

オーバーレイネットワークの密度にスケラブルなネットワーク計測手法

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 オーレイネットワークにおけるオーバーレイノード間のネットワーク計測は、オーバーレイノード密度、すなわち、ネットワークノード数に対するオーバーレイノード数の割合によってその特性および要求条件が変化する。本稿においては、オーバーレイノード密度によらず効率的に、高い精度を維持し、かつ少ない負荷でのネットワーク計測が可能となる、オーバーレイネットワークにおける計測回数削減手法を提案する。提案手法はオーバーレイパス同士の競合状態に応じて計測パスおよび計測周期を選択する。数値評価により、従来手法に比べて必要な計測数を最大で約 1/50 に削減することができることを示す。また、計測の競合を完全に避けられない場合において重要となる、オーバーレイノード間の経路がアンダーレイネットワークを共有している頻度を評価し、その頻度がオーバーレイノード密度に大きく依存することを示す。

キーワード オーレイネットワーク、ネットワーク計測、ノード密度、計測競合

Scalable and density-aware measurement strategies for overlay networks

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 overlay networks, when we consider the effective and accurate measurement of the underlay IP network between overlay nodes, it is important to take care the density of the overlay nodes to the number of routers in the network. In this report, we propose the density-aware measurement strategies for overlay networks. Our method can reduce the number of measurements required for obtaining the full-mesh measurement results by 1/50-1/100. We also confirm that the overlay node density highly affects the path overlap frequency, which is important factor when the overlay node can recognize the path overlapping in the network.

Key words Overlay networks, network measurement, node density, measurement overlap

1. はじめに

近年のインターネットの発展、ユーザ数の増加にともない、さまざまなサービスやアプリケーションが登場している。それらの中には、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する、（サービス）オーバーレイネットワークと呼ばれるものがある。例えば P2P ネットワーク、Grid ネットワーク、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フィックの制御を行う。

従来のオーバーレイネットワークにおいては、オーバーレイネットワークを構築するオーバー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、オーバー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フィ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ーレイルーティング技術 [1] 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ーレイノードを設置してオーバー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) [1] 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 [2]。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。

そこで本稿では、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う。まず、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する。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する。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す。

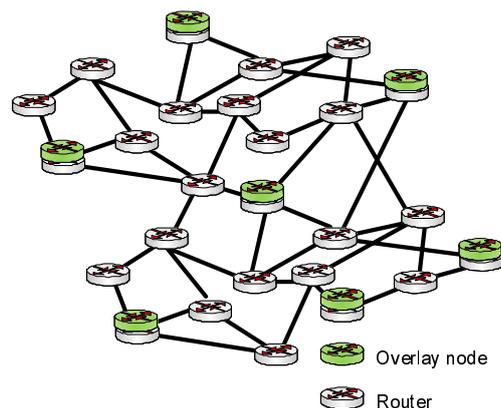
以下、2. 章において、複数のオーバーレイ経路が IP パスを共有する状態を分類し、それぞれの状態において求められるネットワーク計測手法についてまとめる。3. 章では計測回数を削減する手法を提案し、その評価を行う。次に 4. 章において、IP パスを共有しているオーバーレイ経路数の評価を行う。最後に 5. 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. オーレイネットワーク計測における問題点

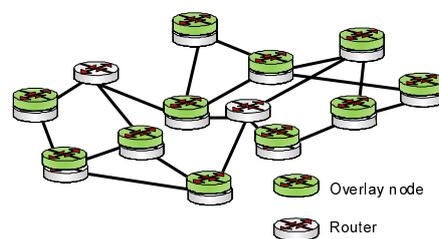
2.1 オーレイノード密度と計測の関係

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



(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

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。

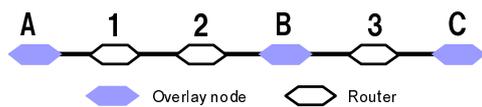
- オーレイ経路のルータレベルホップ数が大きいため、計測精度が比較的低い
 - オーレイ経路に、他のオーバーレイノードが含まれることは少ないため、複数のオーバーレイ経路が同じルータやリンクから構成される IP パスを共有することはあまり発生しない
- このような環境においては、複数オーバーレイ経路の計測を同時に行っても、計測が競合することが少ないため、計測精度を低下させることなく、同時に複数の計測を行うことが可能となる。また、一度の計測に用いる時間を長く確保することが可能となるため、計測精度を補うことができる。

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。

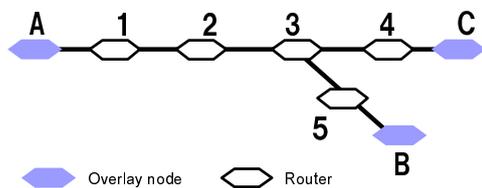
- オーレイ経路のルータレベルホップ数が小さいため、計測精度が比較的高い
- オーレイ経路に、他のオーバーレイノードが含まれることが多いため、複数のオーバーレイ経路が同じ IP パスを共有する頻度が高くなる

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負荷が増大する。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。

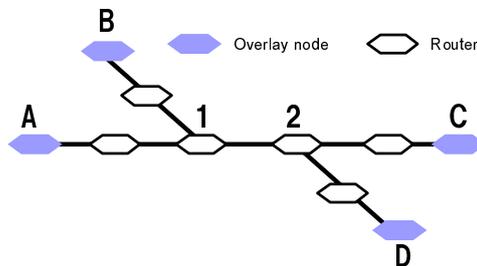
上記の問題は、オーバーレイノード間のルータレベル経路の情報を集約し、IP パスの共有状況を知ることによって解決することが考えられる。そのためには、各オーバーレイノードで収集した経路



(a) 両端のオーバーレイノードが共有を認識できる場合



(b) 片方のオーバーレイノードが共有を認識できる場合



(c) オーバーレイノードが共有を認識できない場合

図 2 オーバーレイ経路による IP パスの共有状態の分類

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ー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、tracert 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 両端のオーバーレイノードが共有を認識できる場合

図 2(a) は、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と考えられる。3. 章において、この方法によって計測回数が大幅に削減できることを明らかにする。

2.2.2 片方のオーバーレイノードが共有を認識できる場合

図 2(b) は、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 オーバーレイノードが共有を認識できない場合

図 2(c) は、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、図 2(a) および図 2(b) の場合と異なり、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によって、確率的に計測の競合を回避することができる。4. 章において、IP パスを共有するオーバーレイ経路数が、ネットワークポロジ、ルータレベルホップ数、あるいはオーバーレイノード密度によってどのように変化するかを明らかにする。

3. 計測回数の削減手法

本章では、2.2.1 節において示した、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について、計測の競合を回避するとともに計測回数を削減する手法を提案し、その有効性を評価する。

3.1 提案手法

提案方式は、経路の競合を完全に認識できる場合に、ホップ数の大きな経路を、ホップ数の小さな複数の経路に分割し、分割された経路の計測結果を用いて、経路全体の計測結果を推定する。具体的な例を図 2(a) を用いて示す。ここでは、オーバーレイ経路 AC の計測を行わずに、オーバーレイ経路 AB およびオーバーレイ経路 BC の計測結果を用いて、オーバーレイ経路 AC の計測結果を下記のように推定する。

物理的キャパシティおよび利用可能帯域 経路 AB および経路 BC の計測結果の最小値

伝播遅延時間 経路 AB および経路 BC の計測結果の和

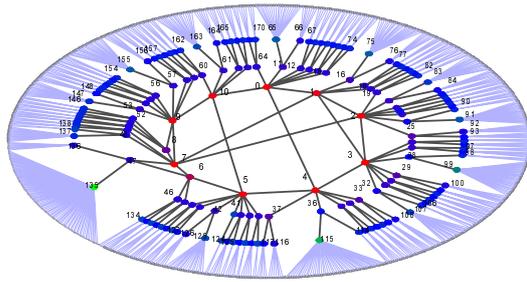
パケット廃棄率 $1 - (1 - \text{経路 AB の計測結果}) \cdot (1 - \text{経路 BC の計測結果})$

本手法により、通常では 3 本の経路についての計測が必要であるところを、2 本の経路の計測によって、全ての経路についての計測結果を得ることができる。さらに、計測の競合を完全に回避することができるため、計測精度の向上が期待できる。

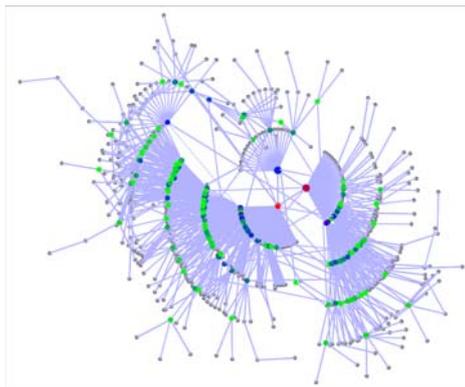
3.2 評価結果

本節では、前節の提案手法によって、オーバーレイネットワーク全体で必要となる計測回数がどのように削減されるかを評価する。ルータレベルのネットワークポロジとして、以下の 3 種類を用いる。

Abilene-inspired トポロジ [3] において示された、Abilene ネットワークに似た構造を持つネットワークポロジであり、エッジルータ、ミドルルータ、コアルータから構成される。ノー



(a) Abilene-inspired トポロジ



(b) BA トポロジ ([3] より抜粋)

図 3 ネットワークトポロジ

ド数は 171、リンク数は 178 である。ノードの次数分布はべき乗則に従う。図 3(a) にネットワークトポロジを示す。なお本稿における検討では、図 3(a) の最も外側に存在するノードおよびリンクは使用しない。

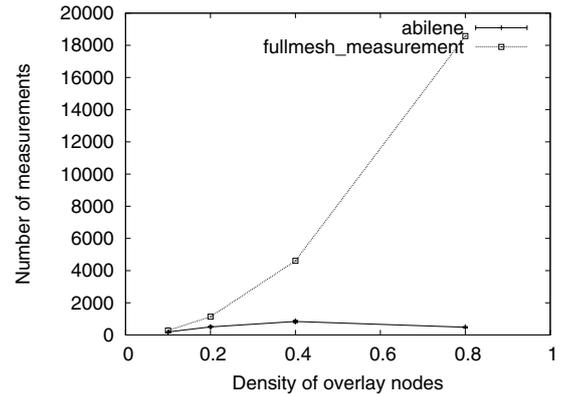
BA トポロジ [4] においてその生成方法が提案された、ノードの次数分布がべき乗則に従うトポロジである。本トポロジは、トポロジ生成ツール BRITE [5] を用いて生成する。図 3(b) にネットワークトポロジの 1 例を示す。ノード数は Abilene-inspired トポロジと等しく 171 とし、リンク数をノード数の m 倍とする。

ランダムトポロジ WAXMAN モデル [6] によって生成されるランダムネットワークである。本トポロジは、トポロジ生成ツール BRITE [5] を用いて生成する。ノード数は Abilene-inspired トポロジと等しく 171 とし、リンク数をノード数の m 倍とする。

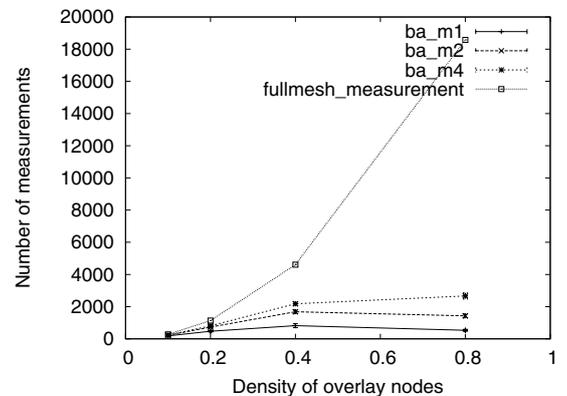
評価は下記のように行う。まず、用意したネットワークトポロジを用いて、指定したオーバーレイノード密度に応じた割合でルータ上にオーバーレイノードをランダムに設置する。次に、設置された全てのオーバーレイノード間のルータレベル経路をダイクストラ法によって導出する。さらに、全てのオーバーレイ経路の計測結果を得るために、(1) 提案手法を用いずにフルメッシュに計測を行った場合、および (2) 提案手法を用いて計測回数を削減した場合、の 2 通りについて、オーバーレイネットワーク全体で必要となる計測回数を算出する。

図 4 は、Abilene-inspired トポロジ、BA トポロジ、およびランダムトポロジにおける、オーバーレイノードの密度と必要となる計測回数との関係を示している。なお図中の“fullmesh_measurement”は、提案手法を用いた計測回数の削減を行わず、フルメッシュに計測を行った場合の計測回数を示している。

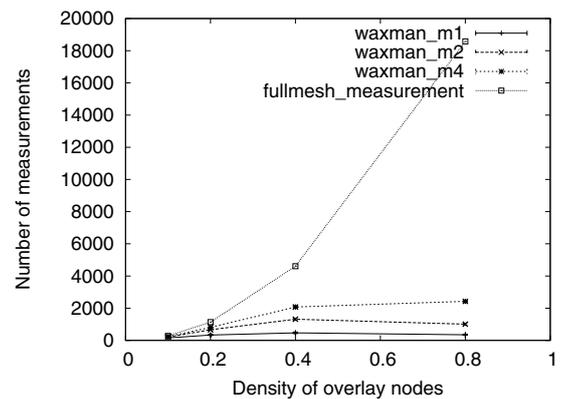
図 4(a) より、Abilene-inspired トポロジにおいては、提案方



(a) Abilene-inspired トポロジの場合



(b) BA トポロジの場合



(c) ランダムトポロジの場合

図 4 計測回数の評価結果

式によって計測回数を最大で約 1/40 に削減できることがわかる。これは、オーバーレイノード密度が高くなるにつれ、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割合が高くなるため、必要となる計測回数が減少するためである。また、提案方式を用いた場合には、オーバーレイノード密度が非常に高くなると、必要となる計測回数が減少していることがわかる。これは、オーバーレイノード密度が高くなることで、各オーバーレイノード間経路が計測の対象となる確率が急激に低下するためである。

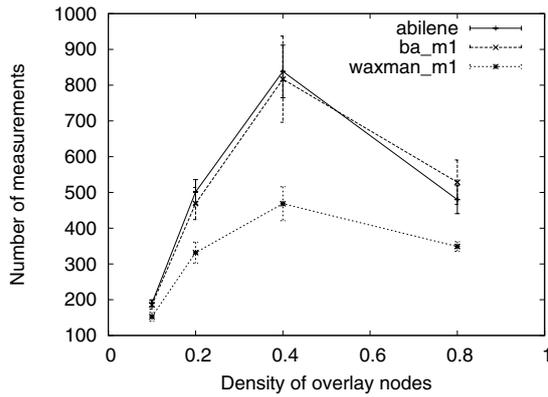


図5 トポロジ間の比較

一方、従来手法においては、オーバーレイ密度が高くなると計測回数がオーバーレイノード数の二乗に比例して増加している。このことから、提案手法が、オーバーレイノード密度に対するスケーラビリティが高いことがわかる。

また、図4(b)より、BAトポロジを用いた場合においては、提案手法によって計測回数を最大で約1/35に削減できることがわかる。また、オーバーレイノード密度が0.5を越えると、計測回数はほとんど増加しない、あるいは減少していることがわかる。この理由はAbilene-inspiredトポロジに対するものと同様であると考えられる。また、 m が大きくなるにつれて、すなわち、ネットワーク内に存在するリンク数が増加するにつれて、提案手法による計測回数削減の効果が小さくなることがわかる。これは、ネットワーク内のリンク数が増加することによって、オーバーレイ経路が特定のリンクに集中することが緩和されるため、オーバーレイ経路の途中に他のオーバーレイノードが存在する確率が下がるためであると考えられる。しかし、 $m=4$ の場合においても、提案方式によって計測回数を約1/7に削減することが可能である。このことは、ネットワーク内のリンク数が増加した場合においても、提案方式が有効であることを示している。特に、オーバーレイノード密度の増加に対する計測回数の増加の速度が、従来手法に比べて小さいことから、提案手法がオーバーレイノード数の増加に対してスケーラブルであると言える。

さらに、図4(c)より、ランダムトポロジを用いた場合においては、提案手法によって計測回数を最大で約1/50に削減できることがわかる。また、 m が大きくなるにつれ、提案手法による計測回数削減の効果が小さくなることがわかる。しかし、 $m=4$ の場合においても、提案方式によって計測回数を約1/8に削減することが可能となっている。これらの結果から、ネットワークトポロジ、およびネットワーク内のリンク数が変化した場合においても、提案方式が有効であることを示している。

図5に、3つのトポロジ(Abilene-inspiredトポロジ、BAトポロジ、およびランダムトポロジ)について、ノード数とリンク数がほぼ等しい場合(BAトポロジ、およびランダムトポロジについては $m=1$)における、オーバーレイノード密度の変化に対する計測回数を比較した結果を示している。この結果から、Abilene-inspiredトポロジとBAトポロジはほぼ同様の結果を示しており、ランダムトポロジだけが傾向が異なることがわかる。これは、Abilene-inspiredトポロジおよびBAトポロジはノードの次数の分布がべき乗則に従っているが、ランダムトポロジはそうではないことが原因であると考えられる。すなわち、次数分布がべき乗則に従う場合は、次数の非常に高いネットワークノードが存在するため、それらの間のリンクがオーバーレイ経路中に用いられることが多くなる。このことは、複数のオーバーレイ経路中に、同じオーバーレイノードを含む確率が高くなることを意味するため、提案方式による計測回数の削減の効果が小さくなると考えられる。

4. IPパスを共有するオーバーレイ経路数の評価

本章では、本章では、2.2.3節において着目した、オーバーレイネットワークにおいて、IPパスを共有するオーバーレイ経路数(以下、重複経路数と呼ぶ)に関する検討を行う。各オーバーレイ経路の重複経路数を知ることができれば、重複経路数に応じた計測周期に基づき、ランダムなタイミングに計測を行うことにより、計測の競合を確率的に回避することができる。本章では、さまざまな環境における重複経路数を評価した結果を示す。

用いるネットワークトポロジ、および評価環境は3章における評価と同じである。評価においては、には、各オーバーレイ経路をルータレベルのホップ数ごとにまとめて、重複経路数の平均および95%の信頼区間を導出する。

図6に、3つのトポロジについて、オーバーレイノード間の経路のルータレベルホップ数に対する、重複経路数の変化を示す。なお、BAトポロジ、およびランダムトポロジについては、 $m=1$ の場合、すなわち、Abilene-inspiredトポロジとネットワーク内のリンク数がほぼ等しい場合を示している。各図中の4本の線は、オーバーレイノード密度を0.1、0.2、0.4、および0.8と変化させた場合の結果を示している。

図から、Abilene-inspiredトポロジおよびBAトポロジにおいては、ルータレベルホップ数に対する重複経路数の変化の傾向はほぼ同様であり、その最大値は約30であることがわかる。一方、ランダムトポロジにおいても、ほぼ同様の傾向を示しているが、重複経路数の最大値は約20となっている。これは、3章における評価結果と同様に、ランダムネットワークにおいては、経路が特定のリンクにそれほど集中しないためであると考えられる。また、オーバーレイノード密度が0.8の場合、他の場合に比べて異なる傾向を示している。これは、3章における評価で、計測数が減少していることと関連していると考えられる。

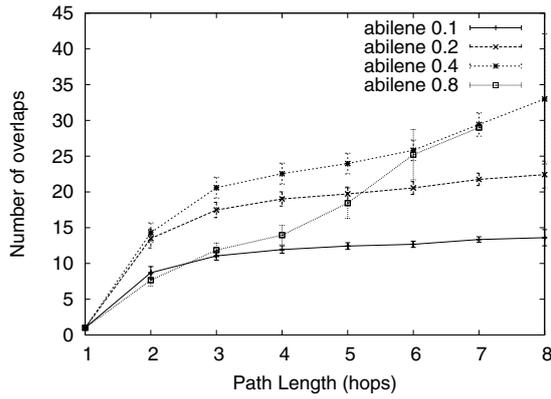
さらに、重複経路数は、オーバーレイ経路のルータレベルホップ数にはそれほど影響を受けず、オーバーレイノード密度に大きく依存することがわかる。このことは、オーバーレイノード密度を正確に導出することができれば、オーバーレイ経路の重複経路数を高い精度で推定することができる可能性があることを示唆している。

図7に、BAトポロジについて、ネットワーク内のリンク数が増加した場合における、オーバーレイ経路のルータレベルホップ数と重複経路数の関係を示す。図から、ネットワーク内のリンク数が増加した場合においても、重複経路数の最大値は約30であり、 $m=1$ の場合と比べてほとんど増加しないことがわかる。これは、本評価においては、オーバーレイノード間の経路はダイクストラ法で決定しているため、増加したリンクが重複して使われることが少ないためであると考えられる。また、ネットワーク内のリンク数が増加した場合においても、重複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がわかる。

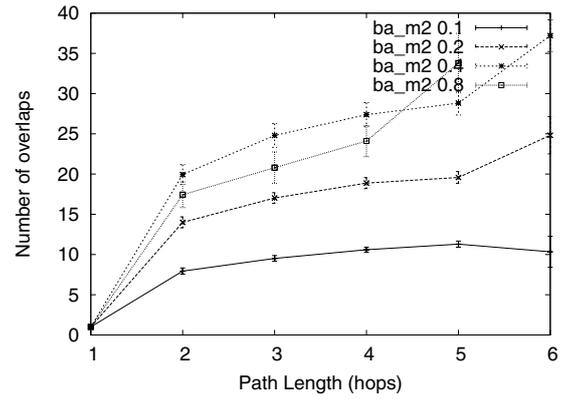
これらの結果から、オーバーレイノードがIPパスの共有を認識できない環境において、計測の競合をできるだけ避けるためには、各オーバーレイノードが単独で得ることができる情報から、オーバーレイネットワーク全体のオーバーレイノード密度、あるいはそれに準ずる指標を推定する手法が必要であると言える。

5. おわりに

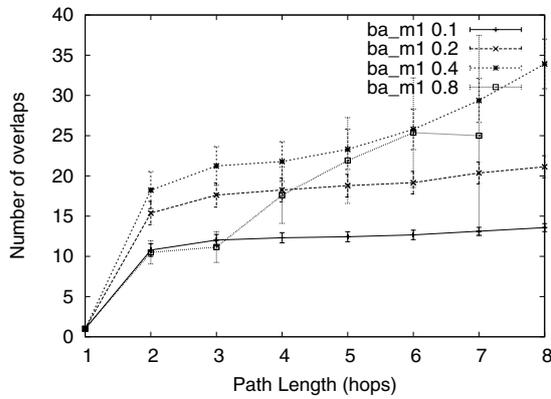
本稿では、オーバーレイネットワークのオーバーレイノード密度に着目し、密度に対してスケーラブルなネットワーク計測手法について検討を行った。その結果、IPパスの共有を知ることができるオーバーレイ経路の計測に関して、計測精度を低下させることなく、オーバーレイネットワーク全体の計測回数を最大で約1/50に削減することができることを明らかにした。また、IPパスを共有しているオーバーレイ経路数の評価を、様々なネットワークトポロジに対して行った。その結果、IPパスを共有しているオーバーレイ経路数は、オーバーレイノード密度に大きく依存することが明らかとなった。これらの検討は、本研究が目



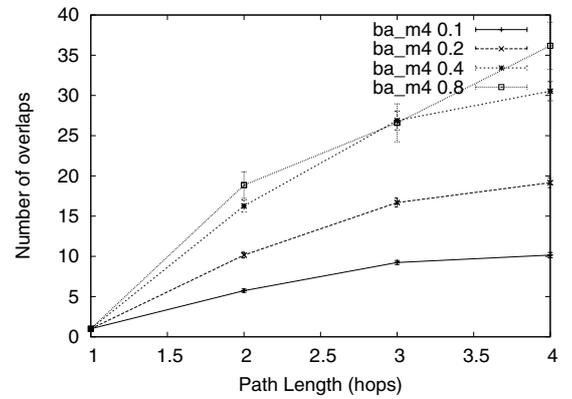
(a) Abilene-inspired トポロジの場合



(a) $m=2$

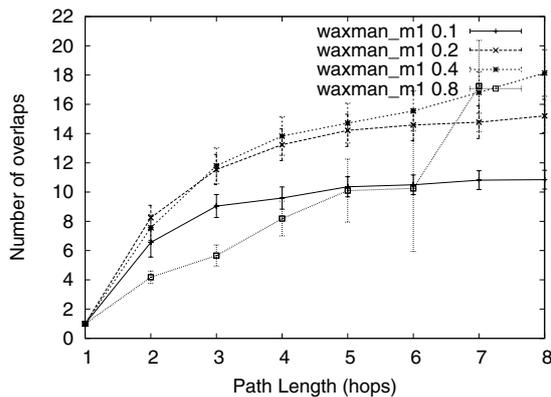


(b) BA トポロジ ($m=1$) の場合



(b) $m=4$

図 7 BA トポロジにおける重複経路数の評価結果 ($m=2,4$)



(c) ランダムトポロジ ($m=1$) の場合

図 6 重複経路数の評価結果 ($m=1$)

的とする、オーバーレイネットワークにおける計測手法を構築する上で重要な知見である。

今後の課題として、各オーバーレイノードが知ることのできる情報を用いて、IP パスを共有しているオーバーレイ経路数を推定する手法を確立し、それに基づいた計測手法を提案することが挙げられる。また、計測によって得られたアンダーレイネットワークの資源に関する情報を基に、オーバーレイノード間経路を設定するオーバーレイルーティング手法についても検討したい。

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 課題カ」によっている。ここに記して謝意を示す。

文 献

- [1] 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.
- [2] A. Nakao, L. Peterson, and A. Bavier, "Scalable routing overlay networks," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 40, pp. 49–61, Jan. 2006.
- [3] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in *Proceedings of INFOCOM 2004*, Aug. 2004.
- [4] A. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [5] BRITE: Boston university Representative Internet Topology generator. available at <http://www.cs.bu.edu/brite/>.
- [6] B. M. Waxman, "Routing of multipoint connections," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 6, pp. 1617–1622, Dec. 1988.