

NTMobileを無限の規模に拡大できる 仮想IPv4アドレス管理方式の提案

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

受付日 2016年4月26日, 採録日 2016年12月1日

概要: 現状のIPネットワークには, NAT越え問題や移動透過性など様々な通信にかかわる制約がある. NTMobile (Network Traversal with Mobility) は, これらの制約を大幅に除去することができる技術である. NTMobileでは, 端末に対して一意な仮想IPアドレスを割り当てるという特徴がある. しかし, 仮想IPv4アドレスとして利用できるアドレス数に制限があり, システム規模が限定されるという課題があった. 本論文では通信セッションごとに割り当てられるPathIDを通信識別情報として利用し, NTM端末内では自由に仮想IPアドレスを使用できるようにした. この方法により, 仮想IPv4アドレスとして利用できるアドレス数の制約がなくなり, NTMobileを実質的にほぼ無限の規模まで拡大できるようになった. 提案方式を実装して動作を検証し, 性能にもほとんど影響のないことを確認した.

キーワード: NAT越え問題, 通信接続性, 移動透過性

Proposal for Management Method of Virtual IP Addresses That can Expand NTMobile to Infinite Scale

MASANORI KAKO^{1,a)} HIDEKAZU SUZUKI¹ KATSUHIRO NAITO² AKIRA WATANABE^{1,b)}

Received: April 26, 2016, Accepted: December 1, 2016

Abstract: There are various constraints in existing IP networks, such as the NAT traversal problem and mobility. NTMobile (Network Traversal of Mobility) is the technology that can be expected to remove these constraints. NTMobile has the feature that a unique virtual IP address is assigned to each node. However, there is a limitation in the number of Virtual IP addresses which leads to the limitation of the system scale of NTMobile. In this paper, Path ID, which is originally assigned for a session identity, is used for the communication Identity information, to be able to make a free virtual IP address in the NTMobile node. By this way, the constraint of the limitation of virtual IP addresses is eliminated and the system scale of NTMobile becomes almost infinite. We have implemented the proposed system, and confirmed that it does not affect the performance of the system.

Keywords: NAT traversal problem, connectivity, mobility

1. はじめに

インターネットの爆発的な普及により, TCP/IPを利

用したネットワークの様々な課題が明らかになってきた. IPv4グローバルIPアドレスの枯渇は以前から指摘されており, 1994年にはすでにIPv6が標準化されていた. しかしIPv4プライベートアドレスのアイデアが導入され, NAT (Network Address Translation) を利用したネットワークが瞬間に普及した. これにともない, IPv6はIPv4との互換性がないため, 普及せず取り残される形となった. IPv6はIPv4のアドレス枯渇に長期的に対処できる唯一の手段であるため, IPv6への移行は今後徐々に進むものと考

¹ 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

² 愛知工業大学情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology, Toyota, Aichi 470-0392, Japan

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

b) wtnbakr@meijo-u.ac.jp

えられる。しかし、IPv4は今後も当分の間利用され、重要なプロトコルであり続けると考えられる。そこで本論文では、IPv4にかかわる現状の課題を整理し、これを解決するための手段を検討する。

現状のネットワークの課題は、通信接続性と移動透過性に大きく分類できる。通信接続性については、グローバルアドレス側からプライベートアドレス側に通信開始ができない NAT 越え問題が最も大きい課題といえる。移動透過性については、通信経路上に NAT が存在する環境において有用な方式がいまだに存在しないという課題がある。

IPv4における NAT は、外部からの不正アクセス防止を最優先とする企業のセキュリティポリシーと整合性があり、NAT 越え問題はこれまで大きな問題とはならなかった。しかし、CGN (Carrier Grade NAT) を導入し、キャリアネットワーク自体がプライベートアドレスを適用する状況や、ホームネットワークなどプライベートネットワークがさらに普及する状況に鑑みると、NAT 越え問題が多様なサービスを提供するうえで大きな障壁になることが予想される。したがって、NAT 越え問題の解決は IPv4 において解決すべき最大の課題といえる。

NAT 越え問題を解決する代表的な技術としては、STUN (Session Traversal Utilities for NATs) [1], [2], TURN (Traversal Using Relay around NAT) [3], [4], ICE (Interactive Connectivity Establishment) [5], [6] などがある。しかし、これらの技術はいずれもアプリケーションが NAT を意識する必要があるうえ、端末の移動を考慮していないという課題がある。

次に、無線周波数帯域の割当てが逼迫してきたことにより、つねに効率の良い周波数帯を選択して通信したいという要求が出始めている。携帯電話網は高トラフィックに弱く、通信中であっても Wi-Fi にオフロードしたいという要望がある。オフロード先が私設の Wi-Fi ネットワークであると、IP アドレスが変化することは避けられないため、端末における移動透過性技術は、今後必須の機能になるものと考えられる。

移動透過性技術については、将来 IPv6 が主流になることを見越した技術が多く研究されてきたが [7], [8], [9], [10], IPv4 が主流の現状のネットワークには対応できない。IPv4 を対象とし、かつ NAT 越え問題を想定した方式は存在するものの、それぞれが次のような課題を残したものとなっている。Mobile IP Traversal of NAT Devices [11] は、アドレス管理を行う HA (Home Agent) と移動端末 MN (Mobile Node) 間の通信をカプセル化することにより移動透過性と NAT 越えを実現するが、移動できるのは一方の端末だけであり、通信経路がつねに HA を経由した冗長になる。また、移動端末 1 台に対して 1 つのグローバル IP アドレスが必要になるという大きな課題がある。Mobile IP Using Private IP Address [12] は、HA と訪問先ネットワークに

設置される FA (Foreign Agent) が NAT の機能を持つことにより、グローバル IP アドレスを消費しない工夫がなされているが、NAT の置き換えが必要であるため、移動範囲が限定される。

NTMobile (Network Traversal with Mobility) [13], [14], [15], [16] は、NAT 越え問題と移動透過性を同時に解決できる技術として期待できる。アプリケーション開発者はネットワークの制約を意識する必要がなくなる。NTMobile を利用することにより、これまでのクライアント/サーバ型通信モデルとは別に、エンドツーエンド型通信モデルが実現可能となり、アプリケーションの在り方を大きく変えるとともに、サービスの幅を広げることができる。

NTMobile は、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る。仮想 IP アドレスはアプリケーションが意識するアドレスであり、IPv4 でも IPv6 でもどちらでもかまわない。仮想 IP アドレスにより生成されたパケットは、端末の持つ実 IP アドレスでカプセル化されて通信相手に送信される。このため、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替えによるアドレス変化にいっさい影響されないという特徴がある。ここで、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割り当てている。そのため、従来の NTMobile では、IPv4 の仮想 IP アドレスが約 13 万個程度しか確保できず、同時に稼働できる NTMobile 端末の数がこの範囲に限定されるという課題があった。既存アプリケーションはほとんどが IPv4 対応であるため、システム規模が制限されることは NTMobile の有用性を大きく損なうことになる。

この課題を解決するため、本論文では通信セッションごとに割り当てられる Path ID を通信識別情報として利用し、NTM 端末内では任意の仮想 IP アドレスを生成する方式を提案する。すなわち、これまで仮想 IP アドレスが NTMobile 通信の通信識別情報となっていたがこれを見直し、Path ID を仮想 IP アドレスと紐づけることにより、送信側と受信側の仮想 IP アドレスを切り離す。この方式によると、自らが意識する送受信仮想 IP アドレスペアと、通信相手が意識するアドレスペアは異なるものとなる。Path ID を通して、仮想 IP アドレスを NTM 端末内で変換することにより、上位アプリケーションに対しては、これまでどおり仮想 IP アドレスを通信識別子として見せる。この方式によると、NTMobile は実質的にはほぼ無限の仮想 IP アドレスを利用できるようになり、システム規模の制約をなくすることができる。

本提案方式を実装して動作検証、および性能測定を行った結果、従来に比べてスループットの劣化がほとんどないことを確認した。

以下、2 章で既存研究、3 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。4 章で提案手法の動

作, 5章で提案手法の実装, 6章で提案手法の評価について述べ, 7章でまとめる.

2. 既存研究

本章では以下の2つの条件を満たす既存技術を取り上げる. 1つは, IPv4 ネットワークの NAT が存在する環境において, 双方向の通信接続性が保証されること, すなわち NAT 越え問題を解決できること, もう1つは, 通信中のネットワーク切替えに対応できること, すなわち移動透過性を有することである. これらの条件を満たす既存技術の課題を示し, グローバル IPv4 アドレスに対して, どのような影響を及ぼすかを述べる.

2.1 Mobile IP Traversal of NAT Devices

Mobile IP は, Mobile IP 機能を実装した移動端末 MN (Mobile Node), 移動しない一般の端末 CN (Corresponding Node), およびホームネットワーク上に存在し, MN の IP アドレスの管理および MN 宛のパケットを代理受信して転送を行う HA (Home Agent) によって構成される. また, MN はアプリケーションが通信識別子として利用する IP アドレス HoA (Home Address) と, 訪問先のネットワークで割り当てられる IP アドレス CoA (Care of Address) の2種類の IP アドレスを使用する.

図1に Mobile IP を NAT 環境でも利用可能とした Mobile IP Traversal of NAT Devices の通信の様子を示す. MN がホームネットワーク上に存在する場合, MN は移動端末としての特別な処理を行わず, HoA を用いて CN と通常の通信を行う. MN が訪問先ネットワークに移動した場合, MN は HoA と CoA の登録を行うために HA に登録要求メッセージを送信する. HA はメッセージ内に含まれる CoA とメッセージの IPv4 ヘッダに含まれる送信元 IP アドレスの比較を行う. 2つの IP アドレスが異なる場合, HA は MN が NAT 配下に移動したと判断し, MN に対して HA との間 UDP トンネルを構築するよう指示する. トンネル通信における内側のアドレスを MN の HoA と CN のアドレス, 外側のアドレスを, MN の CoA と HA のアドレスとすることにより, HA 経由の通信が可能になる.

この方式は MN からの登録要求メッセージが受信できる

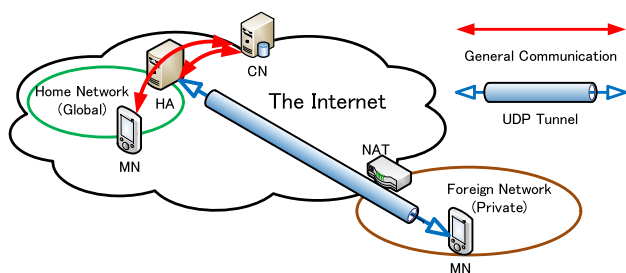


図1 Mobile IP Traversal of NAT Devices の通信

Fig. 1 Communication of Mobile IP Traversal of NAT Devices.

ように, HA をグローバルネットワーク上に設置する必要がある. そのため移動端末が利用する HoA はグローバル IP アドレスでなければならない, MN の数だけグローバルアドレスを準備する必要がある. このような条件は, グローバルアドレスが枯渇している IPv4 ネットワークの現状に鑑みると現実的ではない. また, 移動先での通信はつねに HA による中継を必要とするため, 通信経路が冗長になるという課題がある.

2.2 Mobile IP Using Private IP Address

Mobile IP Using Private IP Address は, HA に加えて訪問先のネットワークに FA (Foreign Agent) を設置する. HA および FA がそれぞれ NAT 機能を有し, HA, FA 配下の端末にはプライベート IP アドレスが割り当てられる.

図2に Mobile IP Using Private IP Address の通信を示す. MN の HoA はプライベートアドレスでよい点が特徴である. MN がホームネットワーク上に存在する場合, MN と CN は HA の NAT 機能により通常の通信が行われる. MN が訪問先ネットワークに移動した場合, MN は FA を経由して HA に登録要求メッセージを送信する. HA は, MN の HoA と FA のグローバル IP アドレスを登録する. FA では MN の HoA と対応する HA のグローバル IP アドレス, MN の MAC アドレスを登録する. FA が MN からパケットを受信すると, パケットの MAC アドレスから MN を識別し, HA に対してパケットをカプセル化して転送する. HA はパケットをデカプセル化した後に, パケット内の送信元アドレス (HoA) を HA のグローバル IP アドレスに変換し, CN 宛に転送する. CN からの応答は, 宛先が HA となるため, HA がパケットを受信する. HA はパケット内の宛先アドレス (HA のグローバル IP アドレス) を HoA に変換した後, HA-FA 間のトンネルを用いて FA に転送する. FA は, HoA と HA のグローバル IP アドレスから MN を識別し, デカプセル化したパケットを MN の MAC アドレス宛てに転送する. 以上のように MN の HoA をプライベート IP アドレスとしながら, 移動透過性を実現することができる. このため, グローバルアドレスを新たに消費することはない. しかし, NAT 装置を HA と FA に置き換える必要があり, 移動先は FA の配下に限

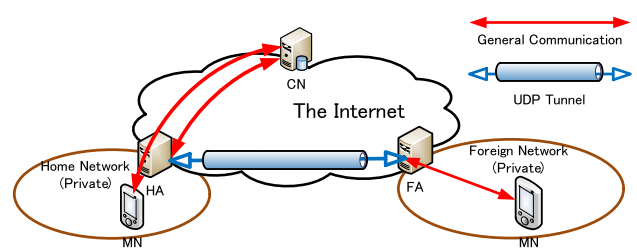


図2 Mobile IP Using Private IP Address の通信

Fig. 2 Communication of Mobile IP Using Private IP Address.

定される．通信経路は必ず HA を経由するため冗長になるという課題がある．

3. NTMobile

NTMobile は IPv4 と IPv6 の混在環境であっても動作するが，ここでは簡単のため，IPv4 に限定して記述する．

3.1 NTMobile の構成

図 3 に NTMobile の構成を示す．NTMobile は，NT-Mobile を実装した NTM 端末，通信経路を指示する DC (Direction Coordinator)，エンドツー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，グローバルネットワーク上に設置し，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．ただし，本論文では簡単のため，DC は 1 台に限定して記述する．

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．DC は DNS サーバの機能を有し，NTM 端末の通信開始時に通信相手の名前解決を行った後，NTM 端末に対して最適な通信経路の指示を行う．NTM 端末は DC に対して定期的に Keep Alive を行っており，DC からの指示をいつでも受信できる．DC が NTM 端末に対して適切な経路を指示することにより，NAT 越えを実現できる．アプリケーションによって生成された仮想 IP アドレスに基づくパケットは，端末の実 IP アドレスでカプセル化され，通信相手に送信される．通信中に端末がネットワークを切り替えると実 IP アドレスが変化するが，仮想 IP アドレスは変化しない．このようにしてアプリケーションに対して通信識別子となる IP アドレスの変化を隠蔽し，移動透過性を実現できる．端末どうしが直接通

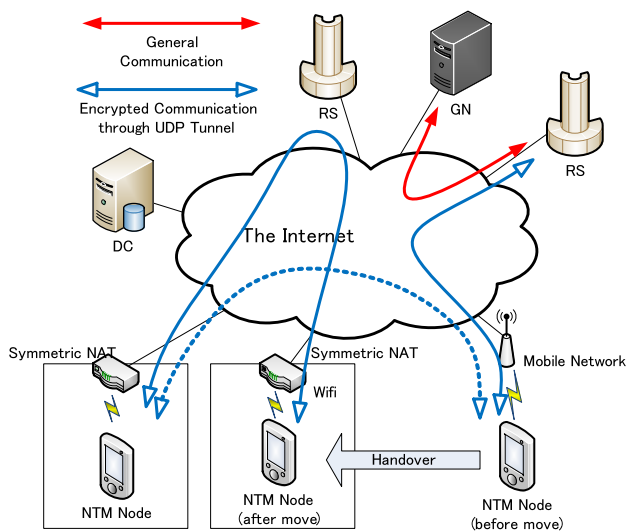


図 3 NTMobile の構成

Fig. 3 Configuration of NTMobile.

信を行えない場合は，RS 経由の通信を行う．直接通信が行えない場合とは，NTM 端末が一般端末 GN との通信を行う場合，および両 NTM 端末がいずれも symmetric NAT 配下に存在する場合である．RS を経由する場合であっても，複数の RS の中から 1 つを選択し，冗長経路の少ない経路を生成できる．

3.2 端末起動時と通信開始時の動作

通信開始側の NTM 端末を MN，通信相手側の NTM 端末を CN として説明する．また，NTM 端末 N の実 IPv4 アドレスを RIP_N ，仮想 IPv4 アドレスを VIP_N とする．NTM 端末 $N1$ と NTM 端末 $N2$ がトンネル通信時に使用する Path ID を $PathID_{N1-N2}$ と表記する．Path ID は通信開始時に DC が MN と CN に対して配布する情報であり，NTMobile の通信を一意に識別し，テーブルの検索を容易にするための情報である．

MN および CN は，端末起動時に DC に対して，自らの FQDN と RIP を端末情報として登録する．DC はこれらの情報をデータベースに登録した後，MN，CN に対して VIP を配布する．VIP はシステム内で重複しないように DC が管理する必要がある．MN，CN は以後 DC に対し定期的に Keep Alive を実行し，DC との経路を確保する．

通信開始時に MN は DC に対して，CN の FQDN を用いて名前解決およびトンネル構築の指示を依頼する．DC は MN および CN の端末情報を元に適切なトンネル経路を判断し，MN と CN に対してトンネル構築の指示を行う．MN と CN は DC の指示に従い，トンネルを構築する．たとえば，MN がグローバル IP アドレス，CN がプライベート IP アドレスであれば，DC は CN から MN に向けてトンネル要求のパケットを送信するよう指示する．MN，CN がともにプライベートアドレスであれば，DC が適切な RS を選択したのち，MN と CN に対して RS に向けてトンネル経路を生成するよう指示する．このようにして NAT が存在する環境であっても確実にトンネル経路を生成し NAT 越えを実現できる．

3.3 トンネル通信時の動作

図 4 にトンネル通信時の動作を IP アドレスを中心に示す．通信経路上に NAT が存在する場合は，実 IP アドレスが NAT で変換されるが，提案方式とは関連しない動作なので記述を省略する．

MN のアプリケーションは仮想 IP アドレスを用いてパケット (送信元: VIP_{MN} ，宛先: VIP_{CN}) を生成する．このパケットは NTMobile の機能により実 IP アドレス (送信元: RIP_{MN} ，宛先: RIP_{CN}) でカプセル化され CN へ送信される．MN からのパケットを受け取った CN は，パケットのデカプセル化を行い，仮想 IP アドレスに基づくパケットを取り出す．このようにして MN と CN は仮想

IP アドレスに基づく通信を行う。

MN や CN がネットワークを切り替えて実 IP アドレスが変化した場合でも、アプリケーションが認識している通信識別子は仮想 IP アドレスであり変化しないため、移動透過性を実現することができる。

3.4 仮想 IP アドレスの管理にかかわる課題

NTMobile では、仮想 IPv4 アドレスとして、IANA (Internet Assigned Numbers Authority) で規定された 198.18.0.0/15 [17] 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り、実ネットワークの IP アドレスとして利用されないことが保証されている。この帯域を、NTM 端末に対し仮想 IP アドレスとして重複しないように割り当てる。しかし、このアドレス帯域は 13 万個程度しかなく、NTMobile が普及した際、同時に稼働できる NTM 端末数が限定されると

いう課題がある。NTMobile で利用する仮想 IP アドレスは IPv6 アドレスでもよいため、上位アプリケーションには IPv6 アドレスのみを提供すればよいという考えも成り立つ。しかし、既存のアプリケーションのほとんどは IPv4 対応であるため、これらのアプリケーションでも NTMobile の仕組みを利用できるようにすることは NTMobile の実用化に向けて解決すべき最大の課題である。

4. 提案方式

提案方式では、仮想 IP アドレスから通信識別情報の役割を取り除き、Path ID を用いて NTMobile の通信を一意に識別する。NTM 端末は Path ID に基づいて仮想 IP アドレスの変換を行う。この方式により、端末内で自由に仮想 IPv4 アドレスを生成することが可能となる。仮想 IP アドレスとして使える範囲は、198.18.0.0/15 のままとする。この中から 198.18.0.1 を自らの仮想 IP アドレスとして固定化して割り当て、それ以外のアドレスを通信相手に割り当てる。ただし、198.18.0.0 はアプリケーションによってはネットワークアドレスとして認識され、通信できないことがあるので使用しない。

4.1 通信開始時の動作

図 5 に提案方式における通信開始時の動作を示す。以後の説明では、簡単のため NAT を省略してあるが、NAT 越えの動作は既存の NTMobile と同様である。DC には MN と CN の実 IP アドレスと FQDN がすでに登録されているものとする。MN のアプリケーションは CN と通信を行うとき、CN の FQDN を用いて自らのリゾルバに名前解決を依頼する。ここで MN の NTMobile 機能はリゾルバの出力する DNS 問合せをフックし、DC に対して

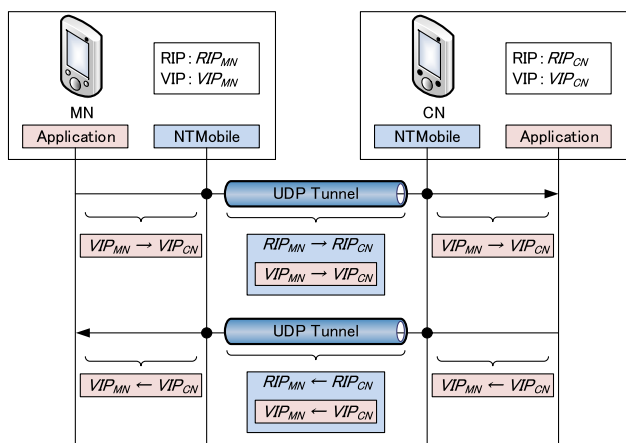


図 4 トンネル通信時の動作
Fig. 4 Behavior of the tunnel communication.

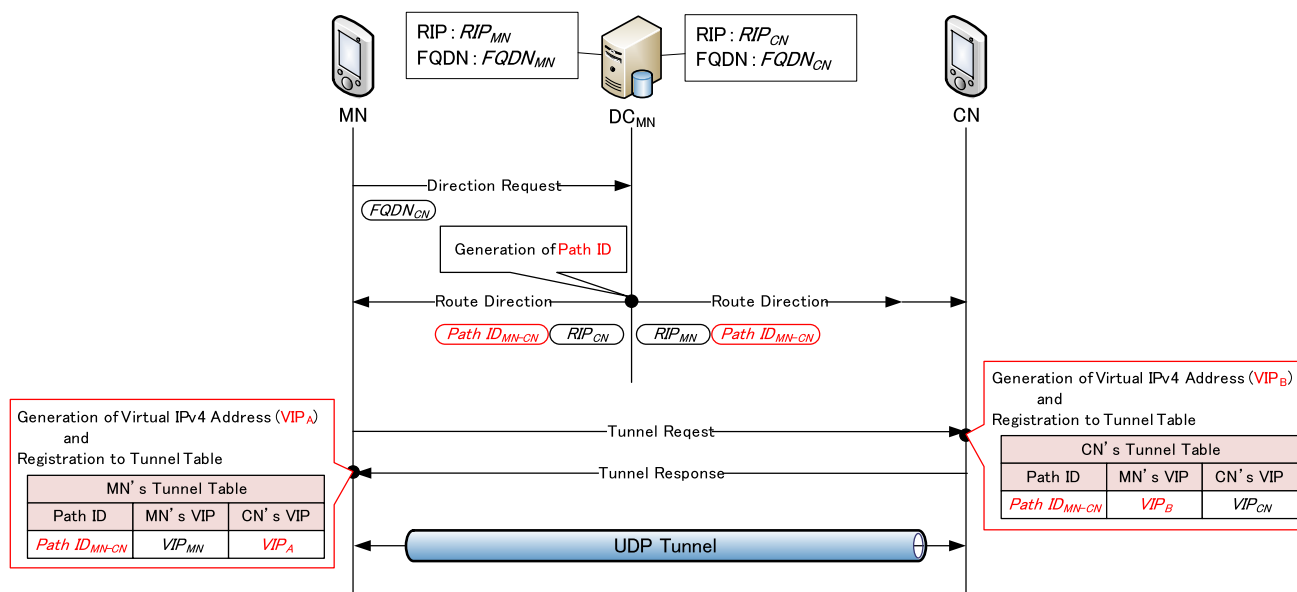


図 5 提案方式における通信開始時の動作
Fig. 5 Behavior of the start up process in the proposed method.

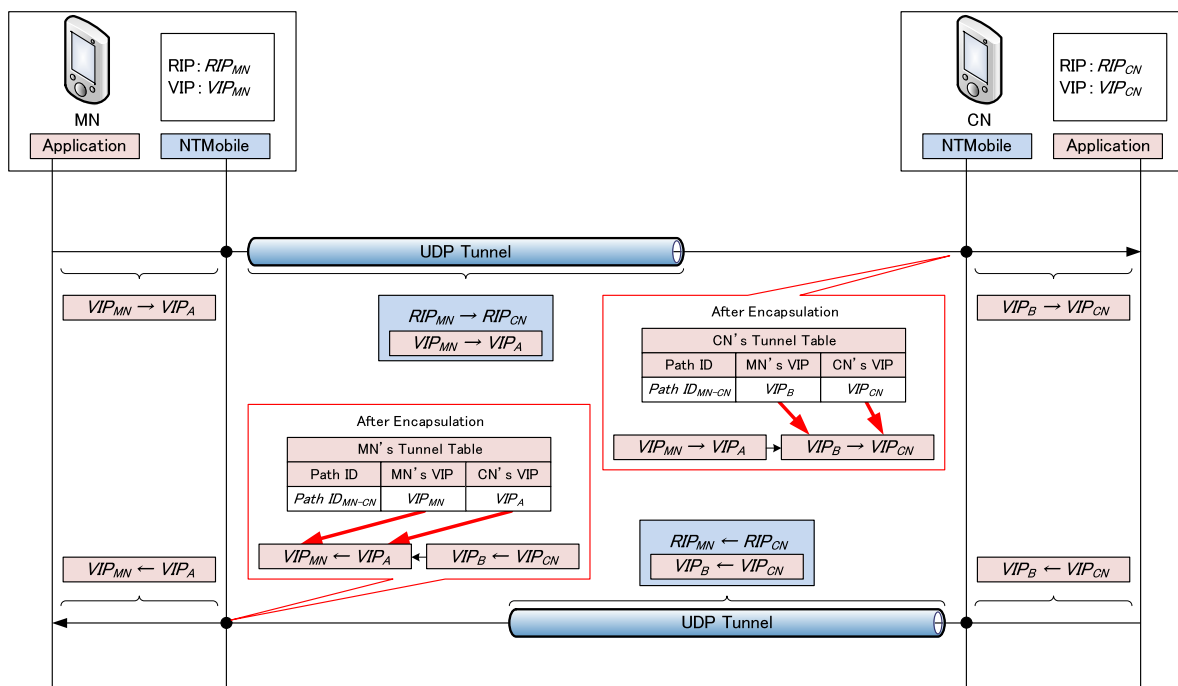


図 6 提案方式におけるトンネル通信のアドレス遷移

Fig. 6 Address transition of the tunnel communication in the proposed method.

Direction Request を送信する。DC は MN および CN に Route Direction により通信経路の指示と $PathID_{MN-CN}$ を通知する。DC から指示を受けた MN と CN は、Tunnel Request/Response により最適経路のトンネルを構築する。

CN 側は Tunnel Request 受信時に、MN 用の仮想 IPv4 アドレス VIP_B を任意の値で生成する。また MN 側は、Tunnel Response 受信時に、CN 用の仮想 IPv4 アドレス VIP_A を任意の値で生成する。自分の仮想 IPv4 アドレス VIP_{MN} および VIP_{CN} は、ともに 198.18.0.1 である。 $PathID_{MN-CN}$ と関連付けて、CN 側は VIP_B/VIP_{CN} ペアの値を、MN 側は VIP_{MN}/VIP_A ペアの値をそれぞれトンネルテーブルに登録する。MN は CN の IP アドレスを VIP_A として、CN は MN の IP アドレスを VIP_B としてアプリケーションに渡す。このように、MN と CN とも通信相手を任意の仮想 IP アドレスで認識し、その関係は $PathID_{MN-CN}$ によって関連付けられる。トンネルテーブルには、仮想 IP アドレスのほかにカプセル化するときに必要な実アドレスの対応関係も記載されるが、図 5 では簡単のため省略している。

4.2 トンネル通信時の動作

図 6 に提案方式におけるトンネル通信のアドレスの遷移を示す。MN のアプリケーションは、自身の仮想 IPv4 アドレスを VIP_{MN} 、CN の仮想 IPv4 アドレスを VIP_A として認識している。また、CN のアプリケーションは、自身の仮想 IPv4 アドレスを VIP_{CN} 、MN の仮想 IPv4 アドレスを VIP_B として認識している。

MN のアプリケーションは CN へパケットを送信する際、仮想 IP アドレスによる IP パケット (送信元: VIP_{MN} , 宛先: VIP_A) を生成する。MN は VIP_A をキーとしてトンネルテーブルを検索し、該当したエントリにしたがって仮想 IP パケットを実 IP アドレス (送信元: RIP_{MN} , 宛先: RIP_{CN}) でカプセル化して送信する。カプセル化パケットには NTMobile の情報を記載した NTM ヘッダが付加され、その中には $PathID_{MN-CN}$ が含まれている。このパケットは受信側 CN において、カプセル化を解いた後、仮想 IP アドレスの変換処理が実行される。すなわち、図 6 で示すように、仮想 IP アドレスの内容が送信元: VIP_{MN} , 宛先: VIP_A から、送信元: VIP_B , 宛先: VIP_{CN} のように変換される。このときの変換ルールはトンネルテーブルに記載されている。トンネルテーブルは通信開始時に生成され、その生成方法と PathID の関連付け方法は図 5 に示したとおりである。

逆方向の通信においても同様の動作を実行する。MN から CN への通信においては CN にて仮想 IP アドレスの変換を行い、CN から MN への通信においては MN にて仮想 IP アドレスの変換を行う。

5. 実装

NTMobile の基本動作は Linux においてすでに動作が検証されている [15]。図 7 に NTM 端末のモジュール構成を示す。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

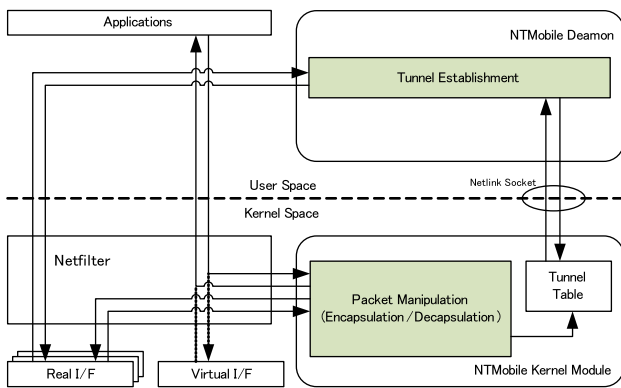


図 7 NTM 端末のモジュール構成

Fig. 7 Module configuration of NTM node.

カプセル化/デカプセル化および暗号化処理を行う。各モジュールに以下のような改造を行った。

5.1 NTMobile デーモン

NTM 端末の端末情報登録時に、自端末の仮想インタフェースに仮想 IPv4 アドレス (198.18.0.1) を固定値として設定する。通信開始時に通信相手の仮想 IPv4 アドレスを端末内部で生成し、トンネルテーブルに登録する。アプリケーションには自身が生成した上記仮想 IP アドレスを通信相手のアドレスとして通知する。

5.2 NTMobile カーネルモジュール

受信パケットのデカプセル化を行った際に、NTM ヘッダ内から Path ID を取得する。Path ID をキーとして、トンネルテーブルから通信相手用の仮想 IPv4 アドレスを取得する。仮想 IP パケット内の仮想 IPv4 アドレスの送信元および宛先を、端末内部で管理する仮想 IPv4 アドレスに変換する。

5.3 DC にかかわる改造

DC は NTM 端末の立ち上げ時に仮想 IPv4 アドレスを重複しないように配布し、通信開始時に PathID を重複しないように配布する役割を持っていた。今回の提案により、仮想 IPv4 アドレスの配布が不要になる。しかし、NTM 端末側では仮に仮想 IPv4 アドレスが DC から配布されたとしても、使わないだけで特に問題は発生しない。以上の理由により、DC にかかわる改造は特に行わなかった。

6. 評価

本章では、6.1 節において提案方式の動作検証と性能評価を行った結果を述べる。また、6.2 節において提案方式と従来方式を定性的に比較した結果を示す。

6.1 動作検証と性能測定

提案方式は、自らの IP アドレスと通信相手の IP アドレ

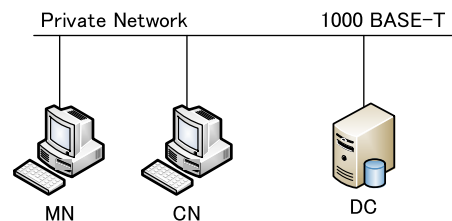


図 8 検証ネットワークの構成

Fig. 8 Configuration of the verification network.

表 1 NTM 端末の仕様

Table 1 Specifications of NTM nodes.

	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	3 GB	3 GB

スを任意の値で生成するので、これまでの一般的な通信方法とは異なる。このような方法は仮想 IP アドレスを利用していることから初めて可能になる。そこで、この提案方式が実際に動作可能であることを検証するとともに、中継性能への影響を調査した。図 8 に検証ネットワークの構成を、表 1 に各装置の仕様を示す。MN と CN は LinuxPC に実装し、DC とともに同一ネットワーク上に 1000BASE-T で直接接続した。試験ネットワークでは、NAT を導入していないが、本提案は NTM 端末の中継時の内部処理のみにかかわるものであるため、図 8 のネットワーク構成で十分と判断した。

提案方式では、従来のトンネル通信の処理に仮想 IP パケットのアドレス変換の処理が加わる。MN と CN 間で iperf^{*1}を用いた TCP 通信を行い、提案方式におけるトンネル通信のスループット測定を行った。また、従来の NTMobile のスループットの測定結果と比較した。スループット測定には、10 秒間の測定を 10 回を行い、その平均値を算出した。

提案方式には仮想 IP アドレスの変換を行うという新たな機能が必要になるが、性能的には 1 パケットあたりの処理負荷が増えたにすぎない。また、通信ストリームが複数になっても PathID が異なる通信は処理的に独立しており、互いに影響を与えることはない。1 パケットあたりの処理負荷の増加がトータルスループットに影響を与える可能性もあるが、提案方式の評価とは別の話である。以上のことから、提案方式のスループット評価としては、1 ストリームでの処理負荷の増加を調査するだけで十分と判断した。

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

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

表 3 識別子の違い

Table 3 Differences in the identifiers.

	Mobile IPv4		NTMobile	
	Traversal of NAT (図 1)	Using Private IP (図 2)	従来	提案
位置識別子	CoA	・ FA の IP アドレス (システム固有) ・ MN の MAC アドレス (端末固有)	RIP	RIP
通信識別子	HoA (Global IP)	HoA (Private IP)	DC から配布された VIP	NTM 端末内部で生成した VIP
備考	グローバルアドレス枯渇に逆行	NAT の置き換えが必要	同時に通信できる規模が限定	通信規模の制約なし

表 2 トンネル通信時のスループット測定結果

Table 2 Throughput results of the tunnel communication.

	Conventional	Proposal
Throughput (Mbps)	402.5	400.4

プットは低下するものの、その低下率は約 0.5%であった。今回の測定はネットワークが理想的な環境で行ったので、スループットの低下は端末の処理時間の増加に起因する。しかし、実際のインターネット環境では、ネットワーク遅延の影響によりスループットが理想環境より 1 桁以上減少する [16]。実環境ではスループットの決定要因がネットワーク遅延に大きく依存するため、今回の端末処理時間の増加は、実環境においては誤差の範囲内の影響にとどまると考えられる。

通信開始時の動作については、提案方式と従来の NTMobile で処理性能の有意差は認められなかった。通信開始時のシーケンスはこれまでと同様で、トンネルテーブルの生成が処理として加わるが、この処理の増加は誤差の範囲内に入るほどわずかである。従来の NTMobile における通信開始時の性能については [15] に示されている。

6.2 既存技術との比較

移動透過性技術は、一般的に IP アドレスが持つ位置識別子と通信識別子を分離する形で実現される。位置識別子はルータがパケットを中継するために必要な情報で、通信識別子はアプリケーションが通信を識別するために必要な情報である。IP ネットワークでは、IP アドレスがこの 2 つの識別情報を兼ねているため分離する必要がある。

表 3 に各方式における識別子の違いをまとめる。Mobile IP Traversal of NAT Devices では、位置識別子が CoA、通信識別子が HoA となる。HoA がグローバルアドレスの必要があり、アドレスが枯渇する現在においては現実的な方法ではない。Mobile IP Using Private IP Address では、位置識別子が FA の IP アドレスと MN の MAC アドレスの組合せ、通信識別子はプライベートアドレスの HoA である。グローバルアドレスを消費することはないが、その見返りとして NAT を置き換える必要があり、移動先が限

表 4 NTMobile で同時に通信可能な端末数

Table 4 The number of viable simultaneous communication.

	従来	提案
同時に稼働できる NTM 端末数	131,070	制約なし
1 台の NTM 端末が識別できる端末数	131,069	131,069

定される。

従来の NTMobile では、位置識別子が実 IP アドレス、通信識別子が DC から配布された仮想 IP アドレスである。DC でプールできる IP アドレス (約 13 万個) を分け合う必要があり、同時に稼働できる NTM 端末の規模が限定される。提案方式の NTMobile では、位置識別子が実 IP アドレス、通信識別子が NTM 端末内部で生成した仮想 IP アドレスとなる。NTM 端末は自由に仮想 IP アドレスを生成してよいため通信規模の制約がない。

表 4 に NTMobile で同時に稼働できる NTM 端末数と、1 台の NTM 端末が同時に通信できる通信相手端末数を、従来方式と提案方式で比較した。従来方式では、DC から配布された仮想 IPv4 アドレスが通信識別子であり、利用できる仮想 IPv4 アドレスの数は、131,070 個に限定され、同時に稼働できる NTM 端末数も同様の数に限定される。このため NTMobile の普及の大きな足かせとなっていた。それに対し提案方式では、NTM 端末内部での仮想 IP アドレスの重複を避ければよいだけなので、すべての NTM 端末が独立して任意の仮想 IP アドレスを利用することができる。別の NTM 端末ペアが同じ仮想 IP アドレスで通信していてもかまわない。このように、仮想 IP アドレスの重複が許されるので、NTM 端末の最大数の制約が理論的になくなった。正確には、同時稼働できる通信ペア数が PathID の総数を越えることができないが、PathID は 128 ビットと十分な長さで定義されているので、同時通信ペア数は 2^{128} まで可能であり、実質的に制約がないといえる。1 台の NTM 端末が同時に通信できる端末数は、従来方式と提案方式とも同じで、仮想 IP アドレスの範囲から自分のアドレス、ブロードキャストアドレス、ネットワークアドレスを除いた 131,069 台である。

6.3 提案方式の課題

本提案方式には以下のような課題が残されている。すなわち、SIPのようにIPアドレスをメッセージ内で使用するアプリケーションでは、提案方式をそのまま利用することができない。これは提案方式がIPヘッダ内のアドレスのみを変換するためである。SIPを利用する場合は、仮想IPアドレスの変換とともに、メッセージ内のIPアドレスも変換する処理が必要になる。または、SIPを利用する場合は、アドレス変換をしない従来方式を限定的に利用し、提案方式と併用するというような方式を検討する必要がある。

7. まとめ

本論文では、NTMobileの仮想IPv4アドレスの管理方法について提案した。NTMobileのIPv4通信において、Path IDで通信を識別し、通信パケットの仮想IPアドレスはNTM端末内部で自ら生成する。この方法により、限られたアドレス帯域でNTMobileをほぼ無限の規模まで利用できるようになった。Linux上で提案手法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の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] Rosenberg, J., Weinberger, J., Huitema, C. and Mahy, R.: STUN — Simple Traversal of User Datagram Protocol (UDP) Through Network Address Translators (NATs), RFC3489, IETF (2003).

[2] Rosenberg, J., Mahy, R., Matthews, P. and Wing, D.: Session Traversal Utilities for NAT (STUN), RFC5389, IETF (2008).

[3] Mahy, R., Matthews, P. and Rosenberg, J.: Traversal Using Relays around NAT (TURN): Relay Extensions to Session Traversal Utilities for NAT (STUN), RFC5766, IETF (2010).

[4] Perreault, S. and Rosenberg, J.: Traversal Using Relays around NAT (TURN) Extensions for TCP Allocations, RFC6062, IETF (2010).

[5] Rosenberg, J.: Interactive Connectivity Establishment (ICE): A Protocol for Network Address Translator (NAT) Traversal for Offer/Answer Protocols, RFC5245, IETF (2010).

[6] Westerlund, M. and Perkins, C.: IANA Registry for Interactive Connectivity Establishment (ICE) Options, RFC6336, IETF (2011).

[7] Johnson, D., Perkins, C. and Arkko, J.: Mobility Support in IPv6, RFC3775, IETF (2004).

[8] Soliman, H.: Mobile IPv6 Support for Dual Stack Hosts and Routers, RFC5555, IETF (2009).

[9] Ishiyama, M., Kunishi, M., Uehara, K., Esaki, H. and Teraoka, F.: LINA: A New Approach to Mobility Support in Wide Area Networks, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E84-B, No.8, pp.2076–2086 (2001).

[10] 國司光宣, 石山政浩, 植原啓介, 寺岡文男: 移動体通信プロトコルLIN6の性能評価, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.2, pp.398–407 (2002).

[11] Levkowetz, H. and Vaarala, S.: Mobile IP Traversal of

Network Address Translation (NAT) Devices, RFC3519, IETF (2003).

[12] Kato, T., Idoue, A. and Yokota, H.: Mobile IP using private IP addresses, *Proc. 6th IEEE Symposium on Computers and Communications*, pp.491–497, ISSN: 1530-1346 (2001).

[13] 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).

[14] 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).

[15] 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).

[16] 納堂博史, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃: NTMobileにおける自律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).

[17] IANA: Special-Use IPv4 Addresses, RFC3330, IETF (2002).



加古 将規 (正会員)

2014年名城大学理工学部情報工学科卒業。2016年同大学大学院修士課程修了。同年株式会社NTTフィールドテクノ入社。在学時代、モバイルネットワークに関する研究に携わる。修士(工学)。



鈴木 秀和 (正会員)

2004年名城大学理工学部情報科学科卒業。2009年同大学大学院理工学研究科電気電子・情報・材料工学専攻博士後期課程修了。2008年日本学術振興会特別研究員。2010年名城大学理工学部助教。2015年より同大学理工学部准教授。ネットワークセキュリティ、モバイルネットワーク、ホームネットワーク等の研究に従事。博士(工学)。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。



内藤 克浩 (正会員)

1999年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2004年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程後期課程修了。同年三重大学工学部電気電子工学科助手。2007年同大学助教。2011年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員。2014年愛知工業大学情報科学部准教授。現在に至る。博士(工学)。無線ネットワーク、モバイルコンピューティングの研究に従事。2016年情報処理学会・長尾真記念特別賞受賞。電子情報通信学会、IEEE各会員。



渡邊 晃 (正会員)

1974年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1976年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三菱電機株式会社入社後、LANシステムの開発・設計に従事。1991年同社情報技術総合研究所に移籍し、ルータ、ネットワークセキュリティ等の研究に従事。2002年名城大学理工学部教授。現在に至る。博士(工学)。電子情報通信学会、IEEE各会員。