

確率的手法に基づくオーバレイネットワーク計測の競合軽減

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 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

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし IP ネットワーク上に構築されるアプリケーション層オーバレイネットワークの性能を向上させるためには、オーバレイノード間のネットワーク経路の性能をリアルタイム、かつ正確に計測することが極めて重要である。しかし、複数のオーバレイパスの経路が同じルータおよびルータ間リンクを通過する経路の共有が発生している場合、それらのオーバレイパスの計測を同時に行うと、共有しているリンクを計測トラヒックが同時に通過し、ネットワーク負荷が増大するとともに、計測精度が大幅に低下する。本稿では、自律分散的な手法によって計測競合を確率的に回避する計測タイミングの決定手法を提案する。複数のネットワークトポロジを用いた性能評価により、提案手法が計測失敗回数を抑えつつ、特にルータレベルホップ数の小さなオーバレイパスの成功回数を増加させることができることを示す。

キーワード オーバレイネットワーク、ネットワーク計測、経路、確率的手法

Decreasing measurement conflict on overlay networks based on randomized algorithms

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In this report, we propose a randomized algorithm to decrease measurement conflicts in overlay network. The proposed algorithm is based on the number of overlay paths which share some router-level links in their route and determine the measurement timing in a random fashion. By simulation experiments with some network topologies, we present that the proposed mechanism can increase the successful measurements while decreasing measurement conflicts, regardless of the network topologies and overlay node density.

Key words Overlay networks, network measurement, route, probabilistic method

1. はじめに

インターネットを利用したアプリケーションの提供形態として、オーバレイネットワークを用いるものが近年増加している。オーバレイネットワークは、下位層ネットワーク（アンダーレイネットワーク）である IP ネットワーク上に独自の論理ネットワークを構築し、サービス提供を行う。例えば P2P 技術を用いた Skype [1] などのサービスや、グリッド、IP-VPN サービスなどが挙げられる。これらのアプリケーションは、ある特定のサービスを前提として論理ネットワークを構築し、それぞれのアプリケーションのポリシーにしたがってトラヒックの制御

を行う。

従来のオーバレイネットワークにおいては、オーバレイネットワークを構築するオーバレイノードはサーバやユーザクライアントなどのエンド端末上のプログラムによって行われることが多い。この場合、オーバレイネットワーク上の通信は全てエンドホスト間通信となる。そのため、エンドホスト間通信が通過するネットワーク内でのトラヒック制御やルーティングを行うことができず、近年研究が進んでいるオーバレイルーティング技術 [2] などの効果が限定的になることが考えられる。それに対し、ネットワーク内のルータ上に直接オーバレイノードを設置してオーバレイネットワークを構築することで、ユーザ

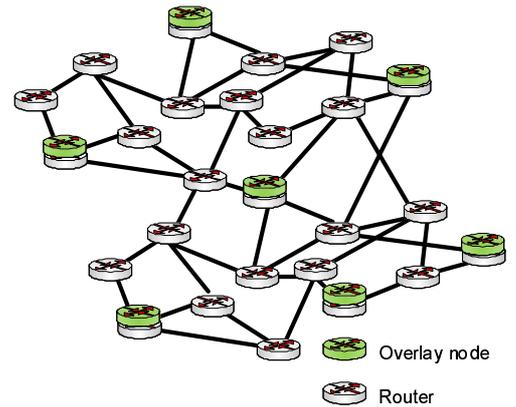
に対してより効率的なオーバーレイネットワークを提供することが考えられる。本研究ではそのようなオーバーレイネットワークを主に対象とする。

オーバーレイネットワークはアンダーレイネットワークの上に論理的に構築されるネットワークであるため、オーバーレイノード間の経路がどのようなネットワークであるかは未知であることが一般的である。そのため、オーバーレイネットワークの性能を向上し、ユーザの体感性能を改善するためには、アンダーレイネットワークの資源や品質(物理的キャパシティ、利用可能帯域、伝播遅延時間、パケット廃棄率など)に関する情報を正確に、かつリアルタイムに得ることが重要である。従来、オーバーレイネットワークが必要とする情報をネットワーク計測によって得る手法が数多く提案されているが、それらのほとんどは小規模なオーバーレイネットワーク、すなわち、オーバーレイノード数やオーバーレイリンク数が高々数十程度のものを前提としており、計測が必要なオーバーレイノード間の計測をフルメッシュに行うものである。

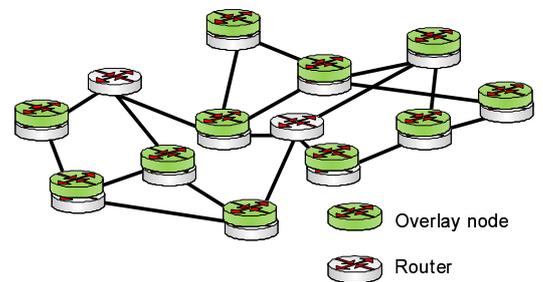
これらの手法は、小規模なオーバーレイネットワークにおいては必要な情報を短時間で得ることができるために非常に有効であるが、大規模なオーバーレイネットワークにおいては計測オーバーヘッドや計測精度の低下が問題となる。例えば Resilient Overlay Networks (RON) [2] においては、参加するオーバーレイネットワークノードがフルメッシュに計測および情報交換を行い、オーバーレイネットワークにおいて経路制御を行うことが提案されている。しかし、参加可能なオーバーレイノード数が 50 程度に制限されることが指摘されている [3]。そのため、オーバーレイネットワークにおけるネットワーク計測頻度を削減する手法が求められる。

また、オーバーレイネットワークはさまざまな規模や種類のネットワーク上に構築されることが想定される。ここで、オーバーレイノードは IP ルータ上に設置され、オーバーレイネットワークが構築されると仮定すると、IP ルータ数に対するオーバーレイノード数の割合(以下、オーバーレイノード密度と呼ぶ)によって、求められる計測手法や計測頻度は異なることが考えられる。例えば、オーバーレイノード密度が高い場合、複数のオーバーレイノード間経路(以下、オーバーレイ経路と呼ぶ)が IP ネットワーク上のパス(以下、IP パスと呼ぶ)を共有する可能性が高くなる。それらの経路においてネットワーク計測を同時に行うと、共有している経路における計測のためのトラフィック負荷が大きくなるとともに、計測が競合することによって、計測精度が低下する。しかし、既存の研究においては、オーバーレイノード密度に応じた計測技術に関してはほとんど着目されていない。

我々は過去の研究において、オーバーレイネットワークのオーバーレイノード密度に着目し、密度に対してスケーラブルなネットワーク計測手法の検討を行ってきた [4-6]。これらの研究においては、複数のオーバーレイ経路が IP パスを共有する状態を分類し、それぞれの共有状態に対して求められるネットワーク計測手法について検討した。次に、IP パスの共有を知ることができるオーバーレイ経路の計測に関して、計測精度を低下させることなく、オーバーレイネットワーク全体での計測回数を削減する手法を提案した。さらに、IP パスの共有を知ることができないオーバーレイ経路の計測に関して、IP パスを共有してい



(a) 密度が小さい場合



(b) 密度が大きい場合

図 1 オーレイノード密度

るオーバーレイ経路数を推定することによって計測周期を制御する手法を適用するために必要となる、IP パスを共有しているオーバーレイ経路数の評価を、様々なネットワークトポロジに対して行う。その結果、IP パスを共有しているオーバーレイ経路数は、オーバーレイノード密度に大きく依存することを示した。

しかし、上記研究においては、一方のオーバーレイパスが他方のオーバーレイパスに完全に含まれる場合においてのみ有効であり、個々のオーバーレイノードが行う計測のみでは検出できない経路共有には適用することができない。そこで本稿では、そのような経路共有が発生する状況において、各オーバーレイパスの計測タイミングをランダムに設定することによって、計測競合を確率的に回避する手法を提案する。

以下、2. 章において、複数のオーバーレイ経路が IP パスを共有する状態を分類し、それぞれの状態において求められるネットワーク計測手法についてまとめる。3. 章では計測競合を確率的に回避する手法を提案し、その評価を行う。最後に 4. 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. オーレイネットワーク計測における問題点

2.1 オーレイノード密度と計測の関係

図 1 に、ネットワーク内に存在する IP ルータ数に対するオーバーレイノード数の割合(オーバーレイノード密度)が低い場合(図 1(a))、および高い場合(図 1(b))のネットワークトポロジの例を示す。

ここで、各オーバーレイノード間の IP ネットワーク経路に着目する。オーバーレイノード密度が低い場合 (図 1(a)) には、オーバーレイ経路のルータレベルのホップ数が比較的大きいため、オーバーレイ経路に多くの IP ルータ、およびルータ間のリンクが含まれる。また、オーバーレイ経路に、他のオーバーレイノードが含まれる確率は比較的小さい。このような環境におけるネットワーク計測には、下記のような特徴があると考えられる。

- オーバーレイ経路のルータレベルホップ数が大きいため、計測精度が比較的低い

- オーバーレイ経路に、他のオーバーレイノードが含まれることは少ないため、複数のオーバーレイ経路が同じルータやリンクから構成される IP パスを共有することはあまり発生しない

このような環境においては、複数オーバーレイ経路の計測を同時に実行させても、計測が競合することが少ないため、計測精度を低下させることなく、同時に複数の計測を行うことが可能となる。また、一度の計測に用いる時間を長く確保することが可能となるため、計測精度を補うことができる。

一方、オーバーレイノード密度が高い場合 (図 1(b)) には、オーバーレイ経路に含まれる IP ルータ、およびリンク数が少なくなる。一方、オーバーレイ経路上に、他のオーバーレイノードを含む確率が高くなる。このような環境におけるネットワーク計測には、下記のような特徴がある。

- オーバーレイ経路のルータレベルホップ数が小さいため、計測精度が比較的高い

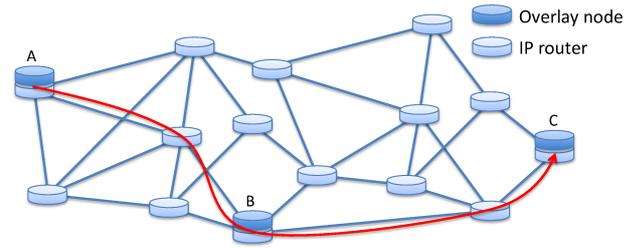
- オーバーレイ経路に、他のオーバーレイノードが含まれることが多い場合、複数のオーバーレイ経路が同じ IP パスを共有する頻度が高くなる

このような環境においては、複数のオーバーレイ経路の計測を同時に行うことで、共有された IP パス上を流れる計測トラフィックが増大する。このことは、計測の精度を損うことにもつながる。そのため、IP パスの共有によって発生する計測の競合を考慮したネットワーク計測手法が求められる。

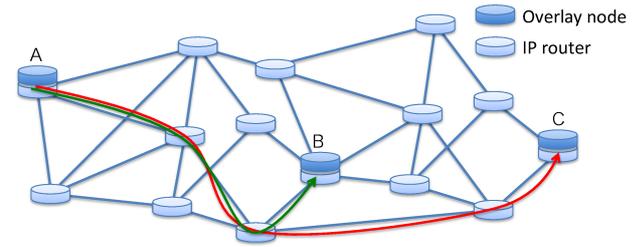
上記の問題は、オーバーレイノード間のルータレベル経路の情報を集約し、IP パスの共有状況を知ることによって解決することが考えられる。そのためには、各オーバーレイノードで収集した経路に関する情報をオーバーレイノード間で交換することによって、経路情報を共有する必要がある。しかし、一般に、オーバーレイノード間での情報交換が必要な手法においては、オーバーレイノード数が増加すると、その二乗の速度で情報交換のために必要となるトラフィック量が増大する。そのため、オーバーレイノード数の増加に対してスケラブルであるとはいえない。そこで提案手法においては、オーバーレイノード間で経路情報の交換を必要としない手法を検討する。

2.2 IP パスの共有状態に応じた計測

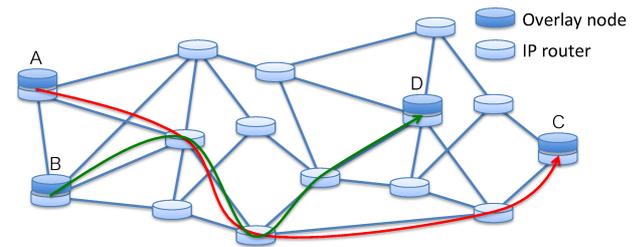
図 2 は、2 本のオーバーレイ経路が IP パスを共有、すなわち、オーバーレイ経路の一部が同じルータおよびルータ間リンクを通過している状態を分類したものである。それぞれ、オーバーレイ経路の両端となるオーバーレイノードの両方あるいは片方が IP パスの共有を認識している場合、および IP パスの共有を認識できない場合に相当する。なお本稿においては、各オーバーレイノードは他のオーバーレイノードのアドレスを知っており、



(a) 完全共有



(b) 片側共有



(c) 部分共有

図 2 オーバーレイパスの経路共有

traceroute コマンドによって各オーバーレイノードまでのルータレベル経路を得ることができると仮定する。

2.2.1 完全共有

図 2(a) は、完全共有、すなわち、オーバーレイ経路の両端のオーバーレイノードが IP パスの共有を認識できる場合の例を示している。ここでは、オーバーレイノード A、C 間のオーバーレイ経路上に、オーバーレイノード B が存在する。そのため、オーバーレイノード A は、経路 AC と経路 AB、および経路 AC と経路 BC が IP パスを共有しており、これらの経路の計測を同時に行うことで、計測が競合することを認識することができる。

この場合においては、オーバーレイ経路 AC の計測は行わずに、経路 AB および経路 BC の計測結果を基に、経路 AC の計測結果を推定することによって、計測精度を低下させることなく、計測の競合を回避することができる [4-6]。

2.2.2 片側共有

図 2(b) は、片側共有、すなわち、オーバーレイ経路の片方のオーバーレイノードが、IP パスの共有を認識できる場合の例を示している。具体的には、オーバーレイノード A が、オーバーレイノード B および C までの経路を知ることによって、経路 AB

と経路 AC が途中 (ルータ 3) までの IP パスを共有していることを認識することができる。一方、本稿における検討では、オーバーレイノード間の情報交換は行わないと仮定しているため、オーバーレイノード B および C は、オーバーレイノード A までの経路が競合していることを知ることはできない。

この場合においては、オーバーレイノード A が、経路 AB および経路 AC の計測を逐次的に行うことで、計測の競合を避けることができる。

2.2.3 部分共有

図 2(c) は、部分共有、すなわち、オーバーレイノードが IP パスの共有を認識できない場合を示している。具体的には、オーバーレイ経路 AC およびオーバーレイ経路 BD は、ルータ 1、2 間の IP パスを共有しているが、オーバーレイノード A および B は、お互いの経路情報を交換しない限り、そのことを知ることはできない。

この場合においては、完全共有 (図 2(a)) および片側共有 (図 2(b)) の場合と異なり、オーバーレイノード間で経路情報を交換しない限り計測の競合を完全に避けることはできない。しかし、IP パスを共有しているオーバーレイ経路数を知ることができれば、その数に応じて計測周期を設定し、ランダムなタイミングで計測を行うことよって、確率的に計測の競合を回避することができると考えられる。3. 章において、具体的な手法を提案する。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

提案手法は、図 2(c) に示す部分共有が発生している経路を同時に計測する頻度を減少させるために、各オーバーレイノードがランダムなタイミングで経路の計測を行うことを提案する。すなわち、各計測スロットにおいて、オーバーレイノードが計測対象の経路の計測を実行するか否かを、乱数を用いて決定する。提案手法においては、計測対象となるオーバーレイパスと経路を共有している他のオーバーレイパスの本数に応じて、計測頻度を決定する。具体的には、あるオーバーレイパスと経路を共有している他のオーバーレイパスの本数が $N - 1$ である場合には、その計測頻度を $1/N$ とする。

一般に、1 つの資源を競合している N 個のユーザがランダムに資源へのアクセスを行う場合、その確率を $1/N$ にすることで、ただ 1 人のユーザが他と競合することなく資源へ正しくアクセスすることができる確率は最大化され、 N が大きくなるとその確率は $1/e$ に漸近することが知られている [7]。この性質をオーバーレイパスの計測競合に適用する場合、 N 本のオーバーレイパスが同じルータ間リンクを共有しているとは限らないため、 $1/N$ に設定することが確率を最大化するとは限らない。そのため、次節においては、倍率 T というパラメータを導入し、確率を変化させた場合の性能評価を行う。

3.2 性能評価結果

本節では、前節で提案した確率的競合回避手法のシミュレーションによる性能評価を行う。評価のためのネットワークトポロジはルータレベルのトポロジとし、BA モデルに基いて生成した 171 ノード、171 リンクのトポロジ、および AT&T のルー

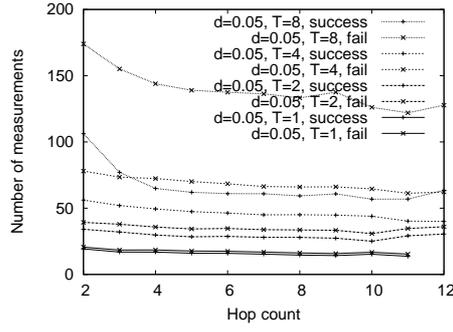
タレベルトポロジ (523 ノード、1304 リンク) を用いる。全ルータのうち、指定した割合 d ($0 \leq d \leq 1$) のルータがオーバーレイノードとなり、オーバーレイノード間の経路を計測する。なお、事前準備として、[4-6] において提案した、完全共有の場合に計測パス数を削減する手法を適用し、計測が必要なパス数を限定した後、提案手法を適用する。比較のために、各オーバーレイパスを等しい確率で計測する手法 (以降、比較手法と呼ぶ) を用いた場合の結果を合わせて示す。それぞれの手法においては、各タイムスロット毎にオーバーレイパスの計測を実行するか否かを決定する。その際、経路を共有している他のオーバーレイパスと同時に計測を行った場合には計測失敗とし、計測競合が発生しなかった場合には計測成功とする。シミュレーションは 10,000 スロット実行し、計測成功および計測失敗回数を評価する。

なお、本稿における提案方式の評価においては、オーバーレイノード間で情報交換を行うことを前提とし、各オーバーレイパスが経路を共有している他のオーバーレイパス数を知ることができると仮定している。この制約を解消し、オーバーレイノード間の情報交換をすることなく計測周期を適切に設定する手法については今後の課題としたい。

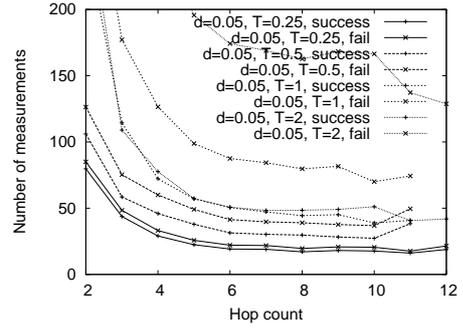
図 3 に、BA トポロジを用いた場合における、比較手法および提案手法の計測成功回数および計測失敗回数を示す。図中に示すパラメータ T は、計測頻度の倍率を調整するパラメータである。比較手法においては、平均的に各タイムスロットで 1 本のオーバーレイパスが計測されるように設定した計測確率を $T = 1$ としている。提案手法においては、前節で提案した計測頻度で計測されるように設定した計測確率を $T = 1$ としている。また、図の横軸は計測するオーバーレイパスのルータレベルのホップ数を表し、オーバーレイノード密度 d を 0.05、0.1、0.2 と設定した場合の結果を示している。

図より、比較手法においては、 T を適切に設定することができれば、提案手法と同程度の計測成功回数を得ることができるが、その性能は T の設定に大きく影響を受けることがわかる。一方、提案手法においては、 $T = 1$ とすることで、オーバーレイノード密度に関係なく計測成功回数を大きく、かつ計測失敗回数を小さくすることができる。これは、前節において提案した、経路共有数に応じた計測頻度設定手法が効率的に動作していることを示している。また、提案手法においては、ルータレベルホップ数の小さなオーバーレイパスほど高い頻度で計測に成功していることがわかる。これは、ホップ数の小さなオーバーレイパスが部分共有の状態にある他のオーバーレイパス数が少ない傾向を持つため、提案手法によって計測頻度を高く設定されたためである。このように、提案手法は各オーバーレイパスの経路共有数に応じて計測頻度を設定することができる。

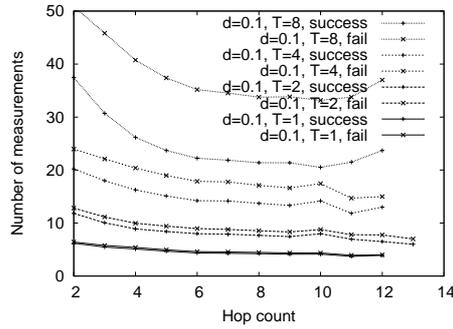
図 4 に、AT&T トポロジを用いた場合における性能評価結果を示す。図より、比較手法においては、 T を大きくすることによって計測成功回数が増加するものの、計測失敗回数も同時に増加していることがわかる。また、図 3 と比較すると、適用するネットワークによって T を慎重に設定する必要があることがわかる。一方、提案手法においては、適用するネットワークやオーバーレイノード密度に関わらず、 $T = 1$ と設定することによって良好な結果を得ることができる。これは、提案方式がパラメータ設定を行うことなく広い適用範囲を持つことを表して



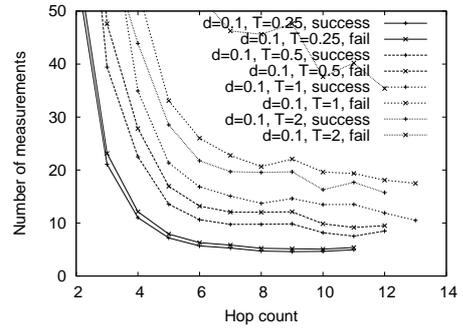
(a) BA トポロジ, $d=0.05$, 比較手法



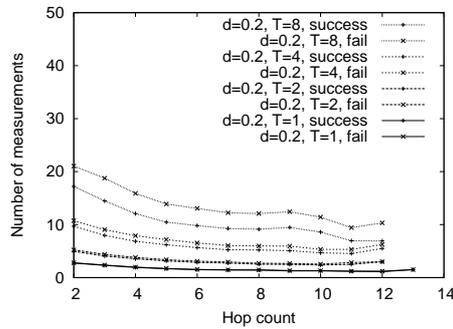
(b) BA トポロジ, $d=0.05$, 提案手法



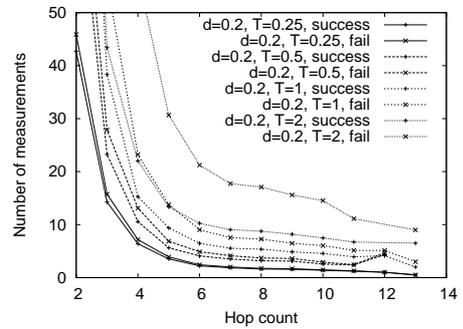
(c) BA トポロジ, $d=0.1$, 比較手法



(d) BA トポロジ, $d=0.1$, 提案手法



(e) BA トポロジ, $d=0.2$, 比較手法



(f) BA トポロジ, $d=0.2$, 提案手法

図3 計測成功回数 (BA トポロジ)

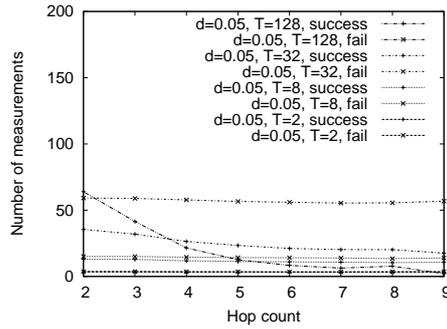
いる。

提案手法は、無線ネットワークにおける多重アクセス方式の1つであるALOHA方式を応用したものである。ただし、無線ネットワークにおける通信の衝突とは異なり、計測競合が発生した場合においても、競合が発生したことを知ることはできないため、ALOHA方式が持つバックオフアルゴリズム等は適用できない。そのため、計測頻度を決定するパラメータ T は、計測競合が頻繁に発生しない範囲で設定するのが望ましいと考えられる。この観点からも、比較手法は T の設定が困難であり、一方で提案方式は $T=1$ とすることで計測失敗回数を抑えつつ計測成功回数を比較手法よりも大きくすることができるため、提案方式は有効であると言える。

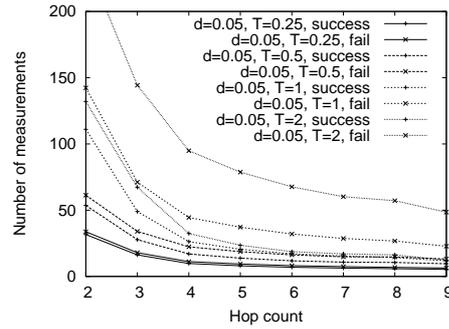
4. おわりに

本稿においては、経路を部分的に共有しており、各オーバーレイノードによる経路計測では発見することのできず計測競合を引き起こすオーバーレイパスに対して、計測周期を設定し、ランダムなタイミングで計測を行う手法を提案した。提案手法は、経路共有の状態に応じて計測周期を設定するため、適用するネットワーク規模やオーバーレイノード密度にかかわらず、固定のパラメータ設定で高い性能を発揮することができる。

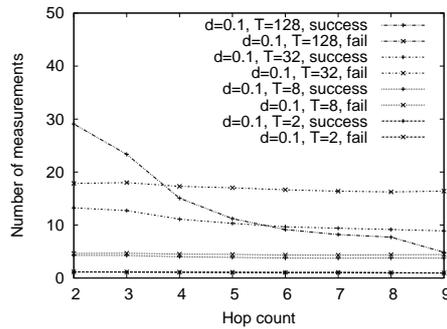
今後の課題として、本稿における性能評価においては既知と仮定した、各オーバーレイパスが経路共有状態にある他のオーバーレイパス数を推定する手法を提案することが挙げられる。オー



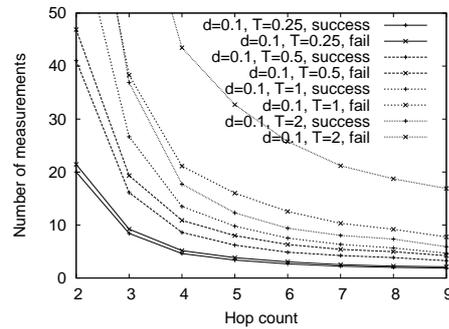
(a) AT&T トポロジ, $d=0.05$, 比較手法



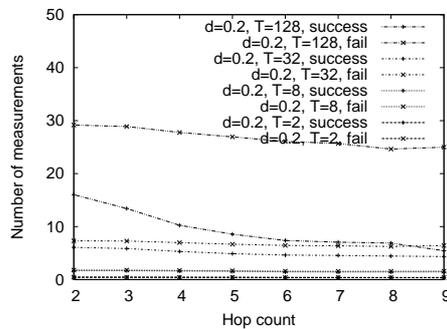
(b) AT&T トポロジ, $d=0.05$, 提案手法



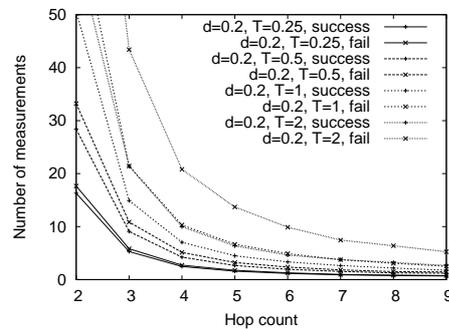
(c) AT&T トポロジ, $d=0.1$, 比較手法



(d) AT&T トポロジ, $d=0.1$, 提案手法



(e) AT&T トポロジ, $d=0.2$, 比較手法



(f) AT&T トポロジ, $d=0.2$, 提案手法

図 4 計測成功回数 (AT&T トポロジ)

バレイノード間の情報交換を行うことなく共有数を推定することによって、オーバーレイノード数に対してスケーラブルな手法を提案したい。

謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構からの委託研究「ダイナミックネットワーク技術の研究開発 課題力」によっている。ここに記して謝意を示す。

文 献

- [1] Skype Web page. available at <http://www.skype.com/>.
- [2] D. G. Andersen, H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, and R. Morris, "Resilient overlay networks," in *Proceedings of 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*,

Oct. 2001.

- [3] A. Nakao, L. Peterson, and A. Bavier, "Scalable routing overlay networks," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 40, pp. 49–61, Jan. 2006.
- [4] 長谷川剛, 村田正幸, "オーバーレイネットワークの密度にスケーラブルなネットワーク計測手法," *電子情報通信学会 技術研究報告 (IN2008-107)*, pp. 127–132, Dec. 2008.
- [5] 森弘樹, 長谷川剛, 村田正幸, "オーバーレイネットワークにおける経路重複を利用した計測手法," *電子情報通信学会技術研究報告 (ICM2008-67)*, vol. 108, pp. 53–58, Mar. 2009.
- [6] G. Hasegawa and M. Murata, "Scalable and density-aware measurement strategies for overlay networks," in *Proceedings of ICIMP 2009*, May 2009.
- [7] 中野博隆, 長手航, 平野裕介, 笹部昌弘, "応答確率制御法による大量電子タグの高速読出し," *電子情報通信学会論文誌*, vol. J90-C, pp. 491–501, June 2007.