

平成28年度 修士論文

和文題目

最適なパケット中継装置選択手法の提案と実装

英文題目

**Proposal for the Selecting Method of an Optimal  
Packet Relay Server and its Implementation**

情報工学専攻 渡邊研究室  
(学籍番号: 153430021)

三宅 佑佳

提出日: 平成29年1月30日

名城大学大学院理工学研究科

## 内容要旨

モバイル端末の普及や無線通信技術の発展に伴い、インターネットのトラフィックが増加しており、通信効率の向上が求められている。現状のネットワークでは、コアネットワークが有線、モバイル端末は無線で接続されており、大陸を跨ぐネットワークについては海底ケーブルで接続されている。通信端末が通信相手端末と異なる NAT (Network Address Translation) 配下にあるとき、あるいは IPv4/IPv6 ネットワークが混在する環境下の相互通信においては、パケットを中継する装置が必要となる場合があるが、複数の中継サーバから最適な装置が選択できると有用である。中継サーバの選択指標として、パケットの RTT (Round Trip Time) を用い、測定値が最小の通信経路を選択する手法が検討されている。しかし、RTT は無線環境において値が大きく、揺らぐという特性がある。そこで、本論文では、モバイル端末が配下にある NAT と中継サーバ間、すなわち有線部分のみ RTT を調査し、最適なパケット中継サーバを選択する手法を提案する。また、提案手法を NTMobile (Network Traversal with Mobility) の機能として実装、及び性能評価を行った。動作検証から、実装した RTT の調査のプロトタイプが正常に行われることを確認し、性能評価から、RTT の調査結果に基づいて複数の中継サーバの区別ができることを確認した。

# 目次

第1章 序論	1
第2章 関連研究	3
2.1 RTTを用いたボトルネックリンクの可用帯域推定法	3
2.2 パケット対のRTTに着目したネットワーク帯域測定手法に関する研究	4
2.3 課題	5
第3章 中継サーバの選択指標	6
3.1 想定するシステム構成	6
3.2 RTTの推移	7
3.3 RTTの平均値	7
3.4 有線・無線におけるRTT	8
第4章 提案方式	15
4.1 提案方式の概要	15
4.2 RTT調査	15
4.2.1 IPv4ネットワークにおけるRTT調査	15
4.2.2 IPv6ネットワークにおけるRTT調査	16
4.3 RTTの平均値	17
4.4 中継サーバ選択	17
第5章 実装と評価	19
5.1 実装	19
5.1.1 DCへの実装	19
5.1.2 RSへの実装	19
5.2 動作検証	20
5.3 性能評価	22
第6章 結論	23
謝辞	24
参考文献	25





# 第1章 序論

スマートフォンやタブレットのようなモバイル端末の普及や無線通信技術の急速な発展により、インターネットは多岐に渡り、我々の日常生活において非常に重要な役割を果たしている [1,2]. それに伴い、インターネットのトラフィックが増加しており、通信効率の向上が求められている。

現状のネットワークでは、コアネットワークが有線、多くのモバイル端末が無線で接続されており、大陸を跨ぐネットワークについては海底ケーブルで接続されている。モバイル端末が通信相手端末と異なる NAT (Network Address Translation) 配下にある場合、IPv4/IPv6 ネットワークが混在する環境下の相互通信においては、パケットを中継する装置が必要である。そのため、複数の中継サーバから最適な中継サーバを選択することができれば、通信効率を上げることができる。また、ネットワークのトラフィックは時間経過により大きく変化するため、その変化に対応し、その都度適切な中継サーバを選択することができれば有用である。

これまで、中継サーバや通信経路の選択指標としてパケットの RTT (Round Trip Time) を用いる手法 [3-7] や、その測定値から通信経路を選択する手法 [8-10] が多数検討されている。中継サーバの選択指標としての用途を視野に入れ、RTT を用いてネットワーク環境を測定する既存研究として、RTT の測定結果を用いて帯域使用率から可用帯域を推定する手法 [3]、連続する二つのパケットから RTT の相関関係を求めてネットワークの帯域を測定する手法 [4]、RTT の平均値と標準偏差を用いたネットワーク帯域測定法 [5]、RTT の測定値からエンドツーエンドのインターネットサービスの低下を予測する手法 [6]、通信経路の状態を明確にして RTT を測定する手法 [7] などがある。また、RTT の測定結果を基に通信経路やサーバを選択する既存の手法として、SCTP (Stream Control Transmission Protocol) のための通信経路切手法 [8]、測定時のオーバーヘッドを測定パケットの 1% 未満になるよう考慮された広域ネットワークにおけるサーバ選択手法 [9]、RTT の測定結果に基づく最適サーバ選択方式 [10] などがある。これらはいずれもエンド端末間の通信経路の RTT を測定し、その測定結果に基づきネットワーク環境の推測や経路選択を行う手法である。しかし、RTT は無線環境において値が大きくなり、揺らぐという特性があり、無線で接続されたエンド端末から RTT を測定すると正確性に欠けるという課題がある。また、これらの手法はエンド端末の移動を考慮しておらず、一度の測定にパケットを複数回送受信することを想定している。そのため、エンド端末が通信中にネットワークを移動すると、適切な中継サーバを選択するのに時間を要するという課題がある。

本論文では、無線環境に接続するモバイル端末の通信においても通信効率を向上させるため、モバイル端末を配下にもつ NAT と中継サーバ間、すなわち無線区間を除去した通信経路の RTT を調査し、最適なパケット中継サーバを選択することによって通信経路の冗長を抑制する手法を提案する。また、NTMobile (Network Traversal with Mobility) [11-15] の機能として、提案手法のプ

ロトタイプを実装し，仮想環境にて動作検証，及び性能評価を行った．動作検証から，実装したRTTの調査のプロトタイプが正常に行われることを確認した．また，性能評価から，RTTの調査結果に基づき，複数の中継サーバの区別ができ，最適な中継サーバを選択できることを確認した．

以後，2章では関連研究について，3章では実験結果を基に中継サーバの選択指標として用いるRTTの特性について説明する．4章では提案手法について説明し，5章にて提案手法の実装について，及び動作検証の結果，性能評価を示し，最後に6章でまとめる．

## 第2章 関連研究

本研究の目的は、端末間の通信時に中継サーバを経由する必要がある場合にも、最適なパケット中継サーバを選択し、通信経路の冗長化を抑制することである。明白な通信経路の評価基準として、パケットの往復遅延を示す RTT とルータ経由数を示すホップ数が挙げられる。ホップ数は、時間経過により値が変化する動的な RTT とは異なり、設備環境に依存する静的な指標である。文献 [9] のサーバ選択のシミュレーション結果より、地理的な距離に基づいた選択手法、ホップ数に基づいた選択手法、ランダムなサーバ選択に基づいた手法、RTT の測定結果に基づく選択手法の 4 つの手法について、ユーザーの応答時間を最小限にするという観点から比較した結果、RTT の測定結果に基づく動的な選択手法が最も適切であることが分かっている。したがって、パケットの中継サーバを選択する上でも、RTT を選択指標として用いることは有効であると考えられる。

そこで、本章では中継サーバの選択指標として RTT を用いる手法に着目し、RTT の測定結果に基づいた関連研究について述べる。

### 2.1 RTT を用いたボトルネックリンクの可用帯域推定法

文献 [3] の手法は、測定した通信経路の RTT 値のうち、最小値の出現確率からボトルネックリンクの帯域使用率を推定し、経路選択に適用可能な手法である。RTT はルータにおけるパケット処理のためにかかる処理遅延時間、パケットの送信開始から受信完了までにかかる転送遅延時間、パケットが次のルータに到着するまでにかかる伝搬遅延時間、及びキューイング遅延時間の和で示される。処理遅延時間、転送遅延時間、伝搬遅延時間は通信経路の環境に依存する一定の値であり、RTT の変動は全てキューイング遅延に左右されるため、RTT の変動を観測し、ボトルネックリンクの負荷状況を推定する。

通信経路において、RTT は主にボトルネックリンクで変動する。RTT 測定時、キューにパケットが無いときに測定される RTT は最小値で、この瞬間の帯域使用率は 0 であり、最小値以外の測定値はキューにパケットが存在しているため、この瞬間の帯域使用率は 1 である。したがって、ある期間の帯域使用率は、RTT の最小値と最小値以外の測定値の測定された回数の割合から求められる。

また、ボトルネックリンクの可用帯域を  $A$ 、物理帯域を  $C$ 、帯域使用率を  $U$  としたとき、式 (2.1) が成り立つ。

$$A = C(1 - U) \quad (2.1)$$

式 (2.1) からボトルネックリンクの物理帯域と帯域使用率を求めることで端末間の可用帯域も求めることができる。しかし、物理帯域最小のリンクと可用帯域最小のリンクは必ずしも一致しない



ため、この手法では変化させた二つの異なる負荷でプローブを行い、帯域使用率の変化を観測することによって、可用帯域を推定している。

## 2.2 パケット対のRTTに着目したネットワーク帯域測定手法に関する研究

文献 [4] は、連続する複数のプロービングパケット間の RTT に見られる相関関係から通信経路の利用可能帯域を測定する NEPRI (NEtwork Performance Remote Investigation) [16, 17] に着目した手法である。

複数のプロービングパケット間における RTT の相関関係はボトルネックリンクに同時にキューイングされた際に現れる。プロービング速度が可用帯域幅より遅い場合、連続する二つのプロービングパケットは同時にキューイングされないため、プロービングパケットの RTT の間には相関がなく、独立した事象になる。一方、プロービング速度が可用帯域幅よりも速い場合は、二つのプロービングパケットが同時にボトルネックリンクにキューイングされる。前にキューイングされたパケットが処理されてから、後に入ったパケットが処理されるため、プロービングパケット間に明確な RTT の相関が現れる。NEPRI は、このプローブ間の RTT の相関関係を検出するため、連続する二つのプロービングパケットの RTT の変化 ( $\Delta RTT$ ) に注目した手法である。プロービング速度がボトルネックリンクの可用帯域幅よりも遅い場合、プロービングパケットはランダムな外乱の影響を受けるため、 $\Delta RTT$  はほぼ等しい割合で正か負の値になるが、プロービング速度がボトルネックリンクの可用帯域幅より速い場合、後にキューイングされたプロービングパケットの RTT の方が、先にキューイングされたプロービングパケットの RTT よりも大きくなるため、 $\Delta RTT$  が正になる割合が 100 % に近づく。この RTT の変化は、プロービング速度がボトルネックリンクの帯域幅を超えた瞬間に不連続に起きるため、そのときのプロービング速度が可用帯域幅に等しいと判断できる。この特性を利用して、 $\Delta RTT$  の正負により RTT の相関関係を判定し、次のプロービング速度を決定するアルゴリズムに基づき、徐々にプロービング速度を上げながら可用帯域を測定する手法である。

しかし、100Mbps 以上の広帯域の場合、プロービング速度と可用帯域幅の関係によらず、RTT の値がほぼ一定値を取り続けてしまうため、RTT の相関関係が正しく検出されない。帯域が広がるほど、プロービングパケットの送信間隔が狭くなり、パケット処理に問題が生じてしまうためである。帯域幅を一定に保ったまま送信間隔を大きくしたい場合には、パケットサイズを大きくすればよいため、パケットサイズによる送信間隔と RTT の関係を踏まえた  $\sum \Delta RTT$  の絶対値による判定のアルゴリズムを、先述のアルゴリズムに加えた手法が文献 [4] で提案されている手法である。予め閾値を設定し、 $\sum \Delta RTT$  がその閾値を超えていれば、RTT 全体の変化が大きいと判断され、測定に用いたパケットサイズが適切であるとして測定を続ける。そうでない場合には測定に用いるにはパケットの送信間隔が短すぎると判断し、パケットサイズを変化させた後に測定をやり直す。

## 2.3 課題

いずれの手法も、エンド端末側から RTT を測定している。しかし、現在のネットワーク環境は、多くのエンド端末が無線で接続されており、移動の可能性がある。エンド端末が無線で接続されている場合、無線区間も含んで RTT を測定すると、RTT の値が比較的大きくなり、揺らぎが大きくなってしまう。そのため、正確性に欠いてしまうという問題がある。また、これらの研究では精度向上のため、文献 [3] では 25 回以上、文献 [4] では 10 回以上パケットを送信し、RTT を測定している。通信端末が移動することを考慮すると、移動によりネットワークが切り替わった後、通信経路の帯域を推測するために再度測定をしなければならず、複数のパケットを改めて送信しなければならない。通信端末の移動が多くなり測定の回数が多くなるほど、ネットワークの負荷が増大してしまう可能性がある。

## 第3章 中継サーバの選択指標

本章では、提案に必要となるベースデータを取得することを目的とする。想定するシステム構成について説明した後、実際に測定した結果を基に、中継サーバの評価指標として用いる RTT の特性について述べる。

### 3.1 想定するシステム構成

図 3.1 に想定するシステム構成を示す。想定するシステムは、モバイル端末 MN (Mobile Node)、中継サーバ、さらに提案手法を実現するために必要な装置として、モバイル端末や中継サーバのアドレス情報の管理装置の3種類によって構成される。現状のネットワークでは、コアネットワークが有線、多くのモバイル端末が無線で接続されており、大陸を跨ぐネットワークについては海底ケーブルで接続されている。また、コアネットワークは時間経過によりトラフィックが大きく変化する。

通信を開始するモバイル端末が通信相手端末と異なる NAT 配下にある場合、及び IPv4/IPv6 ネットワークが混在する環境下の相互通信においては、中継サーバを経由する必要がある。また、中継サーバは通信中に切り替えることができ、時間経過によるトラフィックの変化、及びモバイル端末の移動によるネットワーク切り替え後にも、その都度最適な中継サーバを選びなおすことができることを想定する。

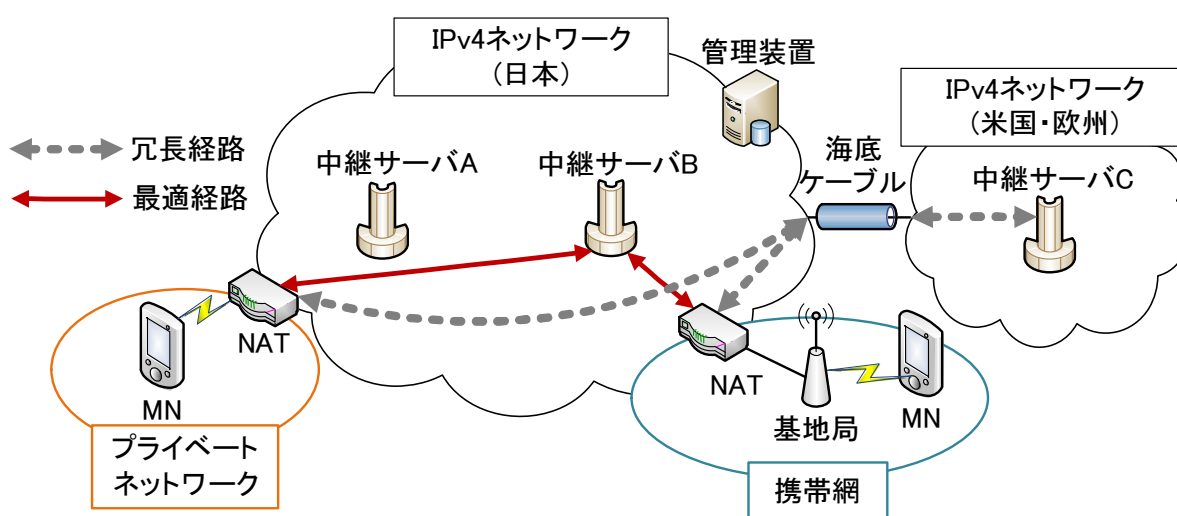


図 3.1 想定するシステム構成

## 3.2 RTT の推移

まず、1日のRTTの推移について述べる。図 3.2、図 3.3、図 3.4 に2016年10月20日（木）から2016年10月23日（日）の4日間（96時間）に渡り、日本国内、アメリカ、ヨーロッパにあるWebサーバに対してそれぞれRTTを測定した結果を示す。いずれも縦軸がRTT（ms）、横軸が測定日時である。これらの結果は、それぞれの宛先に対して有線環境において5分毎に3回ずつICMP Echo Request/Replyを送受信してRTTを測定したものである。測定環境は表 3.2と同様である。

いずれの結果も、RTTは1時から20時までの間において比較的安定しているが、20時頃から翌1時頃までの間で値が大きくなり、揺らいでいる。この結果から、通信を行う時間帯によって、ネットワークの負荷状態が異なり、トラヒックが大きく変動することが分かる。

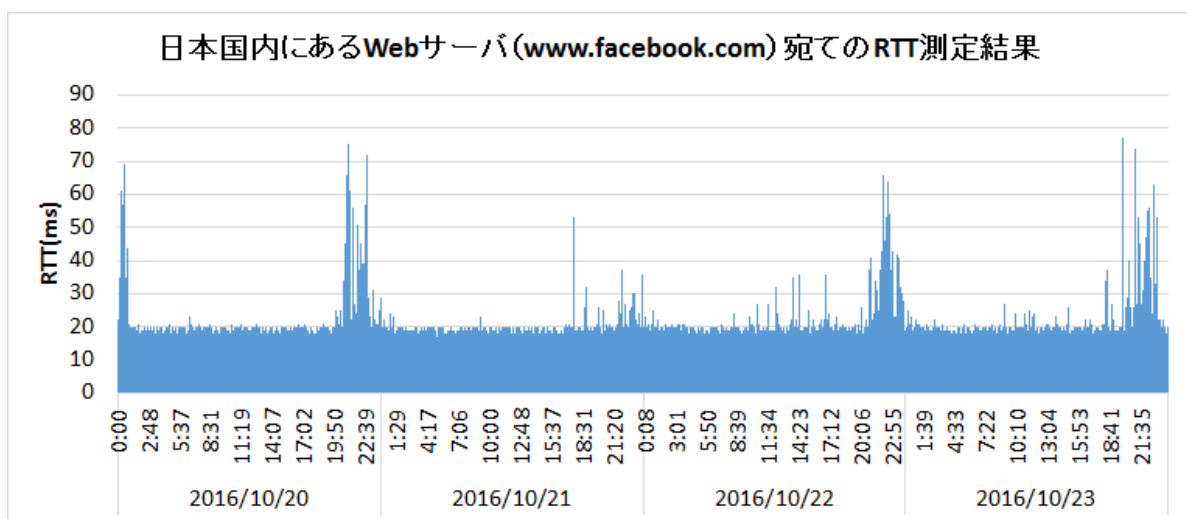


図 3.2 日本国内の Web サーバ宛の RTT 測定結果

## 3.3 RTT の平均値

図 3.2、図 3.3、図 3.4 で示した実験結果を基に、ある測定間隔ごとに平均値を取り、RTT の分布図を作成した。図 3.5、図 3.6、図 3.7 に各国の Web サーバの RTT の分布図を示す。これらの分布図は縦軸が頻度、横軸が RTT（ms）であり、以下の 7 通りについて示す。

- (1) 平均を取らなかった場合
- (2) 2 値の平均を取った場合
- (3) 3 値の平均を取った場合
- (4) 5 値の平均を取った場合
- (5) 10 値の平均を取った場合
- (6) 15 値の平均を取った場合

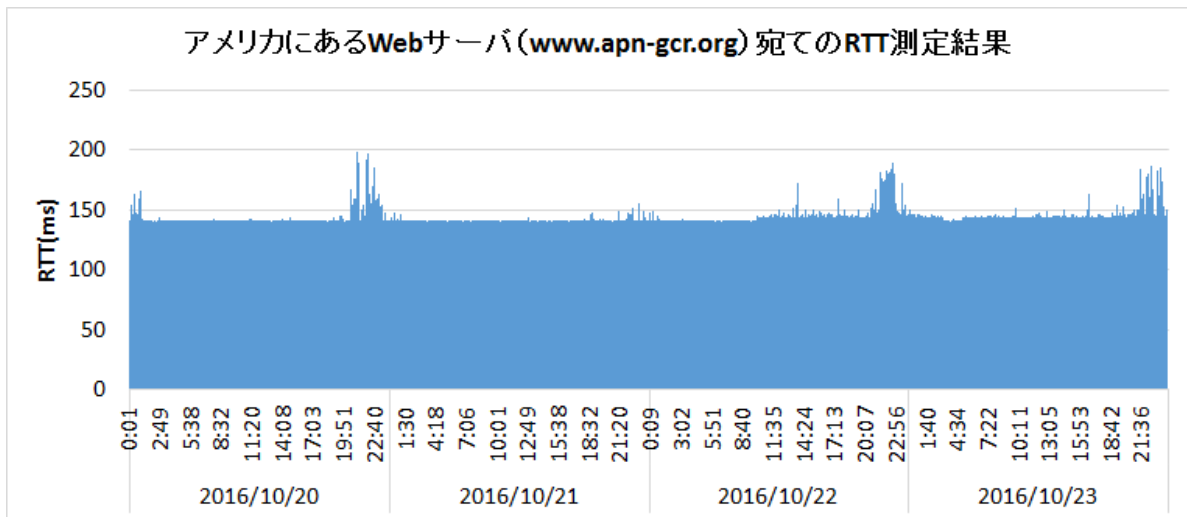


図 3.3 アメリカの Web サーバ宛の RTT 測定結果

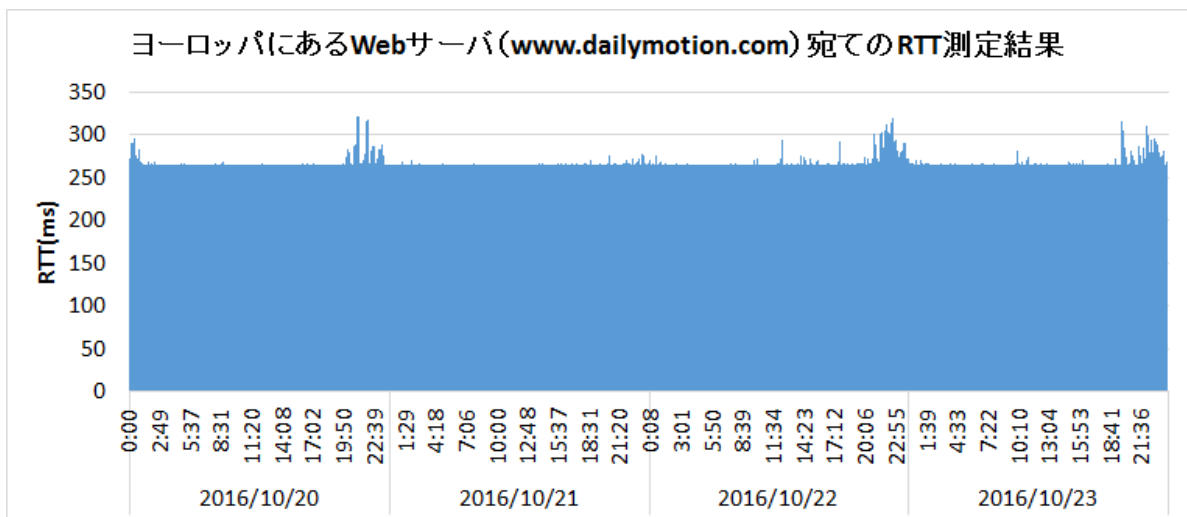


図 3.4 ヨーロッパの Web サーバ宛の RTT 測定結果

(7) 20 値の平均を取った場合

また、表 3.1 に上記のそれぞれの場合における標準偏差を示す。

図 3.5, 図 3.6, 図 3.7 のいずれの場合においても、平均を取らない測定回数が一回の RTT の値よりも、複数回測定した RTT から平均を取った値を指標とした方が、ばらつきが小さいことが分かる。また、平均値を算出するにあたり、基になる測定値が多いほど、ばらつきが小さくなっていることが分かる。

### 3.4 有線・無線における RTT

2016 年 11 月 23 日 (水) から 2016 年 11 月 26 日 (土) までの 4 日間に渡り、無線環境 (3G, LTE), 有線環境の各環境において 23:00 前後に、日本国内とアメリカにある Web サーバ宛てに

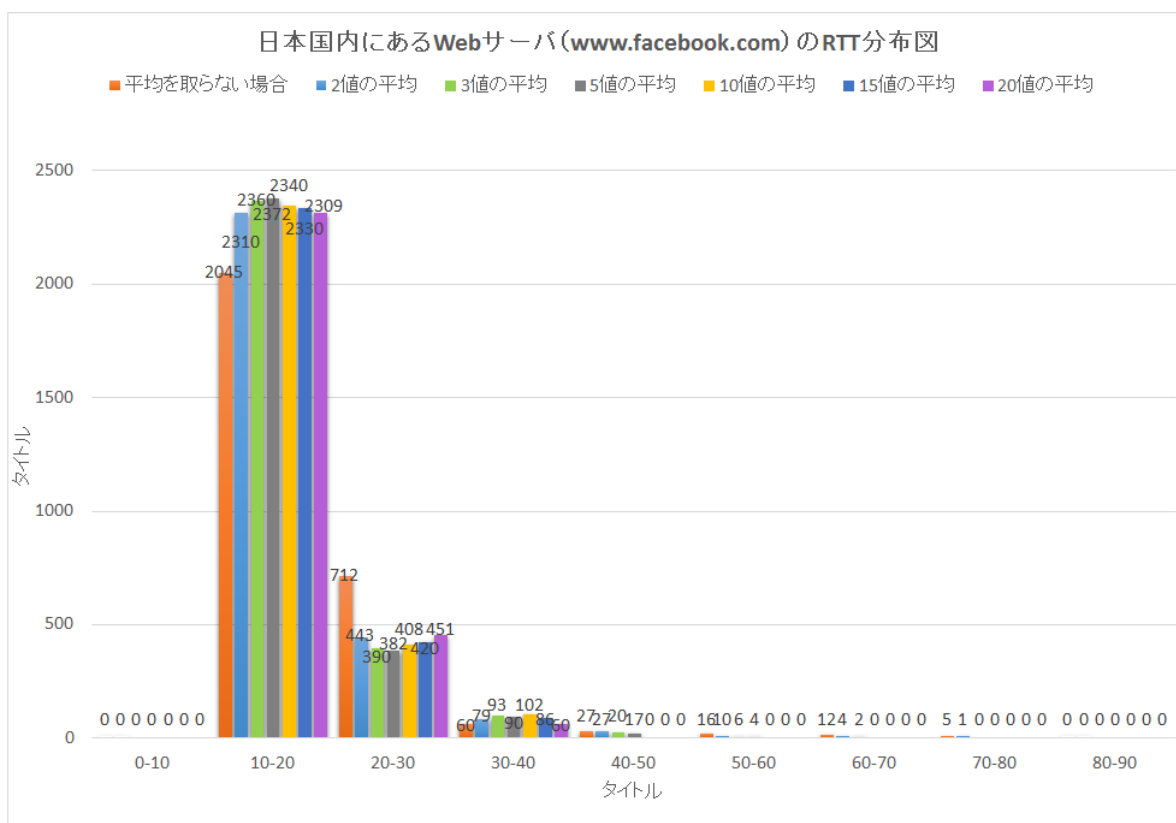


図 3.5 日本国内の Web サーバの RTT 分布図

表 3.1 各選択指標候補における標準偏差

	日本 (www.facebook.com)	アメリカ (www.apn-gcr.org)	ヨーロッパ (www.dailymotion.com)
平均を取らない場合	5.82	5.77	5.67
2 値の平均	4.82	4.92	4.91
3 値の平均	4.40	4.61	4.51
5 値の平均	3.96	4.34	4.12
10 値の平均	3.40	4.06	3.67
15 値の平均	3.14	3.86	3.44
20 値の平均	2.97	3.68	3.23

それぞれ ICMP Echo Request/Reply を 100 回ずつ送受信して RTT を測定した。無線環境とは通信端末が 3G・LTE 経由で接続している場合、有線環境とは通信端末が LAN ケーブルで接続している場合を指す。また、測定する時間帯を 23:00 前後に限定したのは、節 3.3 の実験結果から、その時間帯が最も RTT の揺らぎが大きかったためである。測定に使用したツールは、3G、LTE の無線環境では iNetTools\*<sup>1</sup>、有線環境では Exping\*<sup>2</sup> である。測定端末の構成は表 3.2 に示す通りである。また、測定を行うにあたり宛先として使用したサーバは、日本国内、及びアメリカに設置された Web サーバ各 8 か所であり、表 3.3 の通りである。

\*<sup>1</sup><https://itunes.apple.com/jp/app/inettools-nettowaku-zhen-duantsuru/id561659975?mt=8>

\*<sup>2</sup><http://www.woodybells.com/exping.html>

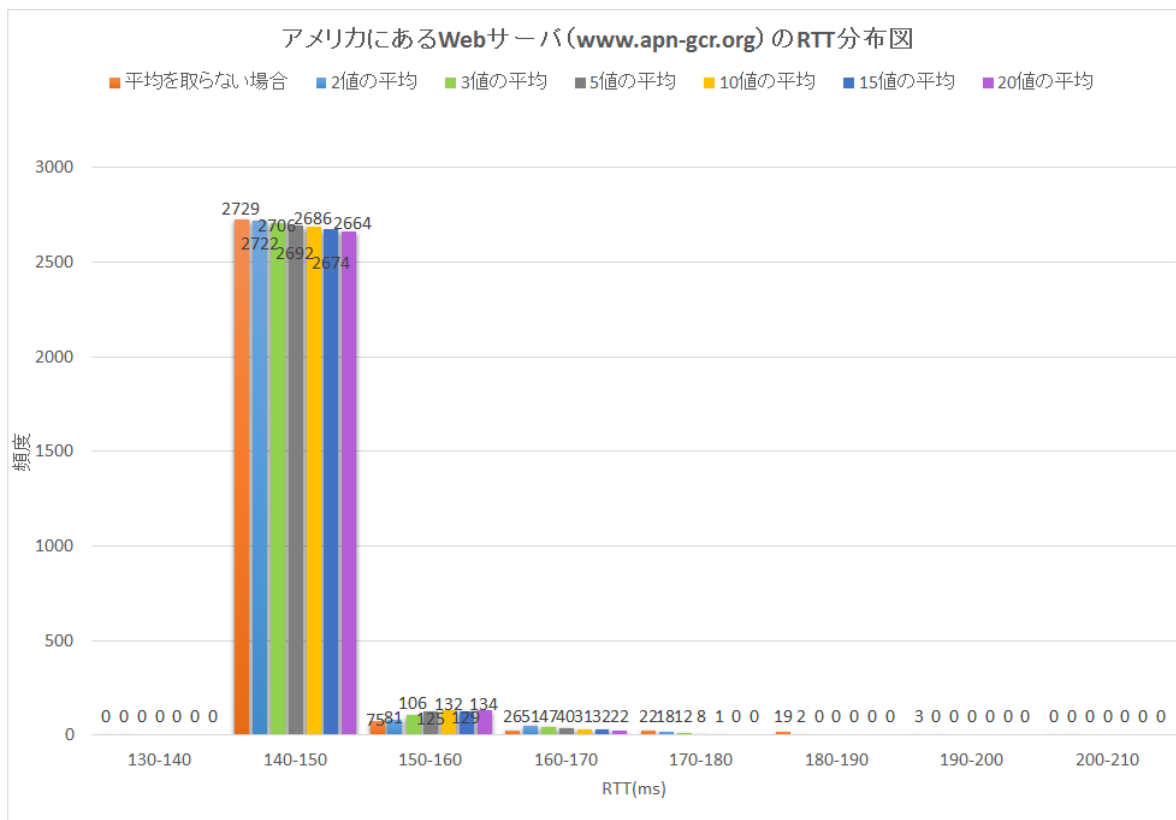


図 3.6 アメリカの Web サーバの RTT 分布図

図 3.8, 図 3.9, 図 3.10 にそれぞれの環境下における日本国内, 及びアメリカに設置された Web サーバについての RTT 測定結果を示す. 縦軸は頻度, 横軸は RTT (ms) である. これらの結果から, 無線環境 (図 3.9, 図 3.10) の RTT は, 有線環境の RTT (図 3.8) と比べて RTT の値が大きく, 振れ幅も大きいことが分かる. RTT について, 安定した指標を得るためには, 有線環境での測定, もしくは複数回の測定が必要である.

表 3.2 測定端末の構成

	有線環境	無線環境 (3G/LTE)
測定端末	HP 8200EliteSF	iPhone6
OS	Windows10 64bit	iOS 10.1.1
プロバイダ	OCN (Open Computer Network) *3	KDDI*4

\*3<http://www.ntt.com/personal/ocn.html>

\*4<http://www.kddi.com/>

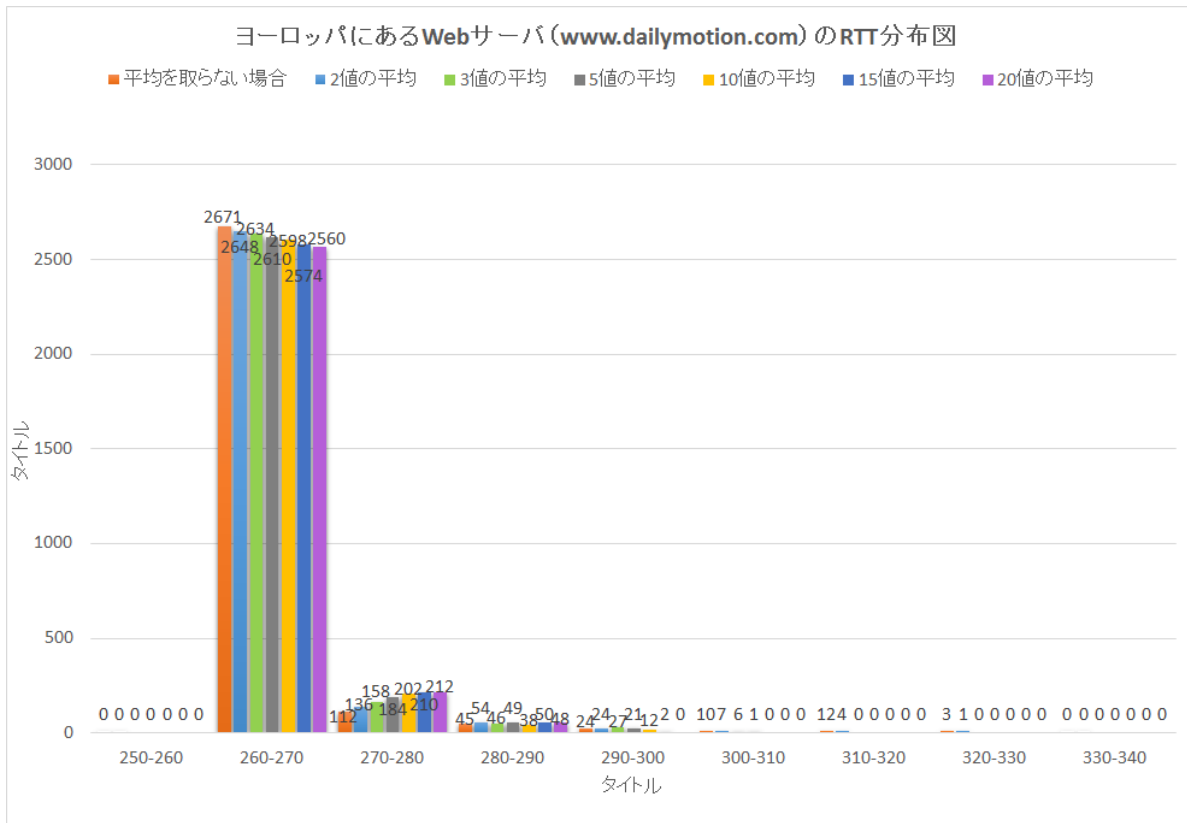


図 3.7 ヨーロッパの Web サーバの RTT 分布図

表 3.3 RTT 測定時に用いた Web サーバの宛先一覧

日本国内 Web サーバ	アメリカ Web サーバ
www.google.co.jp	www.apn-gcr.org
www.yahoo.co.jp	www.godiva.com
www.softbank.jp	en.wikipedia.org
www.hitachi.co.jp	www.friend-server.com
www.ocn.ne.jp	www.globat.com
www.city.nagoya.jp	www.hostgator.com
www.nikkei.co.jp	www.linux.com
www.chunichi.co.jp	ieeexplore.ieee.org



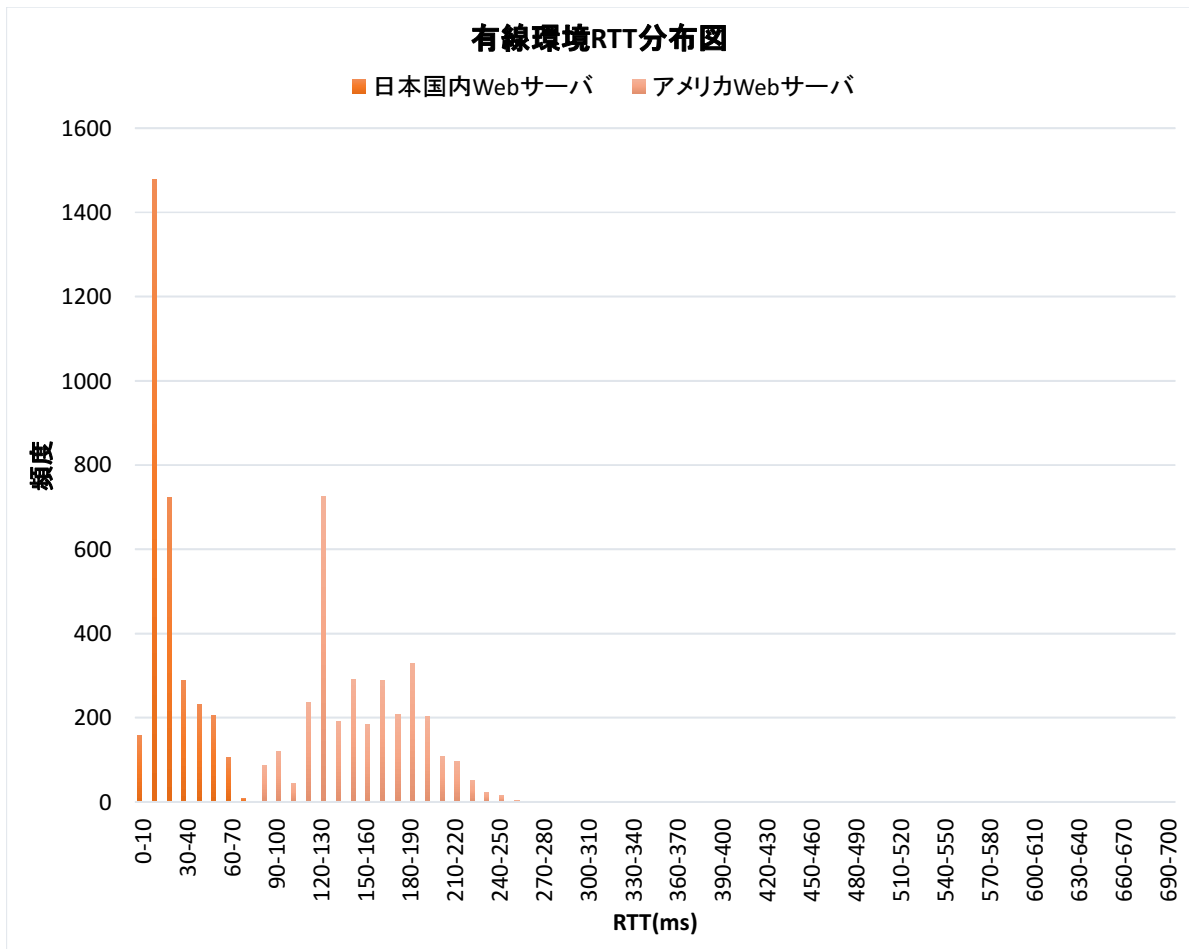


図 3.8 有線環境における RTT 分布図

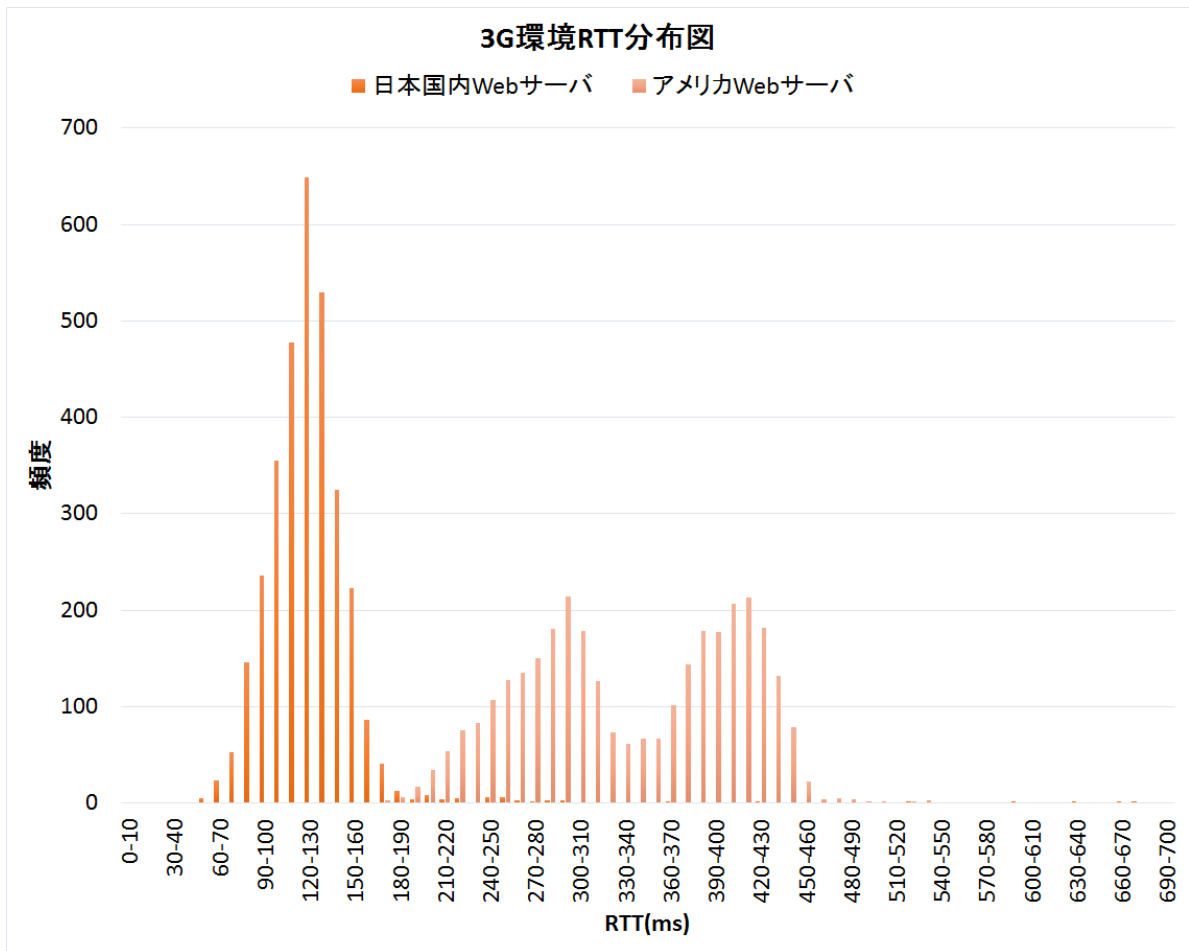


図 3.9 3G 環境における RTT 分布図

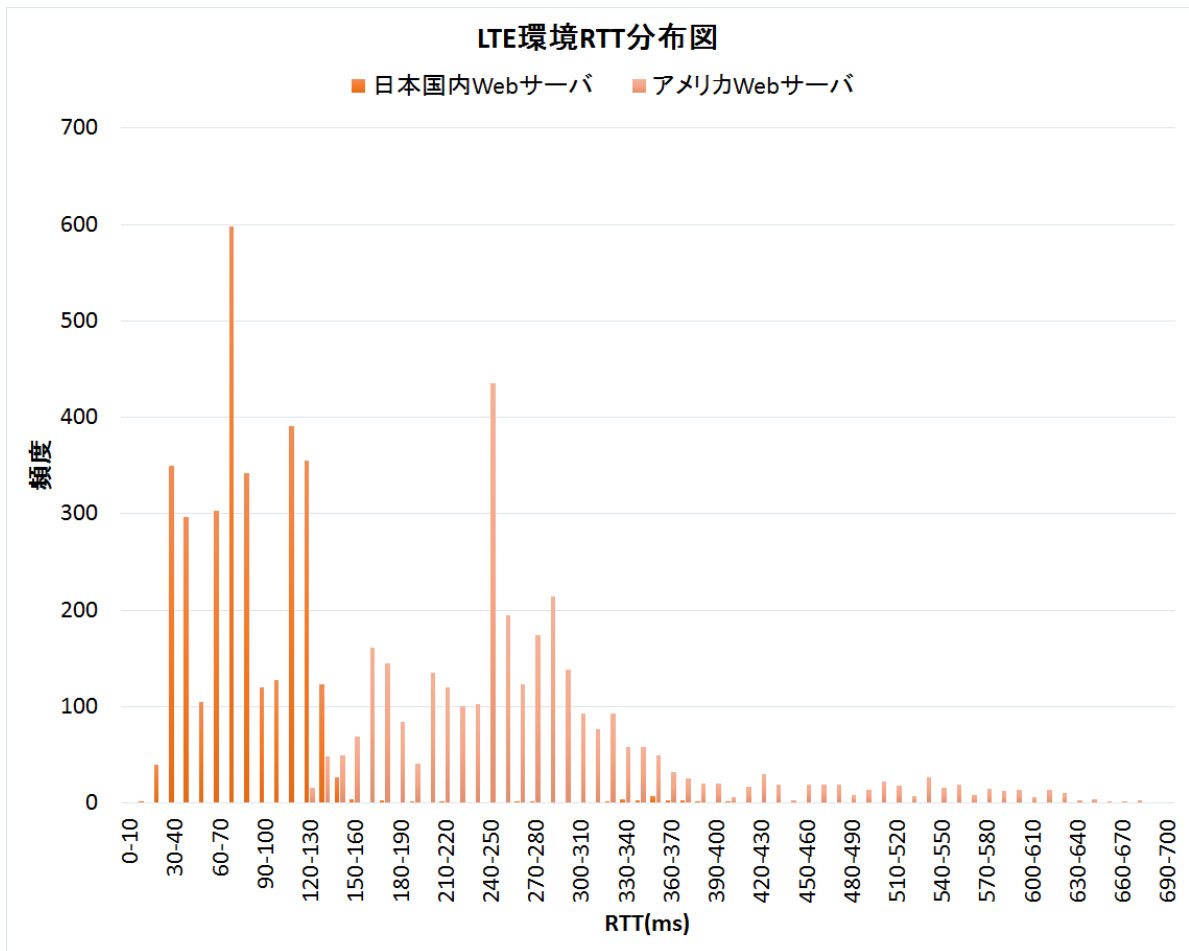


図 3.10 LTE 環境における RTT 分布図

## 第4章 提案方式

本章では、提案するパケット中継サーバの選択手法について述べる。

### 4.1 提案方式の概要

通信経路冗長化の抑制を考慮した最適な中継サーバを選択するため、RTT の測定結果を基に中継サーバを選択する手法を提案する。本提案手法では、モバイル端末起動時、またはネットワーク接続時に端末を配下に持つ NAT、もしくは DGW（Default Gateway）と中継サーバの間の有線部分の RTT 調査を行い、通信開始時にその結果を基に最適な中継サーバを選択する。

モバイル端末が起動、及びネットワークに接続するごと、そして通信中においても定期的に RTT を調査し、その値が最小となる中継サーバを選択することで、通信経路冗長化、及びモバイル端末・ネットワーク負荷を最小限に抑制することができる。また、RTT は無線環境を介すると値、揺らぎともに大きくなってしまい、選択指標として正確性に欠けてしまう。さらに、モバイル端末が NAT、あるいは DGW を経由して通信を行う場合、必ず決まった NAT、または DGW を経由する。そのため、図 4.1 のように、通信端末を配下に持つ NAT、もしくは DGW と中継サーバ間の有線部分でのみ RTT を測定し、値を得ることで、より正確な指標を得ることができる。また、本提案方式は、既存方式と併用可能である。

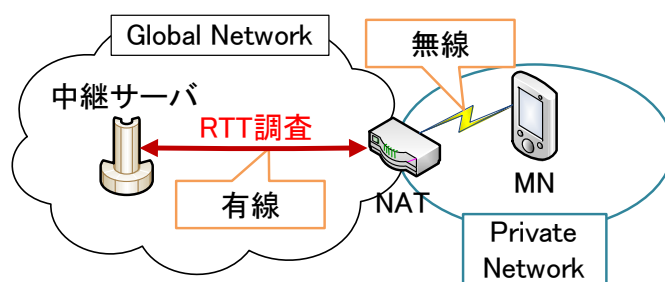


図 4.1 提案方式の概要

### 4.2 RTT 調査

#### 4.2.1 IPv4 ネットワークにおける RTT 調査

図 4.2 に中継サーバからモバイル端末を配下に持つ NAT（以下 NAT<sub>MN</sub>）までの RTT 調査のシーケンスを示す。モバイル端末が起動時、あるいはネットワーク接続時に、管理装置に対して自身の

アドレス情報登録処理を行う。このとき、管理装置は受信パケットの送信元から NAT<sub>MN</sub> の IP アドレスを知ることができる。管理装置はモバイル端末のアドレス情報登録処理後、自身の管理下にある全ての中継サーバから NAT<sub>MN</sub> までの経路について、RTT の調査を開始する。

管理装置は各中継サーバに対して、NAT<sub>MN</sub> の IP アドレスなどを記載した Survey Direction を送信し、NAT<sub>MN</sub> までの RTT 調査を行うよう指示する。Survey Direction を受信した各中継サーバは、RTT 調査を行うため、それぞれ NAT<sub>MN</sub> に対して ICMP Echo Request を送信する。各中継サーバは、NAT<sub>MN</sub> からの ICMP Echo Reply を受信すると、ICMP Echo Request の送信時刻と ICMP Echo Reply の受信時刻の差分から RTT を取得する。各中継サーバは RTT 取得後、Survey Report に、モバイル端末の Node ID、中継サーバの IP アドレス、中継サーバと NAT<sub>MN</sub> 間の RTT の値を記載し、調査指示を出した管理装置に対して調査結果を報告する。管理装置は Survey Report を受信すると、管理下の中継サーバから NAT<sub>MN</sub> までの RTT を RTT Table に記録する。

また、モバイル端末と中継サーバ間に NAT が無い場合もあり得るが、その場合はモバイル端末のアドレス情報登録処理の際に DGW の IP アドレスを管理装置に通知し、中継サーバから DGW 間の RTT を測定する。

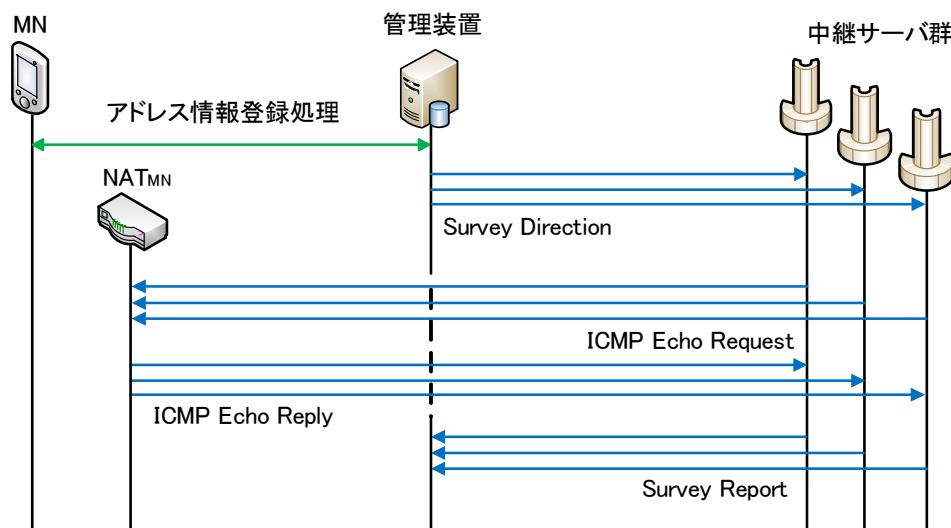


図 4.2 IPv4 ネットワークにおける NAT と中継サーバ間の RTT 調査シーケンス

#### 4.2.2 IPv6 ネットワークにおける RTT 調査

IPv4 ネットワークの時と同様に、モバイル端末と管理装置の間で自身のアドレス情報登録処理を行う。このとき、モバイル端末を配下に持つ DGW の IP アドレスを管理装置に通知する。そして、管理装置はモバイル端末のアドレス情報登録処理後、自身の管理下にある全てのの中継サーバから DGW までの経路について、4.2.1 節と同様の手順で RTT の調査を行う。

### 4.3 RTT の平均値

次に、提案手法において評価指標となる RTT の平均値について述べる。3.2 節で示した実験結果から、RTT は通信を行う時間帯によってトラフィックが変化していることが分かった。また、3.3 節に示した実験結果から、RTT の測定結果を基に中継サーバを選択する際、一度の調査結果を基に選択するよりも、複数回の調査結果の平均値を基にした方が、より正確に最適な中継サーバを選択することができるといえる。

表 3.1 について、測定回数 1 回の場合、5 値、10 値、15 値、20 値の平均を取った場合を比較すると、平均を取らない場合から 5 回平均をとるまでにはいずれも 1 以上標準偏差の値が小さくなっているが、10 回、15 回、20 回と測定回数が増えるにつれて、徐々にその減り幅も小さくなっている。本提案手法はモバイル端末が無線で接続されていることを想定しているため、移動によるネットワーク切り替えの可能性があることを考慮しなければならない。測定回数を測定に伴う時間経過によるトラフィックの変化も考慮し、過去 5 回分の測定結果から RTT の値の平均を取れば、適切な選択指標となり得ると考える。

### 4.4 中継サーバ選択

本節では RTT の調査結果を基に、最適な中継サーバを選択する方法について述べる。

図 4.3 にモバイル端末同士 MN と CN (Corresponding Node) の通信におけるシステム構成の一例を示す。図 4.3 において、管理装置は中継サーバ X～中継サーバ Z を管理しているものとする。

図 4.3 で示す環境下において中継サーバ経由の通信を開始するシーケンスを図 4.4 に示す。管理装置の管理下にある各中継サーバは、モバイル端末を配下に持つ各 NAT に対して RTT 調査を実施し、管理装置の RTT Table に図 4.4 のような調査結果が登録されている。

管理装置はモバイル端末より中継サーバ選択要求を受け取ると、管理装置の RTT Table の中から RTT の値が最小となる最適な中継サーバを選択する。管理装置は RTT Table において、各中継サーバから NAT<sub>MN</sub>、NAT<sub>CN</sub> までの RTT の情報を、各モバイル端末の Node ID、各中継サーバの IP アドレスをキーとして検索する。そして、NAT<sub>MN</sub> と中継サーバ X 間の RTT 及び NAT<sub>CN</sub> と中継サーバ X 間の RTT の和、NAT<sub>MN</sub> と中継サーバ Y 間の RTT 及び NAT<sub>CN</sub> と中継サーバ Y 間の RTT の和、NAT<sub>MN</sub> と中継サーバ Z 間の RTT 及び NAT<sub>CN</sub> と中継サーバ Z 間の RTT の和をそれぞれ算出し、NAT<sub>MN</sub> から各中継サーバを経由して NAT<sub>CN</sub> に到達するまでの総経路における RTT の値を得る。管理装置は、算出した総経路の RTT の中から RTT が 25 となる中継サーバ X を選択し、経路指示手順を実施する。

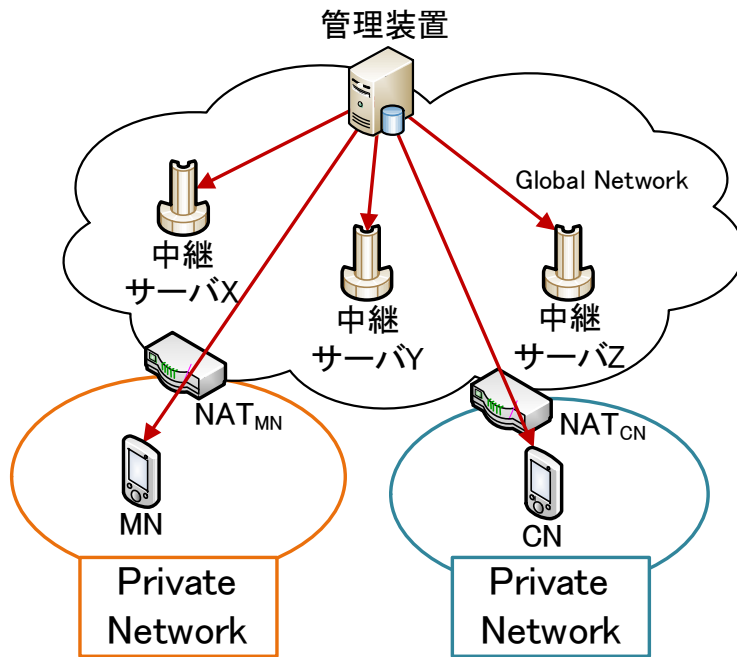


図 4.3 MN 同士の通信におけるシステム構成の一例

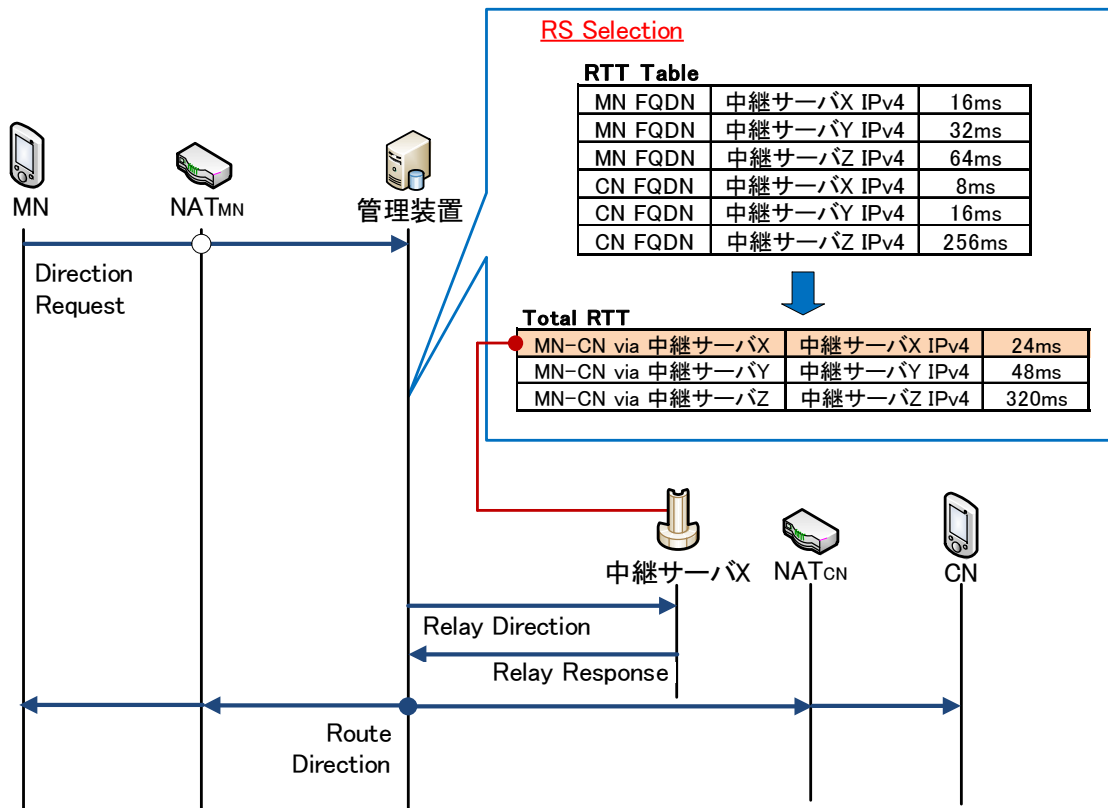


図 4.4 MN 同士の通信時における中継サーバ選択

## 第5章 実装と評価

本章では、提案方式の実装とその動作検証、及び性能評価について述べる。

本論文にて提案する方式は、NTMobileの機能として実装した。NTMobileは、通信接続性と移動透過性をIPv4/IPv6混在環境において実現する独自の通信技術[11–15]であり、Linux環境で実装が完了しており、動作が確認されている。NTMobileではエンド端末間が直接通信できない場合に中継サーバRS (Relay Server)を経由する。RSは複数設置できるが、RSの選択方法は定められていなかったため、本提案手法はNTMobileのRS選択に適用できる。NTMobileのNTMobile端末のアドレス管理を行うDC (Direction Coordinator), パケットを中継するサーバであるRSに対して、提案方式のプロトタイプの実装を行った。また、動作検証として、提案するRTT調査が正常に動作することを確認し、提案方式の性能評価として、RTT調査を行うことにより生じる遅延を測定した。

### 5.1 実装

提案方式のプロトタイプをNTMobileの機能として実装した。

#### 5.1.1 DCへの実装

図 5.1 に DC のモジュール構成を示す。DC はユーザ空間の NTMobile デーモンと、 BIND を利用した DNS により構成される。DC の NTMobile デーモンに、 RTT 調査を行うモジュールとして Route Survey のプロトタイプの実装を行った。DC が NTM 端末のアドレス情報の登録が完了したタイミングで RTT 調査を開始するようプロトタイプを作成した。また、 RS 選択の処理について、本来は RTT Table を基に RTT の値が最小となる RS を選択する予定である。しかし、本論文では Route Survey モジュールの中で最適な RS を選択できるような実装、すなわち、各 RS と NATMN 間、及び各 RS と NATCN 間の経路における調査結果から、 RTT の値が最小となる RS が選択できるよう処理を記述した。

#### 5.1.2 RSへの実装

図 5.2 に RS のモジュール構成を示す。RS 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って構成される。RS にも先述の DC 同様、NTMobile デーモンにおいて、RTT 調査を行うモジュールとして Route Survey のプロトタイプの実装を行った。

RS ではデバイスレベルのパケットインターフェースである PF\_PACKET を利用することによって、Route Survey が IP ヘッダを含むパケットを受信可能とした。PF\_PACKET を利用することに



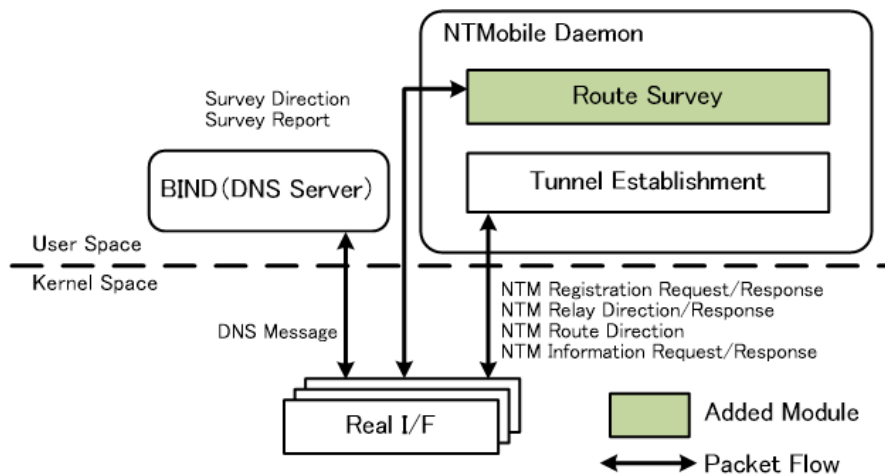


図 5.1 DC のモジュール構成

より、ユーザ空間に限定して実装を行うことができ、実装が容易になる。RTT の調査を行う際、ICMP Echo Request / Reply を Raw socket により作成し、送受信を行う。

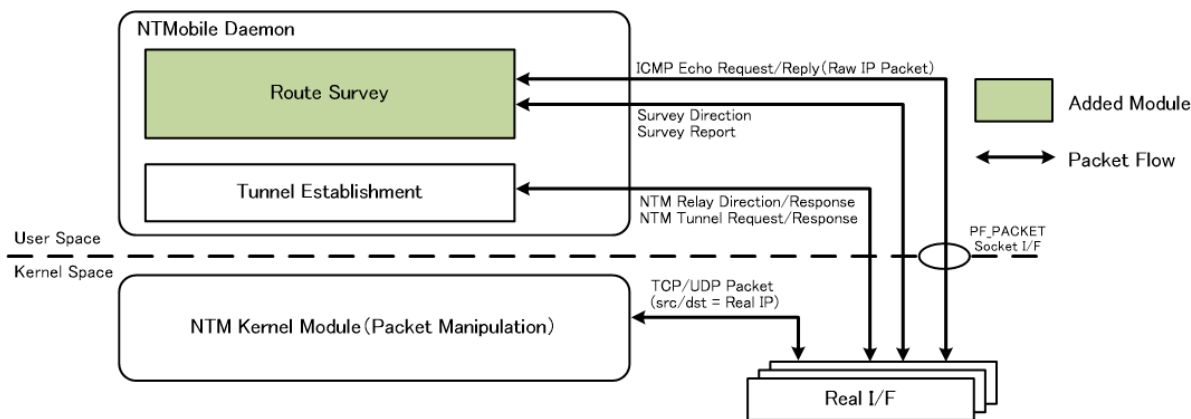


図 5.2 RS のモジュール構成

## 5.2 動作検証

表 5.1 にホスト PC の構成, 表 5.2 に仮想マシンの構成, 図 5.3 に動作検証におけるネットワーク構成を示す. 1 台のホスト PC 上に VMware Player<sup>\*1</sup> を用いて, DC, MN, 2 台の RS (RSA, RSB), NAT を構築した. DC, RSA, RSB を同一ネットワークに接続し, そのネットワークとプライベートネットワークの間に 1 つ NAT を, NAT 配下に MN を 1 台接続した.

実環境での調査時間の検討の為, 各仮想マシンに遅延を発生させて測定を実施した. DC, RSA が日本国内のグローバルネットワーク上, RSB が日本国外 (アメリカ) のグローバルネットワーク上に存在し, MN が 3G ネットワークに接続することを想定する. また, 日本国内の Web サー

<sup>\*1</sup><http://www.vmware.com/jp/>

バ12か所，アメリカのWebサーバ5か所宛にRTTを測定した結果，有線環境における日本国内のWebサーバ宛のRTTは平均25ms（最大78ms，最小7ms），アメリカのWebサーバ宛のRTTは平均140ms（最大169ms，最小103ms），無線環境における日本国内のWebサーバ宛のRTTは平均128ms（最大897ms，最小57ms）であった．そのため，仮想マシンの遅延は，日本国内のグローバルネットワーク上と想定している装置に10msから80msの間，アメリカのグローバルネットワーク上と想定している装置に110msから170msの間でパレート分布に基づき遅延が生じるように設定した．

この動作環境において，RTT調査が正常に行われることを確認した．

表 5.1 ホスト PC の構成

ホスト PC	
OS	Windows10 64bit
CPU	Intel Core i7-2600 3.40GHz
Memory	16.00GB

表 5.2 仮想マシンの構成

	DC, MN, RS <sub>A</sub> , RS <sub>B</sub>	NAT
OS	Ubuntu 12.04	Ubuntu 12.04
Linux Kernel	3.2.0-37-generic	3.2.0-37-generic
CPU	Intel Core i7-2600(3.40GHz)	Intel Core i7-2600(3.40GHz)
Memory	各 1GB	各 512MB

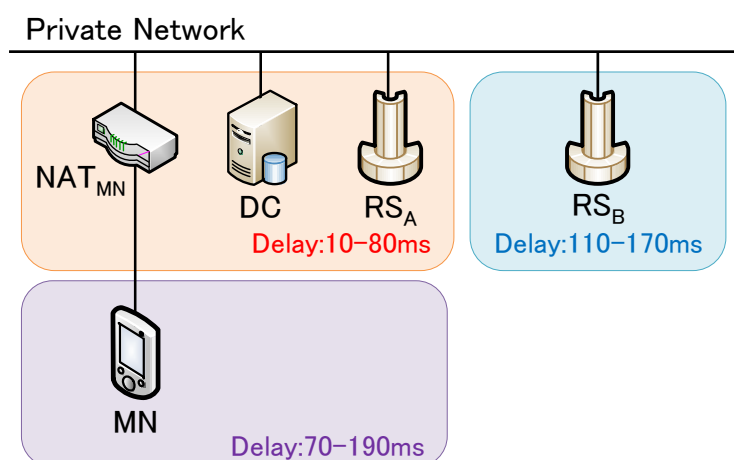


図 5.3 動作検証におけるネットワーク構成

### 5.3 性能評価

NAT と各 RS 間の RTT 調査における処理時間を計測し、性能評価を行った。図 5.4 に、図 5.3 の環境において実行した RTT 調査の時間を示す。RTT 調査にかかった時間は DC にて Wireshark<sup>\*2</sup> により取得し、試行回 40 回の平均時間を示す。

図 5.4 は、DC と MN 間でアドレス情報登録処理が完了してから、DC が各 RS から Survey Report を受信するまでの時間、すなわち RTT 調査にかかる時間の内訳を示す。DC が MN との間で MN のアドレス情報登録処理を実施してから、RSA に対する Survey Direction を送信するまでにかかった時間は 60.36ms であり、続いて送信された RS<sub>B</sub> に対する Survey Direction は 106.72ms であった。RSA、RS<sub>B</sub> から NAT<sub>MN</sub> に対して ICMP Echo Request を送信し、NAT<sub>MN</sub> が各 RS に ICMP Echo Reply を返すまでの時間は、それぞれ 35.28ms、156.08ms である。また、RSA、RS<sub>B</sub> が NAT<sub>MN</sub> から ICMP Echo Reply を受信し、DC に対して NTM Survey Report を送信するまでにかかる時間は、31.73ms、151.88ms である。この遅延には、各 RS において NAT<sub>MN</sub> までの間の RTT を算出する処理時間が含まれている。この測定結果から、国内外の RS の区別ができ、最適な RS を選択することができると考えられる。この環境において、MN のアドレス情報登録処理をトリガーにした RTT 調査時間は 412.40ms で完了した。

この RTT 調査は、MN が DC との間でアドレス情報の登録処理を行った際に実施されるため、実用上問題ないと考えられる。

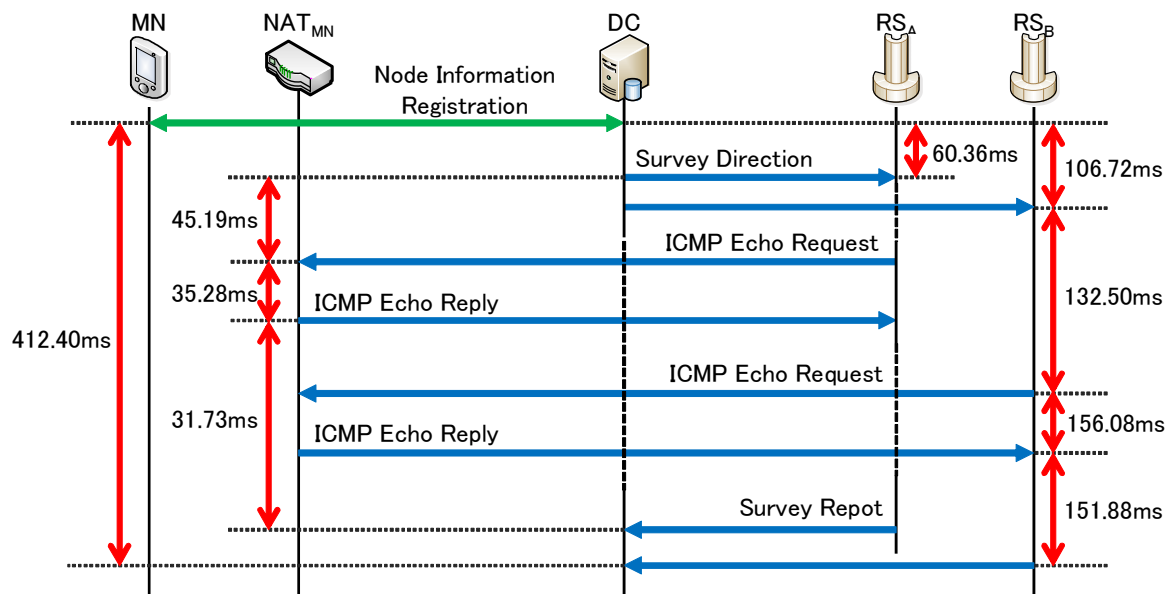


図 5.4 RTT 調査時間

<sup>\*2</sup><https://www.wireshark.org/>

## 第6章 結論

本論文では、中継サーバを経由することによる通信経路冗長化の解決手法について提案した。モバイル端末が自身の起動時、もしくはネットワーク接続時に、モバイル端末を配下に持つ NAT と中継サーバ間の通信経路において RTT の調査を行い、RTT の値が最小となる中継サーバを選択することによって、最短経路での通信を実現できる。

提案方式のプロトタイプを NTMobile の機能として DC、及び RS に実装した。動作検証の結果、仮想マシンのネットワークにおける MN が配下にある各 NAT と各 RS 間までの RTT の測定が正常にでき、RTT の測定結果を基に最適な中継サーバを選択できることを確認した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，終始丁寧かつ熱心なご指導を賜りました，指導教官である名城大学大学院理工学研究科 渡邊晃教授に心から感謝致します。

本研究を進めるにあたり，様々なご指導を頂きました，名城大学大学院理工学研究科 鈴木秀和准教授に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり，ご意見並びにご助言を賜りました，愛知工業大学情報科学部 内藤克浩准教授に深謝致します。

本論文を作成するにあたり，快く副査を引き受けて頂きました名城大学大学院理工学研究科 柳田康幸教授に心より感謝致します。

最後に，本研究を進めるにあたり，多くの討論の場において有益なご意見を賜りました，渡邊研究室及び鈴木研究室の皆様へ感謝致します。

## 参考文献

- [1] 総務省総合通信基盤局：我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果（2016年5月分），  
[http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000430359.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000430359.pdf) (2017年1月19日アクセス).
- [2] 総務省（情報通信統計データベース）：平成27年通信利用動向調査の結果，  
[http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/160722\\_1.pdf](http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/160722_1.pdf) (2017年1月19日アクセス).
- [3] 滝田英勝，杉崎義雄，山口実靖，浅谷耕一：RTTを用いたボトルネックリンクの可用帯域推定法，電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 457, No. 108, pp. 245–249 (2009).
- [4] 今井省吾，安達基光，市野将嗣，小松尚久：パケット対のRTTに着目したネットワーク帯域測定手法に関する研究，電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 111, No. 408, pp. 59–64 (2012).
- [5] 佐藤正樹，堀内晋也，相田知子，浅谷耕一：RTTによるネットワーク性能測定法に関する検討，電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 101, No. 11, pp. 89–94 (2001).
- [6] Anat, B., Edith, C., Haim, K. and Yishay, M.: Predicting and Bypassing End-to-End Internet Service Degradations, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No. 6, pp. 961–978 (2003).
- [7] Zeitoun, A., Wang, Z. and Jamin, S.: RTTometer: Measuring Path Minimum RTT with Confidence, *IEEE Workshop on IP Operations and Management (IPOM)*, pp. 127–134 (2003).
- [8] Fang-Yie, L., Fenq-Lin, J. and Fuu-Cheng, J.: A Path Switching Scheme for SCTP Based on Round Trip Delays, *Comput. Math. Appl.*, Vol. 62, No. 9, pp. 3504–3523 (2011).
- [9] Carter, R. L. and Crovella, M. E.: Server Selection Using Dynamic Path Characterization in Wide-Area Networks, *Proceedings of the INFOCOM'97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution*, Vol. 3, pp. 1014–1021 (1997).
- [10] 中岩正洋，中園信吾，石井啓之：遠隔観測による最適サーバ選択法の検討，電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク，Vol. 106, No. 420, pp. 31–36 (2006).
- [11] 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. 380–397 (2013).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 納堂博史，杉原史人，鈴木秀和，内藤克浩，渡邊 晃：NTMobileの実用化に向けた統合的枠組の検討，情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会 (MBL)，Vol. 2015-MBL-77, No. 20, pp. 1–8 (2015).
- [15] 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，Vol. 2013-MBL-67, No. 11, pp. 1–6 (2013).

- [16] 青木武司, 菊池慎司, 高橋英一, 岡野哲也, 安達基光, 勝山恒男 : IP ネットワークの性能測定技術, *FUJITSU*, Vol. 98, No. 90, pp. 9–16 (1998).
- [17] 勝山恒男, 安達基光 : トラフィック計測技術 : NEPRI, *FUJITSU*, Vol. 51, No. 6, pp. 391–395 (2000).

# 研究業績

## 研究会・大会等

- (1) 三宅佑佳, 廣瀬達也, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile における最適なりレーサーバ選択手法の提案, 平成 26 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, No.P4-1, 2014 年 9 月.
- (2) 三宅佑佳, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile における最適なりレーサーバを選択する手法の提案, 照明学会第 47 回全国大会講演論文集 (2015).
- (3) 三宅佑佳, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile 端末と一般サーバとの通信時に通信経路冗長化を抑制するなりレーサーバ選択手法の提案, 2015 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol.2, No.B-6-18, p.18, 2015 年 3 月.
- (4) 三宅佑佳, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile における最適なりレーサーバを選択する手法の提案, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム論文集, Vol.2015, pp.1792 – 1799, 2015 年 7 月.
- (5) 三宅佑佳, 鈴木秀和, 内藤克浩, 渡邊 晃 : NTMobile における最適なりレーサーバ選択手法の提案と実装, 研究報告モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL) 論文集, No.19, pp.1-9, 2015 年 12 月.

## 国際会議

- (1) Yuka Miyake, Hidekazu Suzuki, Katsuhiko Naito, Akira Watanabe : Proposal and Implementation of a New Method of Selecting the Optimal Relay Server Using NTMobile, The Ninth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking, Oct 2016.