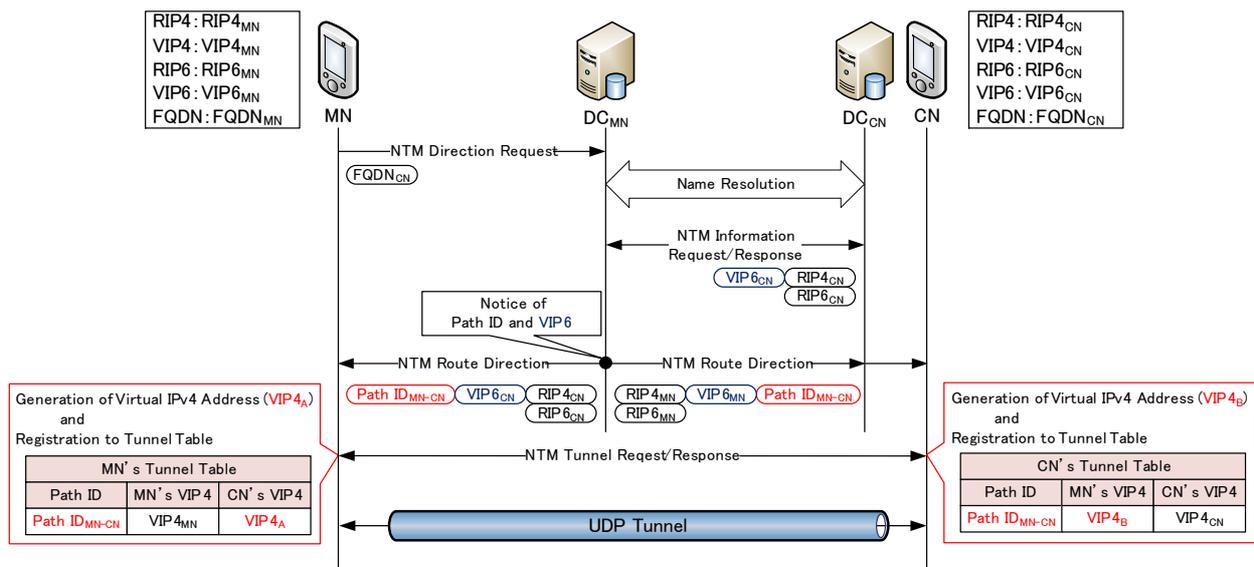


図 4 通信開始時の動作

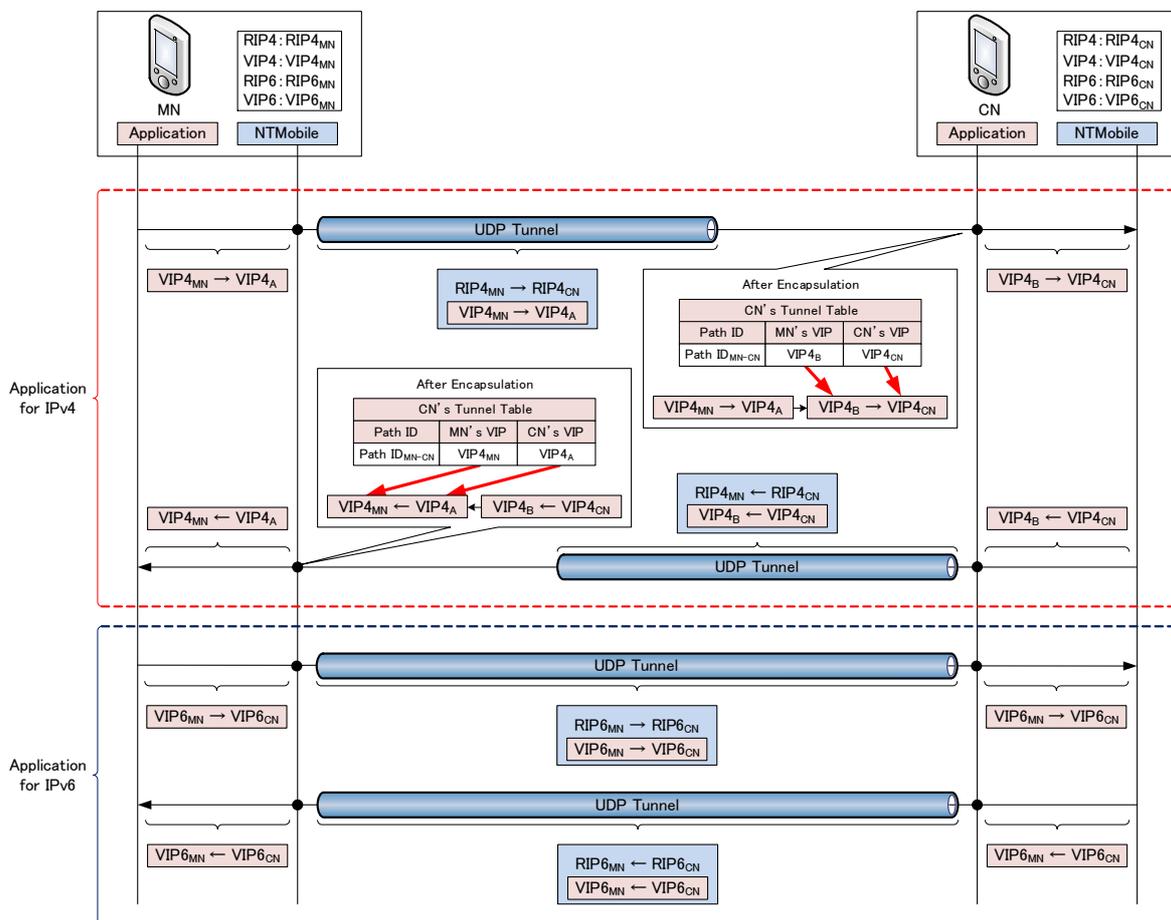


図 5 トンネル通信時のアドレス遷移

5. 評価

試作モジュールにて仮想 IPv4 アドレスにおけるトンネル通信の検証と性能測定を行った。

図 7 に試験ネットワークの構成を、表 1 に各装置の仕様を示す。NTM 端末 MN および CN は Linux をインストールした実機 PC に実装し、プライベートネットワークへと直接接続した。試験ネットワークでは、NAT などが含ま

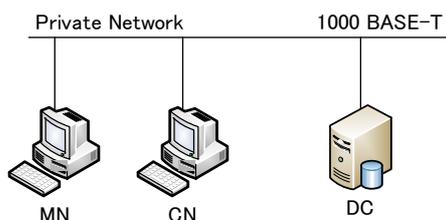


図 7 ネットワーク構成

表 1 NTM 端末の仕様

	MN	CN
Hardware	Thirdwave Prime	Thirdwave Prime
OS	Ubuntu 10.04	Ubuntu 10.04
Linux Kernel	2.6.32-21-generic	2.6.32-21-generic
CPU	Intel Core i7-860	Intel Core i7-930
Memory	3GB	3GB

表 2 トンネル通信時のスループット測定結果

	Conventional	Proposal
Throughput(Mbps)	402.5	400.4

れていないが提案方式の検証を行ううえでは、図 7 の構成で十分と判断した。MN, CN, DC を 1000BASE-T による有線 LAN で接続した。今回はアドレス生成処理が未実装であるため、通信相手の仮想 IPv4 アドレスを静的に設定した。

MN と CN 間で iperf^{*1} を用いた TCP 通信を行い、動作検証およびスループットの測定を行った。ここでは、従来の NTMobile によるトンネル通信と提案方式によるトンネル通信のスループットを比較した。スループット測定には、10 秒間のスループット測定を MN, CN 間で 10 回行い、その平均値を算出した。

表 2 に NTM 端末間のトンネル通信によるスループットの測定結果を示す。従来方式に比べて提案方式のスループットは 0.5% 低い値となった。この結果より、提案方式の通信において、NTM 端末の仮想 IPv4 アドレス変換処理がスループットの低下に大きな影響を及ぼすことがなかった。

6. まとめ

本論文では、NTMobile の仮想 IPv4 アドレスおよび仮想 IPv6 アドレスの管理方法について提案を行った。仮想 IPv4 アドレスにおいては、NTM 端末内部で仮想 IPv4 アドレスを自律的に生成する。Path ID で通信を識別し、通信パケットの仮想 IP アドレスを NTM 端末内部で自ら生成した仮想 IP アドレスに変換する方式を提案した。これにより、限られたアドレス帯域で NTMobile をほぼ無限の

規模まで運用できるようになった。また、仮想 IPv6 アドレスにおいては、IP アドレスのフォーマットおよび一意な IP アドレスの生成手法について提案した。仮想 IPv6 アドレスに DC のグローバル IPv4 アドレスを付加することで、DC 単位で仮想 IPv6 アドレスを管理する。これにより、DC 間で仮想 IPv6 アドレスが重複しないことを保証できるため、アドレス管理が容易になった。

Linux 上で仮想 IPv4 アドレスにおける提案方式の実装を行い、動作を検証した。従来の NTMobile と提案方式による NTMobile を用いて NTM 端末間のトンネル通信によるスループットを比較し、提案方式によるスループットの劣化がほとんどないことを確認した。

参考文献

- [1] 内藤克浩, 上醉尾一真, 西尾拓也, 水谷智大, 鈴木秀和, 渡邊 晃, 森香津夫, 小林英雄: NTMobile における移動透過性の実現と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp. 380—393(2013).
- [2] 鈴木秀和, 上醉尾一真, 水谷智大, 西尾拓也, 内藤克浩, 渡邊 晃: NTMobile における通信接続性の確立手法と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp. 367—379(2013).
- [3] 上醉尾一真, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃: IPv4/IPv6 混在環境で移動透過性を実現する NTMobile の実装と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.10, pp. 2288—2299(2013).
- [4] 納堂博史, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃: NTMobile における自立的経路最適化の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp. 394—403(2013).
- [5] 土井敏樹, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃: NTMobile におけるアドレス変換型リレーサーバの実装と動作検証, 情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告], Vol.2013-MBL-67, No.11, pp. 1-6(2013).
- [6] 上醉尾一真, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃: IPv6 ネットワークにおける NTMobile の検討, 情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告], Vol.2011-MBL-59, No.9, pp. 1-7(2011).
- [7] H. Soliman.: Mobile IPv6 Support for Dual Stack Hosts and Routers, RFC5555, IETF(2009).
- [8] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko.: Mobility Support in IPv6, RFC3775, IETF(2004).
- [9] C. Perkins.: IP Mobility Support for IPv4, Revised, RFC5944, IETF(2010).
- [10] H. Levkowitz and S. Vaarala.: Mobile IP Traversal of Network Address Translation (NAT) Devices, RFC3519, IETF(2003).
- [11] 井戸上彰, 久保健, 横田英俊, 長谷川亨, 大橋正良: 独立に管理された Mobile IP ネットワーク間のローミング手順とその実装, 情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告], Vol.2002-MBL-022, No.94, pp. 31-38(2002).
- [12] 井戸上彰, 久保健, 横田英俊: プライベートアドレスを使用するモバイルネットワーク間のローミング手順とその実装, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.12, pp. 2958—2967(2003).
- [13] S. Bradner.: Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices, RFC2544, IETF(1999).
- [14] G. Huston, A. Lord, P. Smith.: IPv6 Address Prefix Reserved for Documentation, RFC3849, IETF(2004).

*1 <http://sourceforge.net/projects/iperf/>