

オーバレイルーティングに起因する ISP 間トランジットコスト削減手法の提案および評価

松田 一仁[†] 長谷川 剛^{††} 亀井 聡^{†††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒560-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

^{†††} NTT サービスインテグレーション基盤研究所 〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

E-mail: †{k-matuda,hasegawa,m-murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††kamei.satoshi@lab.ntt.co.jp

あらまし オーバレイルーティングはアプリケーションレベルの経路制御技術であり、エンド間ネットワーク性能を指標として経路選択を行うことで、ユーザの体感性能が向上することが知られている。一方で、IP 層で行われるルーティングとの経路制御ポリシーの違いが原因となり、オーバレイルーティングによって ISP 間の金銭的なトランジットコストが増加することが考えられる。我々はこの問題に対して、重回帰分析を用いてエンド間のトランジットコストを推定し、これを制限することで ISP 間のトランジットコストを削減する手法を提案している。本稿では、PlanetLab ノードを用いたインターネット環境および日本の商用ネットワーク環境を想定した評価により、提案手法が様々なネットワーク環境に適用できることを示す。加えて、PlanetLab 環境および日本の商用ネットワーク環境の性質の差異から、提案手法に影響を及ぼすネットワーク環境の性質について議論する。

キーワード オーバレイネットワーク、オーバレイルーティング、ISP 間トランジットコスト、PlanetLab、重回帰分析

Reducing inter-ISP transit cost caused by overlay routing

Kazuhito MATSUDA[†], Go HASEGAWA^{††}, Satoshi KAMEI^{†††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka, 560-0871 Japan

^{††} Cybermedia Center, Osaka University Machikaneyama-cho 1-32, Toyonaka-shi, Osaka, 560-0043 Japan

^{†††} NTT Service Integration Laboratories Midori-cho 3-9-11, Musashino-shi, Tokyo, 180-8585 Japan

E-mail: †{k-matuda,hasegawa,m-murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††kamei.satoshi@lab.ntt.co.jp

Abstract Overlay routing is an application-level routing mechanism. Recent researches have revealed that user-perceived performance can be improved by overlay routing. However, because of the policy mismatch between overlay routing and IP routing, overlay-routed traffic would increase inter-ISP transit cost. In the previous work, we proposed a method to reduce inter-ISP transit cost caused by overlay routing. We utilize the number of transit links on overlay-routed paths as a metric of the inter-ISP transit cost, and estimate it utilizing the multiple regression analysis. By limiting the estimated number of transit links, we can reduce the inter-ISP transit cost. In the present report, we evaluate the performance of the proposed method in the two network environments that we assume, which are a generalized PlanetLab environment and a Japanese commercial network environment, to demonstrate the performance of the proposed method in various network environments. We also discuss the network properties which affect the performance of the proposed method, utilizing the analysis results of the both environments.

Key words overlay network, overlay routing, inter-ISP transit cost, PlanetLab, multiple regression analysis

1. ま え が き

オーバレイルーティングはオーバレイネットワーク上で行われるアプリケーションレベルの経路制御技術であり、ネット

ワークを用いるアプリケーションのトラフィックにアプリケーションレベルの経路を提供する (図 1)。本稿では、オーバレイネットワーク上で行われるアプリケーションレベルのトラフィックのルーティングをオーバレイルーティング、IP 層で行われ

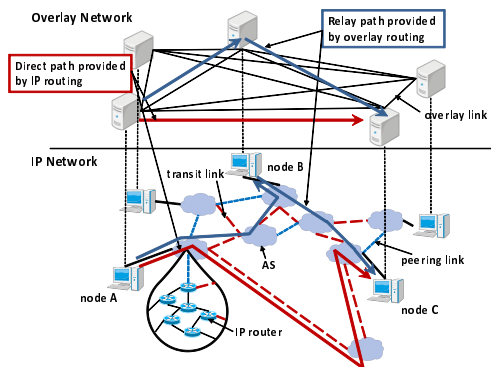


図 1 ネットワークモデル

るルーティングを IP ルーティングと呼ぶ。昨今、オーバレイルーティングを用いることで IP ルーティングに比べてユーザが感じるエンド間のネットワーク性能 (以降、ユーザ性能と記述する) が向上することが明らかにされてきている [1-4]。このような性能向上は主として IP ルーティングとオーバレイルーティングの経路選択のポリシーが異なることに起因する。IP ルーティングではルータホップ数や AS ホップ数を基本的な経路選択の指標とし、加えて ISP の金銭的成本構造を考慮して経路選択を行っている。これに対してオーバレイルーティングでは遅延時間や利用可能帯域などのユーザ性能が向上するような経路選択を行う。このようなポリシーの差異によりオーバレイルーティングによってユーザ性能が向上する一方で、ISP の金銭的成本構造に従わないトラフィックが発生することにより、ネットワーク全体における ISP 間のトランジットコストが増加する可能性が指摘されている [5, 6]。

この問題を解決する 1 つの方法として、我々は [7] において、オーバレイルーティングに起因する ISP 間トランジットコストを削減する手法を提案している。提案手法では、経路上のトランジットリンクの数 (以降、トランジット数と記述する) を ISP 間トランジットコストの指標として用いる。ここで、エンド間のトランジット数を取得する方法は一般には存在しないため、提案手法ではエンド間のネットワーク性能指標から重回帰分析を用いてトランジット数を推定する。推定したトランジット数を用いてオーバレイルーティングによるトランジット数の増加を制限することで ISP 間トランジットコストを削減する。[7] においては、PlanetLab [8] 環境においてオーバレイネットワークが構築された状況を想定し、提案手法の性能評価を行った。しかし、PlanetLab は北米およびヨーロッパに偏ったノード配置を持つため、提案手法の一般的なネットワーク環境における性能評価を行う必要がある。また [7] では、オーバレイルーティングによって増加する経路上のトランジット数の上限を制限した場合の、オーバレイルーティングによるユーザ性能の変化のみを評価しており、提案手法によって実際にどの程度トランジット数が削減できているかの定量的な評価は行っていない。

そこで本稿ではまず、提案手法の性能評価を、様々なネットワーク環境を想定して行うことにより、提案手法の有効性を明らかにする。具体的には、以下の環境においてオーバレイネットワークが構築された状況を想定した評価を行う。1 つ目は、PlanetLab 環境を一般的なインターネット環境に即したノード分布を持つように調整したネットワーク環境である。2 つ目は、日本の商用 ISP に配置されたノードによって構成されるネットワーク環境である。さらに、提案手法を用いることでオーバレイネットワーク全体で削減できるトランジット数を定量的に評価し、オーバレイルーティングによるユーザ性能の向上と削減できるトランジット数の関係を明らかにする。また、上述した 2 つのネットワーク環境の性質の差異を調べることで、ネットワーク環境が提案手法に与える影響を議論する。

以下、2. 章では本稿で扱うオーバレイルーティングとそれ

による ISP 間トランジットコストの増加について説明する。3. 章では、[7] で提案している ISP 間トランジットコストの削減手法を説明する。4. 章では、本稿で使用するネットワーク環境およびデータについて説明する。5. 章では、提案手法の PlanetLab 環境および日本の商用ネットワーク環境においてオーバレイネットワークが構築された場合を想定した数値評価の結果を示す。加えて、提案手法に影響を与えるネットワークの性質について議論する。最後に、6. 章で本稿のまとめおよび今後の課題について述べる。

2. オーバレイルーティングとその問題点

オーバレイルーティングは、アプリケーションレベルのネットワーク性能指標である遅延時間、利用可能帯域、TCP スループット、パケットロス率などを経路選択の指標としてオーバレイネットワーク上の経路を決定する。これにより、ユーザ性能が向上することが知られている。これらの性能向上は主としてオーバレイルーティングと IP ルーティングの経路選択におけるポリシーの違いに起因する。オーバレイルーティングでは上述したようなネットワーク性能指標を経路選択の指標とするのに対し、IP ルーティングでは主として IP 層のルータホップ数や Autonomous System (AS) ホップ数を経路選択の指標として用いる。加えて、IP ネットワークの提供者である Internet Service Provider (ISP) は他の ISP との商業的關係を考慮した経路選択を行う。ISP 間の商業的關係に応じて、ISP 間を繋ぐリンクには主として次の 2 種類が用いられる^(注1)。1 つは上流 ISP と下流 ISP を結ぶトランジットリンクであり、一般に通過するトラフィック量の最大値によってその金銭的成本が決定され、トランジットリンクで接続された ISP のカスタマによって利用される。もう 1 つはピアリング関係を結ぶためのピアリングリンクで、発生する金銭的成本は回線の維持費のみであるが、ピアリングリンクで接続された ISP を起点および終点とするトラフィックのみを通過させるのが一般的である。ISP はこのような各リンクの違いを考慮して経路を設定する。このため IP ルーティングでは必ずしもユーザ性能が最適化されるような経路選択は行われていない。

図 1 は、オーバレイルーティングによってユーザ性能が向上する例を示している。図 1 において AS 間のリンクの長さが伝搬遅延時間を表すものとする、AS ホップ数の観点では IP パスの方が性能が良いが、エンド間の遅延時間の観点では IP パスよりもオーバレイパスの方が性能が良い。

上述した経路選択のポリシーの差異により、オーバレイルーティングによってユーザ性能が向上する一方で、オーバレイルーティングによって ISP の意図した金銭的成本構造に従わないトラフィックが発生する可能性がある。このようなトラフィックにより ISP 間トランジットコストが増加し、その結果ネットワーク全体の ISP 間トランジットコストが増加することが指摘されている。

図 1 に典型的な例を示す。図 1 において、各ノード (node A-C) 間の IP パスに 2 本ずつトランジットリンクが含まれている。このとき、ノード A からノード C へのデータ転送が行われ、トラフィックが発生したとする。IP ルーティングによってパスを決定した場合、またはオーバレイルーティングにおいて他ノードを経由するよりも直接宛先ノードへトラフィックを流した方が性能がよい場合は、使用されるトランジットリンクはノード A, C 間の 2 本となる。一方、オーバレイルーティングにおいてノード B を経路するようなパスを選択する場合には、通過するトランジットリンクはノード A, B 間の 2 本、およびノード B, C 間の 2 本の合計 4 本となり、IP ルーティングのそれより 2 本多くなる。すなわち、オーバレイルーティングによる経路制御によりネットワーク全体の ISP 間トランジッ

(注1): シプリングリンクは同一組織内でのリンクであるため、本稿では対象外とする。

トコストが増加することになる。

我々はこの問題に対し [7] において、オーバーレイルーティングによるユーザ性能の向上を維持しつつ、ISP 間トランジットコストを削減する手法を提案している。本稿では提案手法が様々な環境において効果があることを示す。また、提案手法に影響を与えるネットワーク環境の性質について議論する。

3. 提案手法

本章ではまず本稿で想定するネットワークモデルについて説明する。その後、オーバーレイルーティングにおいて ISP 間トランジットコストを削減する提案手法について説明する。

3.1 ネットワークモデル

本稿では、図 1 に示すようなネットワークモデルを想定する。下位層ネットワークは複数の AS^(注2) から構成されており、各 AS は複数の IP ルータによって自身のネットワークを構築している。AS 同士はトランジットリンクまたはピアリングリンクで接続されており、トラヒックがトランジットリンクを通過する際には ISP 間トランジットコストが発生する。なお、提案手法ではネットワーク全体のトランジットコストを削減することを目的とするため、トランジットリンクで接続された 2 つの AS の上下関係については考慮しない。

さらに、各 AS に属するエンドホストをオーバーレイノード (以降、単にノードと記述する) として、下位層ネットワーク上にオーバーレイネットワークが構築される状況を想定する。本稿では提案手法の基本的な性能を評価するために、フルメッシュトポロジを想定し、オーバーレイネットワークのトポロジ構築手法は考慮しない。

上述したオーバーレイネットワーク上でオーバーレイルーティングによる経路制御が行われるとする。本稿では、以下の 2 種類のオーバーレイパスを想定する。

直接パス 送信元ノードから宛先ノードまで直接至るパス。送信元ノードから宛先ノードまでの IP パスに等しく、オーバーレイルーティングにおいては 1 ホップのパスとなり、1 本のオーバーレイリンクからなる。

迂回パス 送信元ノードから他ノードを経由し、宛先ノードに至るパス。3 ホップ以上のパスはユーザ性能の向上にはほぼ効果がないため [9]、本稿では 2 ホップのパスのみを考える。よって、迂回パスは 2 本のオーバーレイリンクからなる。

ノード i, j 間の直接パスにおける遅延時間、利用可能帯域などのユーザ性能を P_{ij} 、ノード k を経由する迂回パスのユーザ性能を P_{ikj} とした場合に、ノード i, j 間のノード k を経由する場合の性能向上率を、遅延時間のように値が小さい方が性能が良くなる性能指標の場合は式 (1) で、利用可能帯域のように値が大きい方が性能が良くなる性能指標の場合は式 (2) で定義する。

$$I_{ikj} = P_{ij}/P_{ikj} \quad (1)$$

$$I_{ikj} = P_{ikj}/P_{ij} \quad (2)$$

ノード i, j を除くすべてのノードを経由するノード k の候補とした場合にノード i, j 間でオーバーレイルーティングによって得られる最大性能向上率 \hat{I}_{ij} は次式で表される。

$$\hat{I}_{ij} = \max_{k \neq i, j} (I_{ikj}) \quad (3)$$

なお、性能の向上が得られる迂回パスが存在しない場合、最大性能向上率は 1 以下の値をとる。

3.2 制限付きオーバーレイルーティング

ISP 間トランジットコストはトランジットリンクをトラヒックが通過することで発生するため、提案手法ではパス上のトランジット数を ISP 間トランジットコストの指標とする。ノード

i, j 間のオーバーレイリンクに m_{ij} 本のトランジットリンクが含まれているとした場合に、直接パスおよびノード k を経由する迂回パスのトランジット数をそれぞれ式 (4), (5) で定義する。

$$M_{ij} = m_{ij} \quad (4)$$

$$M_{ikj} = m_{ik} + m_{kj} \quad (5)$$

上述した ISP 間トランジットコストの指標であるトランジット数を用いて、オーバーレイルーティングにおいて ISP 間トランジットコストを削減する経路選択手法を 2 つ提案する。1 つ目の手法では、オーバーレイルーティングによって選択される迂回パスのトランジット数の上限を式 (6) に従って制限する。

$$M_{ikj} \leq M_{ij} + \alpha \quad (6)$$

ここで、 α は迂回パスのトランジット数が直接パスのトランジット数をどれだけ超過してよいかを表している。この制限下での最大性能向上率 \hat{I}_{ij}^t は次式で表される。

$$\hat{I}_{ij}^t = \max_{k \neq i, j} (I_{ikj}) \quad \text{ただし } M_{ikj} \leq M_{ij} + \alpha \quad (7)$$

すなわちこの経路選択手法では、オーバーレイルーティングによるトランジット数の増加を直接パスと比べて α 以下に抑えつつ、最大で \hat{I}_{ij}^t のユーザ性能の向上が得られる。

2 つ目の経路制御手法では、トランジット数の削減によるオーバーレイルーティングのユーザ性能の劣化を制限する。最大性能向上率 \hat{I}_{ij} を得られる迂回パスがノード l を経由した場合に得られるとすると、ノード i, j 間の経路選択において、ノード i, j を除くすべてのノードを経由するノード k の候補とした場合に削減可能な最大トランジット数 \hat{M}_{ij} は次式で表される。

$$\hat{M}_{ij} = M_{ilj} - \min_{k \neq i, j} (M_{ikj}) \quad (8)$$

提案する経路選択手法では、迂回するノード k に関して、値が小さい方が性能がよくなる性能指標の場合は式 (9) で、値が大きい方が性能がよくなる性能指標の場合は式 (10) でユーザ性能の劣化の制限を定義する。

$$P_{ikj} \leq P_{ilj} \times (1 + \beta) \quad (9)$$

$$P_{ikj} \geq P_{ilj} \times (1 - \beta) \quad (10)$$

ここで、 β はオーバーレイルーティングによって得られる最良の性能からの劣化の下限を表している。この制限下での削減可能な最大トランジット数 \hat{M}_{ij}^p は次式で表される。

$$\hat{M}_{ij}^p = M_{ilj} - \min_{k \neq i, j} (M_{ikj})$$

$$\text{ただし } P_{ikj} \leq P_{ilj} \times (1 + \beta)$$

$$P_{ikj} \geq P_{ilj} \times (1 - \beta) \quad (11)$$

すなわちこの経路選択手法では、オーバーレイルーティングによって得られる最良のユーザ性能からの劣化を β 以内に抑えつつ、最大で \hat{M}_{ij}^p のトランジット数を削減できる。

3.3 トランジット数推定手法

3.2 節で述べた制限付きオーバーレイルーティングではパス上のトランジット数を ISP 間トランジットコストの指標として利用するが、パス上のトランジット数を取得するための ISP 間の契約関係は一般には公開されていない。加えて、エンド間の計測によりパス上のトランジット数を求める効果的な手法は存在しない。例えば [10] では、多数のバックボーンルータを用いて収集した情報により ISP 間の契約関係を推定しており、エンドホストから得られる情報だけでは推定を行っていない。そこで我々は、オーバーレイノードが容易に取得可能なエンド間のネットワーク性能指標からパス上のトランジット数を推定する手法を提案する。

トランジット数の推定を行うにあたり、まずオーバーレイノード

(注2): 想定するネットワークモデルでは 1 つの AS が 1 つの ISP に対応しているものとして扱う。

表 1 各 RIR に割り当てられた AS 番号数と評価で用いるノード数

| RIR (地域名) | AS 番号割り当て数 | ノード数 |
|------------------|------------|------|
| ARIN (北アメリカ) | 24,422 | 50 |
| RIPE NCC (ヨーロッパ) | 21,065 | 43 |
| APNIC (アジア) | 5,782 | 12 |
| LACNIC (南アメリカ) | 2,815 | 6 |

ドが取得容易なエンド間のネットワーク性能指標であるルータホップ数、遅延時間、利用可能帯域などと、精度のよい ISP 間の契約関係の推定手法である [10] などから得られるトランジット数との相関関係を求める。得られた結果から相関関係の強い指標を選出し、それらをパラメータとして重回帰分析を行うことでノード間のオーバーレイリンク上に含まれるトランジット数を推定する重回帰式を導出する。

ノード i, j 間の q 番目のパラメータの値を x_{ij}^q とした場合に、ノード i, j 間のオーバーレイリンクに含まれるトランジット数を次式で推定する。

$$m_{ij}^e = b_0 + b_1 x_{ij}^1 + b_2 x_{ij}^2 + \dots + b_n x_{ij}^n \quad (12)$$

ここで、 b_0 は切片を、 b_q は q 番目のパラメータの係数を表し、 n はパラメータの総数を表す。

4. 使用データ

本稿では、PlanetLab ノードがオーバーレイネットワークを構築する場合と日本の商用ネットワークにおいて日本の商用 ISP に属するノードがオーバーレイネットワークを構築する場合の 2 つのネットワーク環境を想定する。これらの環境で提案手法の評価を行うためには、各環境に関して、ノード間の遅延時間、利用可能帯域、ルータレベルのホップ数およびパス、AS レベルのホップ数およびパスを取得する必要がある。また、各環境に関して 3.3 節で述べた重回帰式の導出および提案手法によるトランジット数の削減の性能評価を行うために、AS 間の関係情報（トランジットかピアリングか）が必要となる。

本章では、各環境の詳細、および上述したデータの取得方法を説明する。

4.1 PlanetLab ネットワーク

PlanetLab においては、データ取得時に接続可能であった 459 の PlanetLab ノードに関してノード間のデータを取得した。実際にはネットワーク状況によってデータを取得できないパスが存在するため、計測可能であった 64,077 本のパスのデータを用いた。ノード間の各データの取得方法を以下に示す。遅延時間および利用可能帯域

Scalable Sensing Service (S^3) [11] において公開されている PlanetLab ノード間のネットワーク性能計測結果を利用した。 S^3 では PlanetLab ノード間の物理帯域、遅延時間、利用可能帯域及びパケット棄却率がおよそ 4 時間毎に計測され、その結果が公開されている。本稿では計測誤差の影響を避けるため、2008 年 11 月 12 日から 2008 年 11 月 25 日までの 2 週間の計測データの中央値を用いた。

IP レベルホップ数およびパス

PlanetLab ノード間でフルメッシュに traceroute コマンドを実行して取得した。本稿では 2008 年 11 月 12 日に取得したデータを用いた。

AS レベルホップ数およびパス

IP レベルのパスに Route Views Project [12] において公開されている AS 番号と IP アドレスプレフィックスの対応を当てはめて取得した。

AS 間関係情報

CAIDA [13] において公開されている AS 間の関係情報を利用した。ただし、CAIDA において公開されている AS 間関係情報はすべての AS 間について提供されていないため、関係が不明な AS の組に関しては AS の度数に基づいて確率的に関係を推定した [14]。本稿ではこの方法で取得したトランジット数を真のトランジット数とし、5. 章の評価で用いた。

PlanetLab のノード分布は北米およびヨーロッパに偏っている。そのため、PlanetLab に属する全てのノードを用いて構築されたオーバーレイネットワークを想定して評価を行うと、この偏ったノード分布の影響を受けることが考えられる。そこで本稿では、PlanetLab に属するノードを現在各地域インターネットレジストリ (RIR) に割り当てられている AS 番号の数の比に従って各地域から選出することで、インターネット環境のホスト分布に応じた世界規模のオーバーレイネットワークを想定する。表 1 に [15] より取得した各 RIR への AS 番号割り当て数と、評価で用いる各地域毎のノード数を示す。この表に従って構築したオーバーレイネットワークを本稿では PlanetLab ネットワークと呼ぶ。

4.2 日本のネットワーク

日本の商用ネットワークにおいては、13 の日本の商用 ISP に配置された 18 のノード間の、289 のパスに関して計測されたデータを用いる。このデータは ping コマンドで計測した遅延時間と traceroute コマンドで取得した IP レベルのパスおよびホップカウントからなる。利用可能帯域は計測されていないため、日本の商用ネットワークを想定した評価では利用可能帯域を経路選択指標とするオーバーレイルーティングの評価は行わない。本稿では、2009 年 3 月 22 日に計測されたデータを用いる。

日本の商用ネットワークに関しては全ノードが参加してオーバーレイネットワークを構築することを想定する。以下、本稿ではこのオーバーレイネットワークを単に日本のネットワークと呼ぶ。

5. 性能評価

本章では、3. 章で説明した提案手法を 4. 章で説明した PlanetLab ネットワーク及び日本のネットワークにおいて評価した結果を示す。

各ネットワーク上で動くことを想定するオーバーレイルーティングは遅延時間または利用可能帯域を経路選択の指標とする。具体的には、ノード i, j 間のオーバーレイリンクの遅延時間を δ_{ij} とした場合に、ノード i, j 間の直接パスおよびノード k を経由した場合の迂回パスの遅延時間をそれぞれ式 (13), (14) で定義する。

$$D_{ij} = \delta_{ij} \quad (13)$$

$$D_{ikj} = \delta_{ik} + \delta_{kj} \quad (14)$$

同様にノード i, j 間のオーバーレイリンクの利用可能帯域を ω_{ij} とした場合に、ノード i, j 間の直接パスおよびノード k を経由した場合の迂回パスの利用可能帯域をそれぞれ式 (15), (16) で定義する。

$$B_{ij} = \omega_{ij} \quad (15)$$

$$B_{ikj} = \min(\omega_{ik}, \omega_{kj}) \quad (16)$$

3.2 節で述べたように、遅延時間を経路選択の指標とするオーバーレイルーティングにおける性能向上率およびユーザ性能の劣化の制限はそれぞれ式 (1), (9) を、利用可能帯域を指標とする場合はそれぞれ式 (2), (10) を用いる。

5.1 推定したトランジット数を用いた制限付きオーバーレイルーティングの評価結果

制限付きオーバーレイルーティングの評価を行うにあたり、まず PlanetLab ネットワークおよび日本のネットワークに関して式 (12) に示したトランジット数推定のための重回帰式を導出する。始めに重回帰分析に用いるパラメータを決定するため、PlanetLab 環境において各ノード間の真のトランジット数と、取得容易なエンド間性能であるルータホップ数、遅延時間、利用可能帯域の相関関係を算出した。その結果、真のトランジット数と利用可能帯域の相関関係が他の性能指標に比べて著しく低いいため、計算の複雑性および推定の精度の観点から利用可能

表 2 各ネットワークにおける重回帰式の係数

| | b_y | b_r | b_d |
|------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| PlanetLab ネットワーク | 0.846 (0.20) | 0.145 (7.56×10^{-4}) | 0.00120 (1.08×10^{-6}) |
| 日本のネットワーク | -1.48 | 0.240 | -0.000889 |

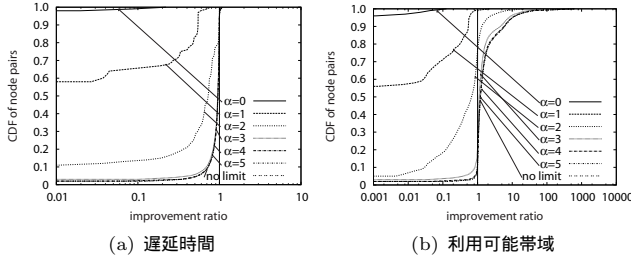


図 2 オーバレイルーティングによるトランジット数の増加を制限した場合の最大性能向上率の分布 (PlanetLab ネットワーク)

帯域を重回帰分析から除外した．日本のネットワーク環境では利用可能帯域のデータを取得していないため，PlanetLab 環境と同じくルータホップ数および遅延時間を重回帰分析に用いる．ノード i, j 間のルータホップ数，遅延時間をそれぞれ h_{ij}, δ_{ij} とすると式 (12) に示した重回帰式は次のようになる．

$$\mu_{ij}^e = b_y + b_r h_{ij} + b_d \delta_{ij} \quad (17)$$

ここで， b_y は切片を， b_r および b_d はそれぞれルータホップ数，遅延時間の係数を示す．重回帰分析の結果得られた各係数を表 2 に示す．PlanetLab ネットワークでは 4.1 節に示した手法で 20 回のノード選択を行い，それぞれ重回帰分析を行った上で，その平均値を示している．括弧内の値は分散を示す．平均値に対して分散の値が極めて小さいため，重回帰分析におけるノード選択の影響は小さいと考えられる．

図 2 は，PlanetLab ネットワークにおいてオーバレイルーティングによって増加するトランジット数の上限を制限した場合の最大性能向上率 (式 (7)) の分布である． α は式 (6) におけるパラメータで，トランジット数の増加の上限値を表す．図 2(a) および図 2(b) はそれぞれ遅延時間，利用可能帯域を経路選択の指標とした場合の結果を示す．ここで，図 2(a) から，遅延時間を指標としたオーバレイルーティングではほぼ性能向上が得られないことがわかる．また，図 2 から，遅延時間，利用可能帯域のいずれを経路選択指標とした場合でも， α が小さい場合には最大性能向上率が 0 のノードペアが多数存在することがわかる．これは式 (6) の制限を満たすパスが見つからないためである．一方で， α の値が大きくなるにつれて，トランジット数の制限を行わない場合の性能に近づくことがわかる． $\alpha = 3$ を越えると制限を行わない場合の性能に大きく近づき， $\alpha = 4$ でほぼ等しくなる．この結果は [7] で示した PlanetLab の全てのノードでオーバレイネットワークを構築した場合を想定した評価結果とほぼ等しい．

図 3 は，日本のネットワークにおける図 2(a) と同様の結果を示している．図 3 と図 2(a) を比較すると，傾向はほぼ等しいことがわかる．ただし，日本のネットワークでは $\alpha = 1$ 以上で制限なしの場合とほぼ同等の性能を得られている．

図 4 は，PlanetLab ネットワークにおいてオーバレイルーティングによって増加するトランジット数の上限を式 (6) によって制限した場合に，最大性能向上率と削減できるトランジット数の関係を示している．なお，経路選択指標には利用可能帯域を用い，削減できるトランジット数は真のトランジット数を用いて計算している．それぞれの線は各 α に関して，グラフ上の点に対応した値を持つノードペアの数が，等しく含まれる点を結んでおり，外側から 50, 100, 150, 200 のノードペアが含まれる点を結んでいる．また，併せて各 α における最頻値をプロットしている．図 4 から， $\alpha = 2$ のときに最も多くのトランジット数が削減できているが，最大性能向上率が 1 より低い

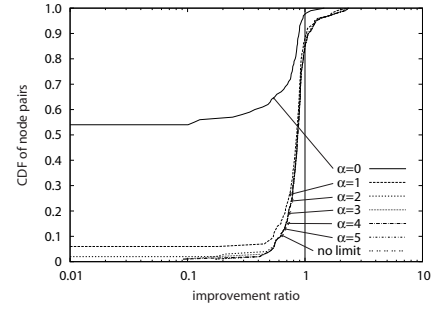


図 3 オーバレイルーティングによるトランジット数の増加を制限した場合の最大性能向上率の分布 (日本のネットワーク)

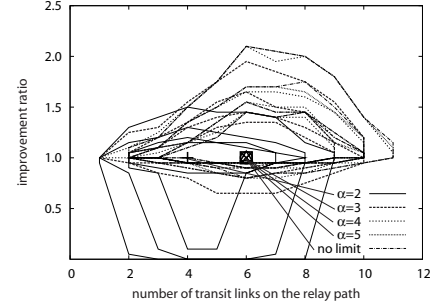


図 4 オーバレイルーティングによるトランジット数の増加を制限した場合に削減できるトランジット数と最大性能向上率の関係 (PlanetLab ネットワーク)

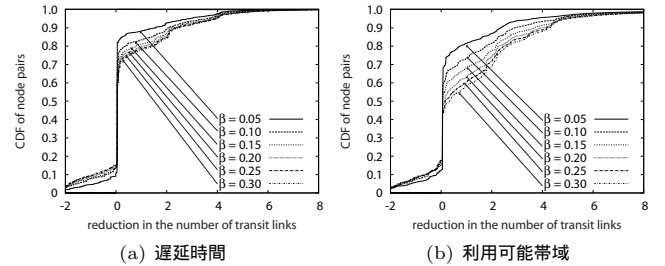


図 5 トランジット数削減による性能の劣化を制限した場合の削減できる最大トランジット数の分布 (PlanetLab ネットワーク)

ノードペアが多数存在していることがわかる．これはすなわち，オーバレイルーティングによって性能向上を得られないノードペアが多数存在するということである．対して $\alpha = 4$ を越えると，多数のノードペアで性能向上が得られる代わりにトランジット数の削減の効果はほぼ得られないことがわかる．以上より，トランジットコストの削減とオーバレイルーティングによる性能向上はトレードオフの関係にあり，双方の釣り合いを考慮すると，PlanetLab ネットワークにおいては $\alpha = 3$ が最も適当であるといえる．

図 5 は，PlanetLab ネットワークにおいてトランジット数の削減による，オーバレイルーティングによる性能向上の劣化の下限を制限した場合に，削減できる最大トランジット数 (式 (11)) の分布を示している． β は式 (9), (10) におけるパラメータで，オーバレイルーティングによる最良のユーザ性能からの劣化の下限を表す．図 5 から，最良のユーザ性能からの劣化を 5% 以内に制限した場合，遅延時間を指標とするオーバレイルーティングで 11% のノードペアで，利用可能帯域を指標とする場合で 18% のノードペアでトランジット数を 1 以上削減できていることがわかる．また，ユーザ性能の劣化をより大きく許容すると，より多くのトランジット数を削減できることがわかる．例えばユーザ性能の劣化を 30% まで許容すると，遅延時間を指標とする場合で 22%，利用可能帯域を指標とする場合で 42% のノードペアでトランジット数を 1 以上削減できる．

5.2 提案手法に影響を与えるネットワークの性質

表 2 に示したように，各ネットワークにおける重回帰式の係数には差が生じている．係数の大きさ注目すると，PlanetLab

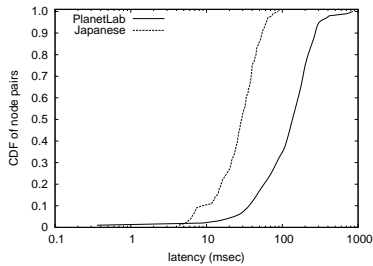


図 6 各ネットワークにおける遅延時間の分布

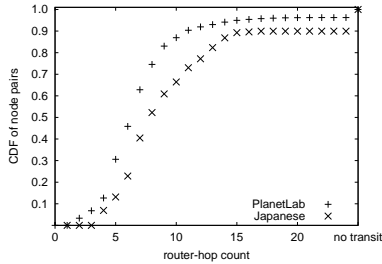


図 7 各ネットワークにおける最初にトランジットリンクを通過するルータホップ数の分布

ネットワークに比べて日本のネットワークではルータホップ数の比重が大きいことがわかる。また、PlanetLab ネットワークと日本のネットワークでは、切片の値の正負が異なり、PlanetLab ネットワークでは正、日本のネットワークでは負の値となっている。

これらの違いを生むネットワークの性質は図 6, 7 から読み取れる。図 6 は各ネットワークにおけるノードペア間のオーバーレイリンクの遅延時間の分布を示している。日本のネットワークでは PlanetLab ネットワークに比べて遅延時間が小さく、このことが日本のネットワークにおいて遅延時間によるトランジット数の推定を困難にしていると考えられる。逆にいうと、このことが日本のネットワークにおけるトランジット数の推定でルータホップ数に大きな比重が置かれる原因と考えられる。

図 7 は各ネットワークのノードペア間のオーバーレイリンクにおいて、最初にトランジットリンクを通過するルータホップ数の分布を示している。トランジットリンクを通過しないオーバーレイリンクはグラフの右端で計上している。図 7 において、PlanetLab ネットワークにおいては最初の 3 ホップで最初のトランジットリンクを通過するオーバーレイリンクは 6%、最初の 5 ホップでは 30% となっている。一方日本のネットワークでは、それぞれ 0%、13% となっている。これはすなわち PlanetLab ネットワークでは最初の数ホップでトランジットリンクを通過するオーバーレイリンクの割合が多いことを示しており、その結果重回帰式の切片が正の値になったと考えられる。一方日本のネットワークでは最初の数ホップではトランジットリンクを通過しない場合が多く、その結果重回帰式の切片が負の値になったと考えられる。

これらのネットワークの性質の違いは、PlanetLab と日本の商用ネットワークの違いからきていると思われる。具体的には PlanetLab は大学や企業のネットワークからなる学術研究用のネットワークであり、日本の商用ネットワークは日本の商用 ISP が提供するものである。提案手法ではこれらの環境の違いに適応した重回帰式を導出しているといえる。

6. まとめ

本稿では、オーバーレイルーティングに起因する ISP 間トランジットコストを削減する提案手法を、様々なネットワーク環境を想定して評価した。具体的には、インターネット環境のホスト分布に即したノード分布をもつように調整した PlanetLab ネットワークおよび日本の商用 ISP に配置されたノードによって構成される日本のネットワークの 2 つを想定し、評価を行った。

評価結果より、これらのネットワーク環境において、提案手法によってトランジット数を削減しつつ、オーバーレイルーティングによる性能向上が得られることを示した。また、PlanetLab ネットワークにおいてトランジット数の削減とオーバーレイルーティングによる性能向上はトレードオフの関係にあることを示し、釣り合いの観点から、オーバーレイルーティングによるトランジット数の増加の上限を 3 に設定するのが最も適当であるという結論を得た。さらに、提案手法に影響を与えるネットワーク環境の性質を議論した上で、提案手法によるトランジット数の推定が各ネットワーク環境に適応して行っていることを確認した。

今後の課題として、[16] などの ISP と協調してトランジットコストを削減する手法を、本稿で述べた提案手法に取り入れた手法を考案する予定である。

文 献

- [1] S. Banerjee, C. Kommareddy, K. Kar, B. Bhattacharjee, and S. Khuller, "Construction of an efficient overlay multicast infrastructure for real-time applications," in *Proceedings of INFOCOM 2003*, Apr. 2003.
- [2] D. G. Andersen, A. C. Snoeren, and H. Balakrishnan, "Best-path vs. multi-path overlay routing," in *Proceedings of IMC 2003*, Oct. 2003.
- [3] C. L. T. Man, G. Hasegawa, and M. Murata, "Monitoring overlay path bandwidth using an inline measurement technique," *IARIA International Journal on Advances in Systems and Measurements*, vol. 1, no. 1, pp. 50–60, 2008.
- [4] Y. Zhu, C. Dovrolis, and M. Ammar, "Dynamic overlay routing based on available bandwidth estimation: A simulation study," *Computer Networks Journal*, vol. 50, pp. 739–876, Apr. 2006.
- [5] P. Rodriguez, S.-M. Tan, and C. Gkantsidis, "On the feasibility of commercial, legal P2P content distribution," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, no. 1, pp. 75–78, 2006.
- [6] S. Seetharaman and M. Ammar, "Characterizing and mitigating inter-domain policy violations in overlay routes," in *Proceedings of ICNP 2006*, pp. 259–268, Nov. 2006.
- [7] K. Matsuda, G. Hasegawa, and M. Murata, "Decreasing ISP transit cost in overlay routing based on multiple regression analysis," in *Proceedings of ICOIN 2010*, Jan. 2010.
- [8] PlanetLab Web Page. available at <http://www.planet-lab.org/>.
- [9] G. Hasegawa, Y. Hiraoka, and M. Murata, "Effectiveness of overlay routing based on delay and bandwidth information," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E92-B, pp. 1222–1232, Apr. 2009.
- [10] X. Dimitropoulos, D. Krioukov, M. Fomenkov, B. Huffaker, Y. Hyun, k. claffy, and G. Riley, "As relationships: Inference and validation," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, no. 1, pp. 29–40, 2007.
- [11] Hewlett-Packard Laboratories, "Scalable Sensing Service." available at <http://networking.hp.com/s-cube/>.
- [12] University of Oregon, "Route Views Project." available at <http://www.routeviews.org/>.
- [13] University of California, "CAIDA." available at <http://www.caida.org/home/>.
- [14] Kazuhito Matsuda, "A study on reduction of inter-isp transit cost caused by overlay routing," Master's thesis, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Feb. 2010.
- [15] IANA, "IANA AS Numbers assignment data page." available at <http://www.iana.org/assignments/as-numbers/>.
- [16] H. Xie, Y. R. Yang, A. Krishnamurthy, Y. G. Liu, and A. Silberschatz, "P4P: Provider portal for applications," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 4, pp. 351–362, 2008.