

# IPv4/v6 共存環境下におけるリレールータを介した低遅延な経路選択機構の提案と評価

溝口 知彦<sup>†a)</sup> 伊藤 嘉浩<sup>†b)</sup>

Proposal and Evaluation of Mechanism for Selecting Low-Latency Route through Relay Router under IPv4/v6 Coexistence Environment

Tomohiko MIZOGUCHI<sup>†a)</sup> and Yoshihiro ITO<sup>†b)</sup>

あらまし 本論文は、IPv4/v6 共存環境下における QoS と QoE の向上を目的とし、トンネリング方式における複数のリレールータの中から最も遅延の低い経路上にあるものを選択する機構を提案し、これを実装している。そして、IPv6 インターネット上の実サービスに対して、静的な経路制御を行った場合と本提案機構を用いた場合の QoS と QoE を比較することで、本提案機構のオーバーヘッドにより生じる QoS と QoE の劣化を調査している。実験結果から、提案機構を利用することで静的経路制御の場合と同等の QoS と QoE が得られており、本機構の有効性を確認している。

キーワード IPv6, IPv6 over IPv4, QoS, QoE, Web サービス

## 1. ま え が き

IPv4 アドレスの枯渇問題への対策として、次世代の IP である IPv6 [1] の導入が進められている。これまで、既存の Web サービスを IPv6 対応としたときの影響を調査するため、2011 年に World IPv6 Day が開催された。その結果を基に、2012 年には、サービスを恒久的に IPv6 に対応とする際の World IPv6 Launch [2] が実施されている。このように、IPv6 への移行が既に世界中で検討されている。また、IPv6 のアドレス長は 128 ビットであるので、アドレス長が 32 ビットである IPv4 のものと比べ、このアドレス空間は飛躍的に拡大される。したがって IPv6 の導入は、IP アドレスの枯渇問題を解決するだけでなく、その広いアドレス空間を利用することで、IoT (Internet of Things) など、様々な新しいサービスの提供にも繋がるものと期待されている。

しかしながら、IPv4 と IPv6 には互換性がないため、

IPv4 ネットワークから IPv6 ネットワークに移行するためには、全ての通信機器に対してハードウェアやソフトウェアの刷新が必要になる。したがって、IPv4 ネットワークから IPv6 ネットワークへの即座な移行は困難であり、これらは一定期間の共存期間をもって運用されることとなる。

こうした背景から、IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークを相互接続するための技術が多く提案されている [3]~[7]。これらの技術は、6to4 [3] や Teredo [4]、Tunnel Broker [5] のように、IPv6 パケットを IPv4 でカプセル化することによって、外部の IPv6 ネットワークへの接続性を得るトンネリング方式と、NAT64 [6] や 464XLAT [7] などの IPv4 ヘッダと IPv6 ヘッダを相互変換することで、IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークを接続させるトランスレータ方式に大別できる。

これらの中でも、トンネリング方式は DNS のような外部のシステムに依存することなく IPv4/v6 共存環境を構築することができる。そのため、ISP (Internet Service Provider) による IPv6 インターネット接続サービスを利用できない IPv6 ユーザが IPv4 インターネットを介して IPv6 インターネットに接続するという目的においては、トンネリング方式はトランスレータ方式よりも適しており、現在のような IPv6 への移

<sup>†</sup> 名古屋工業大学大学院工学研究科, 名古屋市  
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: mizoguchi@en.nitech.ac.jp

b) E-mail: yoshi@nitech.ac.jp

DOI:10.14923/transcomj.2016JBP3029

行初期から中期においては必要不可欠な技術である。

トンネリング方式の問題点として、トンネリングによって生じるオーバーヘッドにより、ネイティブな IPv4 または IPv6 を用いた通信に比べ通信品質が劣化することがわかっている [8]。また、筆者らも、実際の Web サービス下で利用した被験者実験により、トンネリング方式である 6to4 と Teredo の QoS (Quality of Service) と QoE (Quality of Experience) を評価し、実験結果から、6to4 と Teredo の間の QoS の差が WebQoE にも影響を与えることを確認している [9]。更に、[9] は、6to4 や Teredo といったトンネル方式の共存技術はリレールータを介して通信を行うが、6to4 と Teredo の間で WebQoE に差が生じた原因として、このリレールータを介した経路の違いによる遅延差が支配的であり、方式の違いによるオーバーヘッドの差からの影響は小さいということも示している。したがって、IPv4/v6 共存技術を利用する上でサービスの品質、特に、ユーザの体感品質を向上させるには、その方式により選択された経路の違いによって生じる遅延差を考慮しなければならない。

本研究では、IPv4/v6 共存環境において、複数のリレールータを利用可能な機器が、通信開始時に通信対象とする機器に対して最も遅延の低い経路上にあるリレールータを選択する機構を提案し、これを実装する。そして、評価実験により、本機構の有効性を示す。以降、**2.**では、経路選択機構における関連研究を紹介し、**3.**では、提案機構を説明する。**4.**において、本研究で実施した実験を述べ、**5.**で、その結果と考察を示す。**6.**では、本論文のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

本章では、本機構と関連する研究を以下に述べる。

トンネリング方式の一つである 6to4 は、送信元から最も近いノードへの転送を行うユニキャスト [10] と呼ばれるルーティング方式を用いることで、リレールータを介した経路の選択を実現している。しかしながら、6to4 によるユニキャストはその通信の失敗率の高さや中継機器の運用上の問題があり、2015 年 5 月に廃止を促すよう IETF に勧告されたため [11]、今後、この方式を利用することは難しい。

Tunnel Broker [5] と呼ばれる方式では、通信開始時に Tunnel Broker と呼ばれるノードと通信機器がネゴシエーションを行い、Tunnel Broker がどの Tunnel Server (Tunnel Broker 用のリレールータ) を利用す

るかを決定することで、リレールータを介した経路の選択を実現している。しかしながら、一度決定された Tunnel Server は Lifetime と呼ばれる期間ごとに更新されるのみであり、送信先のサーバごとに適した経路は選択できない。

文献 [12] は、ICMP (Internet Control Message Protocol [14]) の Echo Request を用いて通信相手との往復遅延を常時測定し、その時々のエンドツーエンド間における遅延が最も小さい経路を選択するという方式を提案している。この方式では、常時測定した往復遅延を基に経路情報を書き換えて、通常の経路選択に上書きすることによって目的の経路選択を実現させている。この方式を利用することで、通信機器が往復遅延が変化する通信経路の場合においても、常に往復遅延が最小の経路を追跡することができる。しかしながら、これは IPv4 環境のみを考慮したものであり、IPv6 環境や、本論文で扱う IPv4/v6 環境を対象としたものではない。また、この方式は、特定少数の通信相手とのリアルタイム通信に利用されることを想定しており、リアルタイム性を考慮して ICMP の Echo Request を通信相手に対して常時送り続けるようになっている。そのため、スケーラビリティやネットワークへの負荷の面でも問題となる。

文献 [13] は、複数のネイティブ IPv6 に対応したインターネット回線を利用できる端末が、通信相手までの往復遅延が最も小さい経路をもつインターネット回線に接続されているルータを選ぶことで最適な経路を選択する方式を提案している。この方式は、TCP 通信の開始時において、端末上のミドルウェアが TCP の SYN セグメントをルータの数だけ複製してから各回線に送信し、TCP の SYN-ACK セグメントが最も早く返送された回線を用いて以降の通信を行う。文献 [12] の方式と [13] のものとを比較すると、[12] の方式は本通信とは別の測定用パケットを送受信する必要がないので、トラフィックの増加を TCP の SYN-ACK セグメントを複製させた分だけに抑えられる。一方、[13] の方式は、ネイティブな IPv6 環境のみに対応したものである。また、往復遅延を評価するためだけに TCP の SYN セグメントを複製するので、本来は必要のないハーフオープン TCP コネクションを対象サーバに生成させてしまうことになり、サーバの負荷を増大させることになる。

上記の点を踏まえ、以降では、新しい機構を提案する。

### 3. 提案機構

本提案機構は、IPv4/v6 共存環境における QoS と QoE を向上させるために、リレールータを介した往復遅延が最も小さい経路を選択するものであり、2. で述べた問題点を考慮して、以下の特徴を有する。

- トランスポート層以上の上位層に依存しない。
- 未知の送信先アドレスにも対応する。
- 以前の測定結果を再利用する。

本提案機構による経路制御は、リレールータの選択によって行われる。ここで、リレールータの選択は、IPv6 において、各リレールータの IPv6 プレフィクスから割り当てられた IPv6 アドレスを選択することにより可能である。そこで、本提案機構では、パケットの送信元アドレスに最小遅延経路上のリレールータの IPv6 プレフィクスのアドレスを上書きすることで目的の経路選択を実現する。

処理手順は以下のとおりとなる。

(1) 送信パケットを監視し、各パケットの送信先アドレスに対して最小遅延経路が既知のものかを調べる。

(2) 最小遅延経路が既知でない送信先アドレスのパケットが検知された場合は、全てのリレールータそれぞれに対して、送信元アドレスをセットした ICMPv6 の Echo Request を作成し、これらを一齐に送信する。

(3) 最初に受信した Echo Reply の経路をその送信先アドレスに対する最小遅延経路として保持する。

(4) 以後、ある一定期間は、同一の送信先アドレスをもつ全てのパケットに対して、送信元アドレスを最小遅延経路のものに上書きする。そして、その期間が経過した後は、(1) の処理へ戻る。

本提案機構は、クライアントが利用するリレールータを選択するものであるため、その実装形態としては、クライアント内のミドルウェアとして実装することが理想である。しかしながら、クライアント内のミドルウェアとしての実装が困難な場合は、6to4 ルータ上で本機構を実装することも可能である。

本提案機構により、先に述べた問題点を以下のように改善することができる。第一に、本機構は、特定の上位層プロトコルの特性に依存しない経路選択を行うことができる。本機構は、送信直前及び受信直後の各 IP パケットのヘッダを変換することで IP アドレスを切り替えるので、上位層 TCP などの通信に影響を及ぼさない。第二に、本機構は、初めて観測される送信

先アドレスに対しては、常に往復遅延の測定を行い経路を選択することで、最小遅延経路が未知の通信相手に対しても自動で適切な経路を選択することができる。第三に、測定された往復遅延の値を、一定の期間だけ保持することで、通信相手に対して送信する測定パケットの数を、静的に常時測定するものと比べて、抑制することができる。この遅延値を保持する期間は、ネットワークの状況に応じて設定可能である。したがって、本機構を利用することによってスケーラビリティやネットワークへの負荷の問題も緩和される。また、[13] のように遅延の測定に TCP を用いないため、サーバ側に不必要な TCP コネクションを生成させない。

一方、本提案機構における問題点としては以下のものがある。初めて観測される送信先アドレスをもつパケットに対しては、その送信先アドレスに対する往復遅延の測定を行ってから送信が行われるため、最初に観測されたパケットにのみ最小遅延経路の往復遅延が付加されてしまう。すなわち、当該パケットが遅延の測定後に最小遅延経路を通ることを考えると、原理上はそのパケットの往復遅延は最小遅延経路の往復遅延の2倍程度になる。特に、同時に多くのサーバを使用するサービスにおいて、利用開始時にこの遅延増加が重なってしまい、QoS の劣化が懸念される。更に、本機構はヘッダの変換を必要とするため、その処理遅延も問題点として考えられる。また、本機構は往復遅延の測定結果を保持して、これを再利用しているが、これは遅延の測定による QoS 劣化を抑えることができる反面、経路の遅延の変化に対する反応性を下げることになるため、その点も考慮しなくてはならない。

そこで、次章では、本提案機構を実装し、実際にサービスを利用した際の QoS 評価を行い、本提案機構による最小遅延経路の選択と、それに付随して発生するオーバーヘッドが QoS に及ぼす影響を評価する。

## 4. 実験

### 4.1 実験環境

本実験の環境を図 1 に示す。

図 1 において、クライアント (Client) はユーザが操作する通信の主体であり、IPv6 インターネット (IPv6 Internet) 上の Web サーバ (Web Server) と通信を行う。なお、本実験では、クライアント内のミドルウェアとして本提案機構を実装している。図 1 における 6to4 ルータ (6to4 Router) は IPv6 パケットを IPv4

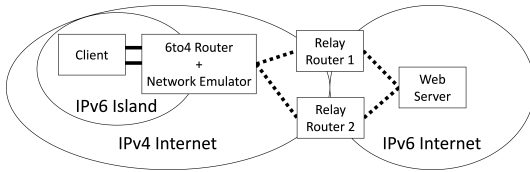


図1 実験環境  
Fig. 1 Experimental environment.

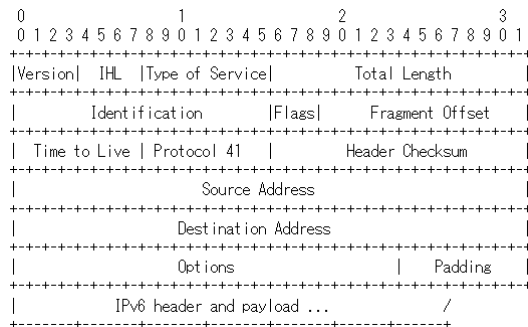


図2 パケットフォーマット (6to4)  
Fig. 2 Packet format (6to4).

によってカプセル化して、後述のリレールータ (Relay Router) に送信する。これによって、IPv4 インターネット (IPv4 Internet) を介して IPv4 インターネット上で孤立した IPv6 アイランド (IPv6 Island) と IPv6 インターネットを接続させることができる。ここで、カプセル化された 6to4 のパケットフォーマットは RFC 3056 [3] に基づき、図 2 のものとする。ネットワークエミュレータ (Network Emulator) は、特徴の異なる複数の経路を仮想的に生成するためのものである。本実験では、ネットワークエミュレータとして Dummynet [15] を用いて、2 本の遅延の異なる経路を作成する。図 1 における 2 台のリレールータ下にある破線で示された 2 本の経路が上述のネットワークエミュレータによって作られた経路である。リレールータは 6to4 ルータから送信されたカプセル化されたパケットから IPv6 パケットを取り出し、これを IPv6 インターネット上の Web サーバに転送する。

まず、本実験環境を用いて、実装した提案機構の動作を以下に示すように確認する。図 1 の Client からリレールータに対して TCP over IPv6 による TCP の SYN セグメントを送信してから、その応答である TCP の SYN-ACK セグメントまでの時間を用いてクライアントとリレールータ間のエンドツーエンドの往復遅延を測定する。この測定のためのセグメントを

表 1 付加遅延の組み合わせ  
Table 1 Combinations of additional delay.

	Additional Delay [msec]	
	Route 1	Route 2
組み合わせ 1	10	30
組み合わせ 2	50	0
組み合わせ 3	30	100
組み合わせ 4	80	60

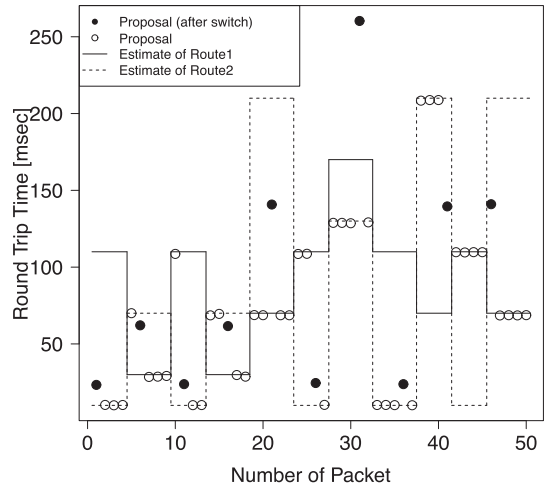


図3 動作確認結果  
Fig. 3 Confirmation of operation.

むパケットを 1 秒間隔で 50 回送信する。ここでは、提案機構の動作確認を目的としているので、ネットワークエミュレータにより付加される遅延の値を、決められた値の組み合わせの中から 5 秒間隔で切り替わるようにする。ネットワークエミュレータにより付加される遅延の値の組み合わせは表 1 の 4 種類を用いる。

実験結果を図 3 に示す。横軸は測定に用いたパケットを時系列で並べたときの番号であり、縦軸は観測された往復遅延 (ミリ秒) である。また、図中において、黒い丸が提案機構による経路の切り替えが行われた直後の往復遅延を、白い丸が切り替えが行われなかった場合の往復遅延を示している。図 3 において、実線と破線はそれぞれ経路 1 のみを用いた場合の往復遅延と、経路 2 におけるものである。

図 3 より、経路選択を行った後のパケットは適切に最小遅延経路を使用して送信されていることがわかり、提案機構が正しく動作していることが確認された。また、経路選択を行った場合の往復遅延は最小遅延経路の往復遅延の 2 倍程度となっており、これも 3. で述べたとおりの結果となっていることがわかった。

一方、筆者らの事前研究 [16] で、本機構において、往復遅延の測定結果を保持、再利用（以降、これをキャッシュと呼ぶ）することで、TCP コネクションの確立に要する時間を短縮できることを確認している。ただし、[16] は、単一の TCP コネクションで大きなデータを伝送するような場合はキャッシュの有無による有意な差は見られないことも示している。したがって、対象とするサービスやネットワークの環境に応じて、キャッシュを活用することで、より高い効果が期待できる。本論文は、本機構のオーバーヘッドが QoS に及ぼす影響を評価するものであるので、以降では、キャッシュを使用しない環境で評価を行う。

以上より提案機構の動作を確認できたので、次節で提案機構を利用した場合の QoS を評価する。

#### 4.2 評価実験

本実験は、3. で述べた提案機構による経路選択のオーバーヘッドが QoS に及ぼす影響を評価するために、静的な経路制御により最小遅延となる経路を選択する場合と本提案機構により動的な経路制御を行う場合とを比較する。本実験においては、インターネット上の代表的なサービスの一つである Web サービスにおける通信を対象とし、QoS だけではなく、QoE (WebQoE) の観点からも評価する。ここで、静的な最小遅延経路の選択とは、通信を行うサーバごとにそれらに対する最小遅延経路をあらかじめ静的に設定しておくことを指す。本実験では、最小遅延をとる経路を一方の経路に固定し、常に最小遅延経路を使用させるように設定することによって、提案機構による経路選択のオーバーヘッドを変化させることなく、実験環境上で静的な最小遅延経路の選択を実現するものとする。最小遅延経路を固定するために、[9] の実験において使用された 6to4 及び Teredo のリレールータまでの遅延を参考として、図 1 のネットワークエミュレータにおいて、片方の経路に 50 ミリ秒、他方の経路に 90 ミリ秒の付加遅延を与える。

本実験において使用する Web サービスとしては、[9] を参考とし、Wikipedia [17]、Google Maps [18]、YouTube [19] の三つのサービスを採用する。なお、これらのサービスに対して、各リレールータから IPv6 上のサーバまでの遅延差を測定したところ、これらは常に 40 ミリ秒を超えないことを確認できた。したがって、先に示した付加遅延の値は適切であると考えられる。被験者が行うタスクをサービスごとに示す。Wikipedia のタスクは、被験者が実験者に指定された

情報を、調べるものである。Google Maps では、被験者は実験者に指定された施設の情報を探す。YouTube のタスクとして、実験者に指定された条件を満たす動画を、被験者が探すものを考える。各タスクでは、条件を五つずつ設定し、各タスクの制限時間は、Wikipedia で 2 分、Google Maps と Youtube で 3 分とする。被験者は 5 名である。QoS の評価尺度としては、[9] を参考にし、往復遅延 (Round Trip Time; RTT)、遅延揺らぎ (Packet Delay Variation; PDV)、TCP スループット、及びページを取得するのに要した時間 (Page Load Time; PLT) の四つを採用し、以下のように定義する。TCP スループット  $B$  は次式で定義される。

$$B = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \frac{A_i}{P_i} \quad (1)$$

ここで、 $C$  は、クライアントと Web サーバ間で観測された TCP コネクションの総数であり、 $A_i$  と  $P_i$  は、 $k$  ( $1 \leq i \leq C$ ) 番目のコネクションにおいて、クライアントから Web サーバに送られ、かつ、確認応答されたデータの量とコネクションの生存時間をそれぞれ表す。RTT  $R$  は式 (2) で定義される。

$$R = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S (T_{ack}(j) - T_{data}(j)) \quad (2)$$

式 (2) において、 $S$  は、確認応答が取れたクライアントからサーバへの総 TCP セグメント数 (ACK のみで送信データが含まれないものは除く) であり、 $T_{data}(j)$  は、 $k$  ( $1 \leq j \leq S$ ) 番目のセグメントが送信された時刻、 $T_{ack}(j)$  は、 $k$  番目のセグメントに対する ACK セグメントが受信された時刻を表す。PDV  $D$  は、次式で定義する。

$$D = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S (T_{ack}(j) - T_{data}(j)) - M \quad (3)$$

$M$  は、実験中に測定された往復遅延の最小値である。また、PLT  $L$  を式 (4) で定義する。

$$L = \frac{1}{F} \sum_{k=1}^F (T_{file}(k) - T_{syn}(k)) \quad (4)$$

ここで、 $F$  は Web サーバからクライアントに送られたファイル数である。 $k$  ( $1 \leq k \leq F$ ) 番目のファイルに対して、 $T_{syn}(k)$  は TCP コネクションの確立要求、すなわち SYN セグメントが送信された時刻であり、

$T_{file}(k)$  は、ファイルダウンロードが完了するまでの時間とする。なお、本実験では、HTTP において非持続的接続が用いられるものとする。また、WebQoE としては、ユーザビリティ [20] における三つの評価尺度を用い、それぞれ以下のように定義する。

- 有効さ  
タスクにおいて達成された条件の数と定義する。
- 効率

有効さを被験者がタスクに費やした資源で除算したものと定義する。本研究では、被験者の労力を資源と考へ、被験者が Web サービスを利用するためにマウスやキーボードの入力デバイスを使用した時間の総和を資源として定義する。

- 満足度  
本実験では、5 段階の評定尺度法を用いて満足度の評価を行う。評定尺度法において、被験者は Web サービスを利用する上での満足の度合いを、満足、やや満足、どちらとも言えない、やや不満、不満、の五つの評価語で評価し、それぞれの評点を 5, 4, 3, 2, 1 とする。そして、得られた評点の平均を満足度として扱う。

## 5. 実験結果と考察

### 5.1 QoS 評価結果

QoS 評価結果を図 4 から図 7 に示す。各図において横軸は対象サービスを表し、両側  $t$  検定による 95% 信頼区間も併せて表記する。なお、以降の有意差検定には全て有意水準 5% の両側  $t$  検定を用いる。

RTT を図 4 に示す。図 4 を見ると、RTT に関しては、静的な経路制御のものと本提案機構によるものとの間に、有意な差はないことがわかる。したがって、提案機構のオーバヘッドは、ほとんど RTT を劣化させないことがわかった。

図 5 は PDV の測定結果である。図 5 から、Wikipedia と YouTube において、提案機構の PDV が静的な経路制御のものより少し大きくなっているが、統計的な有意差は見られない。よって、RTT と同様に PDV においても、提案機構のオーバヘッドが PDV を劣化させないことが示された。図 4 の結果と併せて考えると、提案機構がネットワークの遅延に与える影響はほとんどないということがわかる。

次に、図 6 より TCP スループットを確認する。図 4、図 5 において、本提案機構のオーバヘッドが遅延をほとんど劣化させなかったことから推測できるように、図 6 から、本提案機構によって TCP スループットが劣化しないことを確認した。

PLT を図 7 に示す。図 7 を見ると、Wikipedia において、静的な経路制御の PLT と本提案機構の PLT との間の結果に少し差が見られるが、これは統計的に有意なものではなかった、したがって、本提案機構のオーバヘッドが PLT を大きく劣化させるものではないことが示された。

本実験では、二つの経路をもつ環境での評価を行った。切り替えの対象となる経路の候補が三つ以上存在する場合、本機構のオーバヘッドが増加することにな

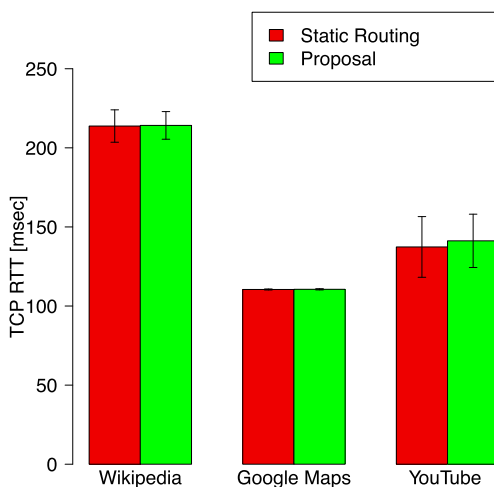


図 4 RTT  
Fig. 4 RTT.

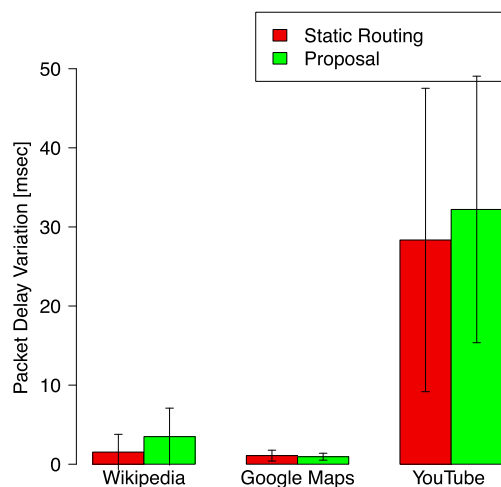


図 5 PDV  
Fig. 5 PDV.

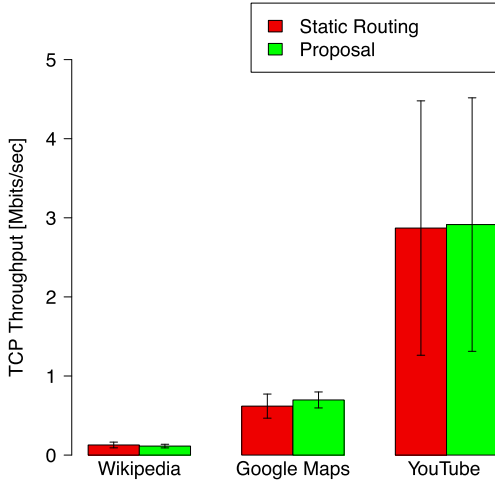


図 6 TCP スループット  
Fig. 6 TCP throughput.

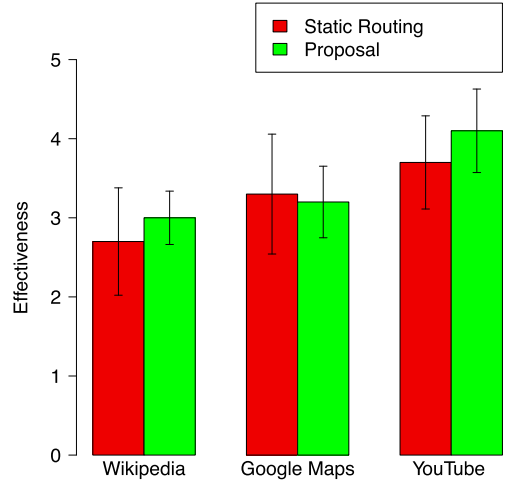


図 8 有効さ  
Fig. 8 Effectiveness.

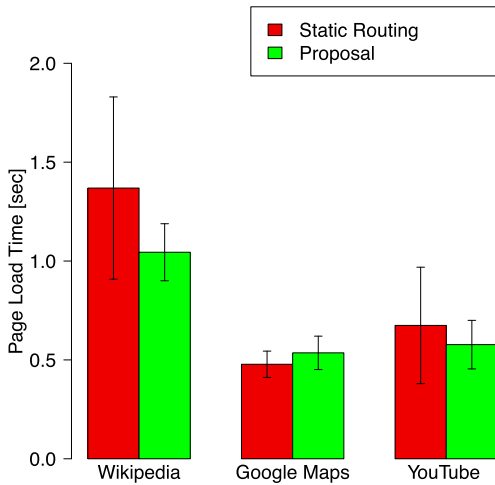


図 7 PLT  
Fig. 7 PLT.

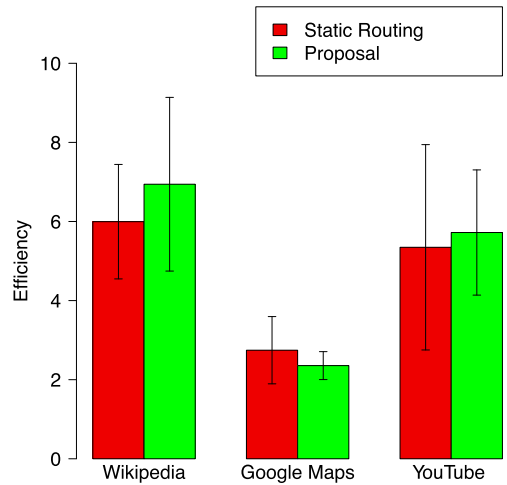


図 9 効率  
Fig. 9 Efficiency.

る。しかしながら、本方式において、ICMPv6 Echo Request に対する処理は、各リレールータで同時に行われるので、クライアントへの負担は小さい。また、実際にはインターネット上でのリレールータの数は限られており、候補となる経路は膨大な数にはならないため、ICMP v6 Echo Request の作成も、大きな負担とはならないものと考えられる。

## 5.2 WebQoE 評価結果

最後に、図 8 から図 10 に WebQoE の結果を示す。図 8 は有効さであり、この結果から、静的な経路制御と提案機構の間に差が見られなかったことから、提

案機構のオーバーヘッドが被験者のタスクを妨げるものではないことが確認できた。図 9 は効率を示す。図 9 を見ても、静的な経路制御と提案機構の間に差は見られないことから、提案機構のオーバーヘッドにより、ユーザが資源を余分に消費することはないことが示された。最後に、図 10 は満足度である。有効さ、効率と同様に、図 10 においても、静的な経路制御と提案機構の間に差は見られない。したがって、提案機構によるオーバーヘッドは、ユーザのサービスに対する満足度に影響しないことも確認できた。

以上より、いずれの WebQoE の結果においても、静

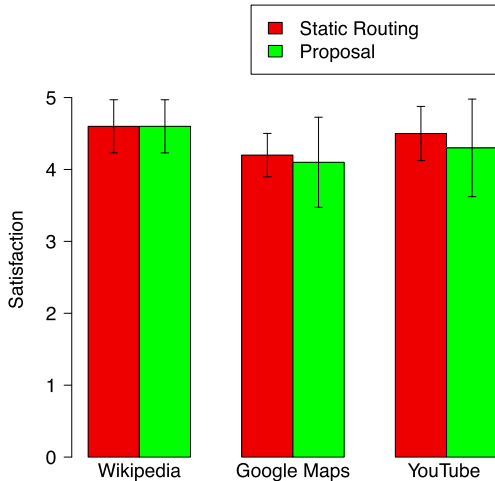


図 10 満足度  
Fig. 10 Satisfaction.

的な経路制御と提案機構を利用したものとの間で差は生じない。これは前節の QoS の評価結果で差が見られなかったことも符合している。

以上の結果から、提案機構を利用することでサーバごとに静的に最小遅延経路を設定した場合と同等の QoE が得られることが示された。したがって、複数のリレーラータを利用できる通信環境をもつユーザが提案機構を利用することで、ユーザは最小の RTT でサーバと通信できるようになり、QoS 及び QoE の向上を図ることができる。

## 6. む す び

本論文では、IPv4/v6 共存環境下における QoS と QoE の向上を目的とし、トンネリング方式におけるリレーラータとして最適なものを選択する機構を提案した。そして、本提案機構を実装し、Web サービス下で静的に最小遅延経路を選択した場合と比較して評価を行った。その結果、提案機構を利用することでサーバごとに静的に最小遅延経路を設定した場合と同等の QoS と QoE が得られることが示された。したがって、複数のリレーラータを利用できる通信環境をもつユーザが提案機構を利用することで、ユーザは最小の RTT でサーバと通信できるようになり、QoS 及び QoE の向上を期待できることがわかった。

今後の課題としては、通信の特徴の異なる他のサービスでも実験を行うことで、その他のサービスに対する有効性も確認しなければならない。また、提案機構

のキャッシュ機能については、観測用のトラフィック量と経路選択に要する時間との間にトレードオフの関係があるため、キャッシュの再利用に関するパラメータに適切な値を設定する方法をより詳細に検討していく必要がある。更に、本論文の提案機構の実装では、RTT の測定を個々の IPv6 アドレス単位で行っていたが、これをアドレスプレフィクス単位で行うことで RTT の測定回数を減らし、性能の改善を行っていくことも考えられる。

**謝辞** 本研究において、御協力頂いた被験者の方々、及び研究室の関係者各位に心より感謝申し上げます。本研究は MEXT 科研費 16K00122 の助成を受けたものです。

## 文 献

- [1] S. Deering and R. Hinden, "Internet protocol, Version 6," RFC 2460, Dec. 1998.
- [2] World IPv6 Launch, <http://www.worldipv6launch.org/>
- [3] B. Carpenter and K. Moore, "Connection of IPv6 domains via IPv4 clouds," RFC 3056, Feb. 2001.
- [4] C. Huitema, "Teredo: Tunneling IPv6 over UDP through Network Address Translations (NATs)," RFC 4380, Feb. 2006.
- [5] A. Durand, P. Fasano, I. Guardini, and D. Lento, "IPv6 tunnel broker," RFC 3053, Jan. 2001.
- [6] M. Bagnulo, P. Matthews, and I. van Beijnum, "Stateful NAT64: Network address and protocol translation from IPv6 clients to IPv4 servers," RFC 6146, April 2011.
- [7] M. Mawatari, M. Kawashima, and C. Byrne, "464XLAT: Combination of stateful and stateless translation," RFC 6877, April 2013.
- [8] N. Bahaman, A.S. Prabuwo, and E. Hamid, "Network performance evaluation of 6to4 tunneling," Proc. International Conference on Innovation Management and Technology Research (ICIMTR), pp.263-268, Tianjin, May 2012.
- [9] T. Mizoguchi and Y. Ito, "Comparison of WebQoE between 6to4 and Teredo," Proc. International Conference on ICT Convergence (ICTC 2015), Korea, Oct. 2015.
- [10] C. Huitema, "An anycast prefix for 6to4 relay routers," RFC 3068, June 2001.
- [11] O. Troan and B. Carpenter, "Deprecating the anycast prefix for 6to4 relay routers," RFC 7526, May 2015.
- [12] Y. Jin, N. Yamai, K. Okayama, and M. Nakamura, "Design and implementation of optimal route selection mechanism for outbound connections on IPv6 multihoming environment," Journal of Information Processing, vol.15, no.4, pp.441-448, July 2015.



- [13] 佐藤秀章, 石井啓之, “常時遅延測定による経路選択システムの評価,” 信学技報, IN2006-118, 2006.
- [14] J. Postel, “Internet control message protocol,” RFC 792, Sept. 1981.
- [15] L. Rizzo, “Dummynet,”  
<http://info.iet.unipi.it/~luigi/dummynet/>
- [16] 溝口知彦, 伊藤嘉浩, “IPv4/v6 共存環境下におけるリレールータを介した低遅延な経路選択機構の検討,” 信学技報, IN2015-103, 2016.
- [17] Wikipedia, <http://ja.wikipedia.org/>
- [18] Google Maps, <https://maps.google.co.jp/>
- [19] YouTube, <https://www.youtube.com/>
- [20] International Organization For Standardization, “Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs), Part 11: Guidance on usability,” March 1998.

(平成 28 年 4 月 7 日受付, 7 月 8 日再受付,  
9 月 2 日早期公開)



溝口 知彦 (学生員)

平 28 名工大大学院情報工学専攻博士前期課程了。同年株式会社中電シーティーアイ入社。



伊藤 嘉浩 (正員)

平 3 名工大・工・電気情報卒。平 5 同大大学院博士前期課程了。同年国際電信電話株式会社入社。KDDI 研究所主査を経て、平 13 より名工大・電気情報助手。現在、同大大学院准教授。工博。インターネットにおけるサービス品質制御・評価の研究に従事。IEEE, 情報処理学会, 映像情報メディア学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。