

品質確保のためのネットワーク運用管理技術

代表研究者 田中良明 早稲田大学大学院国際情報通信研究科
共同研究者 ザニケエフ・マラット 早稲田大学国際教養学部

1 まえがき

インターネットではベストエフォートサービスが提供されている。ベストエフォートサービスとは、成り行き任せのサービスであり、品質は安定していない。しかし、映像配信などのアプリケーションが普及するにつれ、品質に対する要求が高まっている。品質確保のための運用管理を従来の MIB (Management Information Base) のデータを用いて行うことは、データ転送量とデータ処理量が膨大になることからほぼ不可能である。そこで、本研究では、ネットワーク測定の新しい方法を開発している。プローブパケットにより帯域幅などを測定する方法が従来からあるが、測定負荷、測定時間、測定精度の面で、ネットワーク運用管理に用いるには不十分である。本研究では、プローブパケットの送出法を変えるなどの方法により、ネットワーク運用管理に耐える測定方法を開発している。これらを基に、重要課題であるネットワークトモグラフィについて検討を行っている。

ネットワークトモグラフィとは、トポロジーが分からないネットワークに関して、外部からプローブパケットを送って測定を行うことにより、内部のトポロジーを推定することである。通信は一つの電気通信事業者だけで完結することもあるが、多くは複数の電気通信事業者にまたがる。品質確保のため、他事業者とは SLA (Service Level Agreement) を結ぶが、それが守られているかどうか監視する必要がある。その際、他事業者のネットワークの内部構造が分かれば、監視も容易になる。また、他事業者のネットワークの内部構造が分かれば、ユーザにより良い品質を提供することも可能になる。

本報告では、特にネットワークトモグラフィに関して述べる。ネットワークトモグラフィの基本的手法の一つは共有トポロジーの検出である。あるサーバからクライアント群への経路トポロジーと、別のサーバからクライアント群への経路トポロジーに共有リンクがあると、共有リンクにトラヒックが集中し、ボトルネックとなる。特に深刻なのは、サーバからクライアント群への経路トポロジーの中の根に近い枝分かれ前のリンクが共有されている場合である。

各ホップの IP アドレスが分かれば、共有トポロジーを検出できる[1]。しかし、他事業者のネットワーク内のノードの IP アドレスは、分からないことが多い。したがって、経路自体が分からず、ましてや二つの経路トポロジーの間に共有リンクがあるかどうか分からない。そこで、ネットワーク構成を外部から測定して推定する方法[2]がある。これにより共有トポロジーを検出し、それを繰り返すことによってネットワーク全体のトポロジーも推定できる。本研究では、その手法に関して検討し、シミュレーションにより、検出精度などの特性を明らかにする。

2 共有トポロジーと非共有トポロジー

2-1 共有トポロジー

共有トポロジーの例を、図 1 を用いて説明する。この例は、説明を簡単化するために、サーバ 2 台 (①及び②) とクライアント 2 台 (③及び④) の場合を示している。

図 1 によると、サーバ 1 からクライアント 3 及び 4 への経路トポロジーと、サーバ 2 からクライアント 3 及び 4 への経路トポロジーの間で、枝分かれ前のリンクが共有されている。したがって、これは共有トポロジーである。このように、共有トポロジーの場合、複数のサーバから複数のクライアントにパケットを送信する場合、選択するサーバ及びクライアントの組合せに関わらず、必ず常に通過するリンクが存在する。

2-2 非共有トポロジー

非共有トポロジーの例を、図 2 を用いて説明する。先ほどと同様、説明を簡単化するために、サーバ 2 台 (①及び②) とクライアント 2 台 (③及び④) の場合を示している。

図 2 によると、サーバ 1 及び 2 からクライアント 3 へ向かうリンクは、測定したいネットワークの内部で

は共有リンクが存在せず、クライアント3及び4へ向かう枝分かれ前のリンクが共有されていない。この場合、非共有トポロジである。このように、非共有トポロジの場合、複数のサーバから複数のクライアントにパケットを送信したい場合、選択するサーバ及びクライアントの組合せを変化させると、その都度、通過するリンクが変化し、組合せの全パターンで同じリンクを通過することはない。

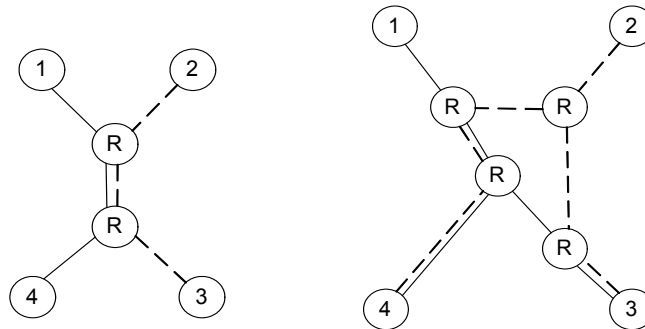


図1 共有トポロジの例

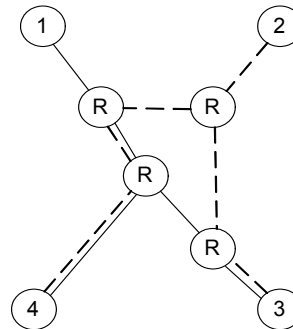


図2 非共有トポロジの例

3 共有トポロジ検出手法

3-1 ネットワーク内部からの検出手法と外部からの検出手法

ネットワーク内の特定のリンクが共有であるかどうかを判別する方法の一つとして、ネットワークの内部から測定する手法がある。各ホップの IP アドレスを調べ、物理的なトポロジを得ることによって、リンクが共有かどうかを判別する。

ネットワークの外部から測定する手法も提案されている。外部からは、経路トポロジが把握できないネットワークに関して、適当なサーバ及びクライアントを選択し、そこからパケットの送受信を行い、その遅延時間を用いて共有リンクがあるかどうかを検出する。

3-2 各検出手法の長所と短所

ネットワーク内部から共有トポロジを検出する方法と、ネットワーク外部から共有トポロジを検出する方法には、それぞれ一長一短がある。

- ネットワーク内部からの検出手法

長所：検出精度が高い。また、各ホップの IP アドレスを取得するため、物理トポロジを把握することができる。

短所：大規模なネットワークになればなるほど、検出にかかる時間やコスト、測定量が大きな負担になる。

- ネットワーク外部からの検出手法

長所：ネットワークの規模に関わらず、検出にかかる時間やコストはほぼ一定である。

短所：検出精度が低い。また、どのリンクが共有であるかだけしか判別できないので、論理トポロジしか把握できない。

つまり、会社内のイントラネットなどの限られたネットワークに関して管理や運用等に物理トポロジが必要な場合はネットワーク内部からの検出手法が優れているが、それ以外の場合に関してはネットワーク内部からの検出は非現実的な手法である。よって、その場合はネットワーク外部からの検出手法を用いるのが適切である。

4 遅延時間

4-1 ネットワーク特性における遅延時間

遅延には往復の遅延 (round-trip time 以下, RTT) 及び一方通行の遅延 (one-way delay 以下, OWD) がある。RTT とは、初めにサーバからパケットを送信し、クライアントがパケットを受信したら直ちにサーバへパケットを送信し、サーバがクライアントから送信されたパケットを受信するまでに経過した時間のことである。一方、OWD とは、サーバがパケットを送信してからクライアントがパケットを受信するまでに経過した時間のことである。

図3にネットワーク特性の階層を示す[3]. ネットワークには多くの特性が有り, 帯域幅や損失等, 計測することのできる特性がいくつか存在する. しかし, 今回の検討においては, 経路トポロジが共有であるかどうかの判別が目的であるので, それを実現するために, 遅延時間の中でも往復の遅延時間 RTT にのみ着目する.

また, 経路トポロジのあらゆる状態を調べるための測定手法として, パケットサイズを変化させる測定法, 周期的にパケットを送受信する測定法, 先頭となるパケットの後を追うようにパケットを送信し続ける測定法なども存在する. 本検討においては, 共有トポロジの検出にのみ着目しているので, パケット送受信の遅延時間を用いた測定法を用いることとする.

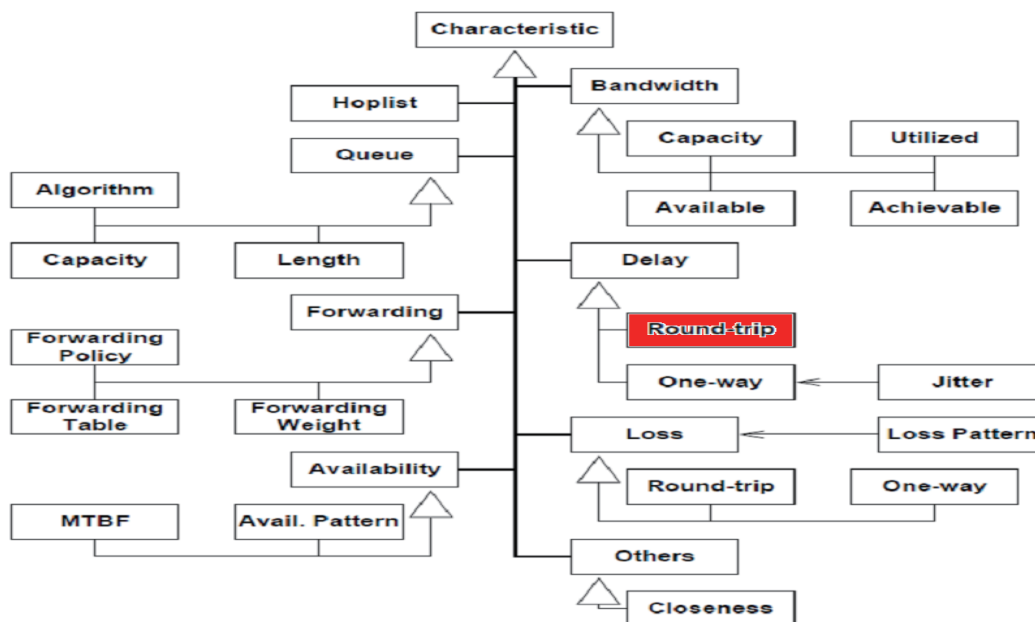


図3 ネットワーク特性の階層

4-2 遅延時間を用いた共有トポロジ検出法

遅延時間を用いて, 共有トポロジの性質を表してみる[4]. 図4は, 図1の共有トポロジの例に遅延時間を書き込んだものである. この例は, 説明を簡単化するために, サーバ2台(①及び②)とクライアント2台(③及び④)の場合を示している. 図中の d は遅延時間で, 例えば d_{13} は, サーバ1からクライアント3へパケットを転送したときの遅延時間である.

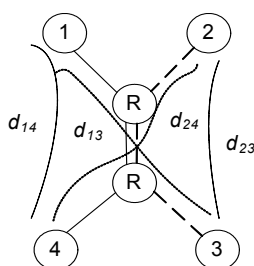


図4 共有トポロジにおける遅延時間

時刻 t_0 にサーバ1からクライアント3にパケットを送信し, それより u だけ後の時刻 t_0+u にサーバ2からクライアント3にパケットを送信することを考える. クライアント3がサーバ1からのパケットを受信する時刻は t_0+d_{13} , サーバ2からのパケットを受信する時刻は t_0+u+d_{23} である.

符号関数 sign を用いて, 次式の α_1 を考える. クライアント3へのパケットの到着が送信順なら α_1 は+1, 逆なら α_1 は-1になる.

$$\alpha_1 = \text{sign}((t_0 + u + d_{23}) - (t_0 + d_{13})) \tag{1}$$

同様に、サーバ1及び2からクライアント4へのパケットの到着順序に関する次式の α_2 を考える。

$$\alpha_2 = \text{sign}((t_0 + u + d_{24}) - (t_0 + d_{14})) \tag{2}$$

ここで、次式の z を定義する。 $1\{\cdot\}$ は、 $\{\cdot\}$ が成り立てば1、成り立たなければ0となる関数である。

$$z = 1\{\alpha_1 \neq \alpha_2\} \tag{3}$$

共有トポロジーの場合、トラヒックの有無に関わらず、 $\alpha_1 = \alpha_2$ である。ゆえに、 $z = 0$ である。また、非共有トポロジーの場合、ある一定範囲の u の値において、 α_1 は α_2 と異なる。ゆえに、 u の値を変化させることによって、トポロジーが共有されているかどうかを判別できる。

5 測定法

5-1 測定モデルの構築手法

ネットワーク外部からの共有トポロジー検出法では、あるネットワークで共有リンクが存在するかどうかを測定するに当たって、まず測定したいネットワークの外部からパケットを送受信させるために必要なサーバ及びクライアントを選択し、測定するモデルを構築しなければならない。Triangular Delay Map と呼ばれる、三点のノード間距離を用いたサーバ及びクライアントの選択方法を利用する [5]。

5-2 測定手法

図5は、ネットワークパスの距離とパケット位置の関係を示しており、サーバ1から送信されたパケット（以下、パケット1）及びサーバ2から送信されたパケット（以下、パケット2）の関係を表している。サーバ1, 2それぞれからクライアント3へパケットを送信するとともに、クライアント4へもパケットを送信する。

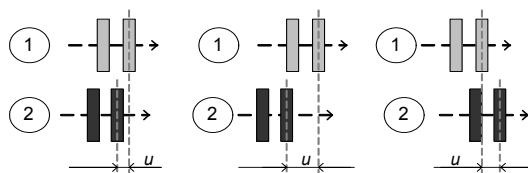


図5 ネットワークパスの距離とパケット位置の関係

図5左はパケット1が送信されてから u だけ時間をずらして、パケット2が送信されていることを表している。送信されたパケットの数はいずれも二つである。その後のパケットが取り得る状況としては、図5中のように送信時の位置関係を保ったままパケット1が先に到着するか、図5右のように位置関係が逆転しパケット2が先に到着することが考えられる。

測定では、 u の値を変化させ、パケット1及びパケット2の位置関係を変化させることによって、第4章で用いた式(1)及び式(2)を用いて α_1 及び α_2 を求め、その結果から式(3)を用いて z を求めることで、共有トポロジーであるかどうかを判断する。

図6及び図7に、 u の値を変化させた場合の、共有トポロジーと非共有トポロジーの α_1 , α_2 , 及び z が取るべき波形を示す。

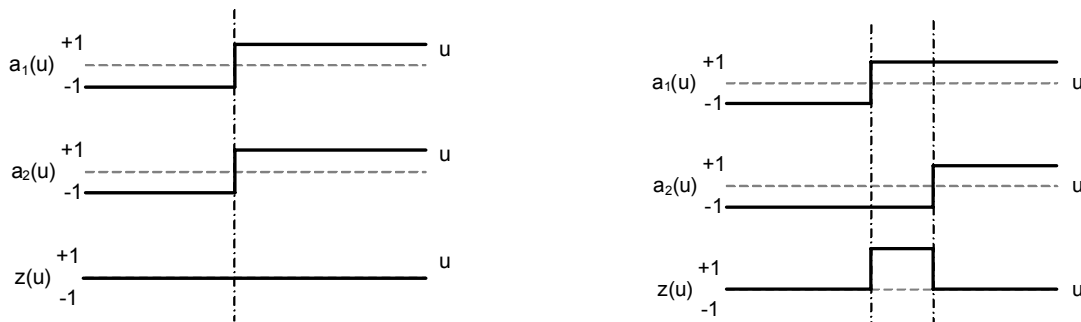


図6 共有トポロジーの場合の α_1 , α_2 , 及び z の波形 図7 非共有トポロジーの場合の α_1 , α_2 , 及び z の波形

6 シミュレーション

6-1 シミュレーションモデル

共有トポロジー検出法の精度を調べるために、サーバ2台とクライアント2台を用いた場合について、シミュレーションを行う。

共有トポロジーにおいて、2か所のサーバから2か所のクライアントに対して、それぞれパケットを送信し、クライアントが受信するまでにかかった時間を、2か所のサーバ及び2か所のクライアントに設置した4か所のプローブを用いて管理する。また、 u の値を1 μ sec単位で変化させ、片方のサーバから送信するタイミングを変化させる。

6-2 シミュレーション結果

図8に、変数 u と、式(1)、式(2)を用いて求めた α_1 及び α_2 の関係を示す。図8では、実際のネットワークを想定するために用いているバックグラウンドトラフィックの影響により、 u の値が小さい状況においてパケットの到着順序が頻繁に変化している。しかし、 u の値が大きくなるにつれ、 $\alpha_1=1$ 及び $\alpha_2=1$ が安定して得られている。すなわち、2か所のサーバからの送信及びクライアントでの受信の順序が同じであることが分かる。よって、得られたデータに関して、理論上の説明と一致していることが分かる。

また、図8で得られた α_1 及び α_2 より、式(3)を用いて z の値を求め、 z のシミュレーション時間による変化を図9に示す。図9において、先ほどと同様、バックグラウンドトラフィックが混在している影響により、測定時に用いたネットワークのトポロジーは実際には共有されているにもかかわらず、一部 $z=1$ となっている部分がある。しかしながら、シミュレーション時間を考慮すると、その部分はほんのわずかな時間に過ぎず、大部分が $z=0$ であるため、誤差の範囲であり、共有トポロジーであることが判別できる。

結果的に、共有トポロジーにおけるシミュレーション結果は、理論上の説明とほぼ一致しているといえる。

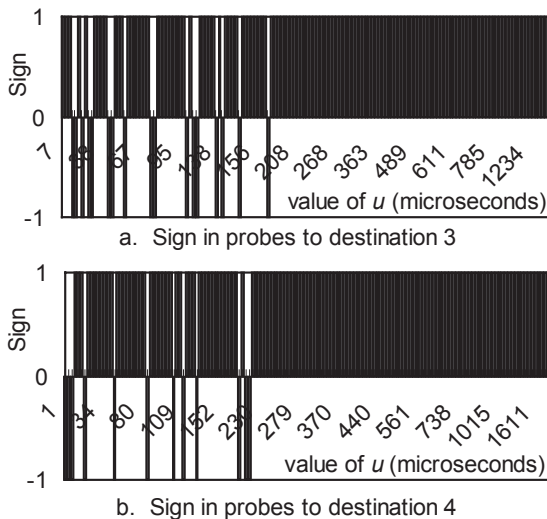


図8 サーバ・クライアント間のパケット到着順序

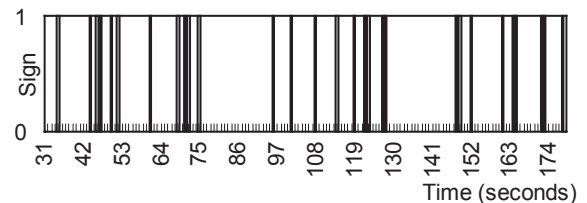


図9 zのシミュレーション時間による変化

7 むすび

本研究では、ネットワーク測定の新しい方法を開発した。プローブパケットにより帯域幅などを測定する方法が従来からあるが、測定負荷、測定時間、測定精度の面で、ネットワーク運用管理に用いるには不十分である。本研究では、プローブパケットの送出力を変えるなどの方法により、ネットワーク運用管理に耐える測定方法を開発した。これらを基に、重要課題であるネットワークトモグラフィについて検討を行った。ネットワークトポロジーが不明なネットワークを外部から推定するに当たり、共有トポロジー検出法を適用して、それがネットワーク内でどれだけ有効かシミュレーションにより調べた。

バックグラウンドトラフィックが増加すれば誤差が増加する。シミュレーション結果からその大きさを明らかにした。その程度の誤差であれば、トポロジーが共有されているか否かの判断は十分に行えるので、ネットワーク外部からの共有トポロジー検出法は、実環境でも十分適用できると考えてよい。したがって、今後のネットワーク推定に十分利用できるといえる。

今後の課題としては、シミュレーションで示した共有トポロジー検出法の精度をより正確に求めるために、実際のネットワークによる実験を行うことが挙げられる。今回、バックグラウンドトラフィックを発生させて実環境に近づけたシミュレーションを行ったが、実用化を考慮すると、実際のネットワークでの測定は必須である。また、ネットワークの管理を視野に入れるためには、膨大な数の外部サーバとクライアント間の通信に関して実験を行い、多くのデータを収集する必要がある。更に、ネットワークトモグラフィを用いて、ネットワーク全体のパフォーマンスを向上させる管理を行う方法の構築などが挙げられる。

【参考文献】

- [1] C. Fraleigh, C. Diot, and B. Lyles, "Design and deployment of a passive monitoring infrastructure," Proc. Thyrrhenian International Workshop on Digital Communications: Evolutionary Trends of the Internet, Taormina, Italy, pp.556-575, April 2001.
- [2] M. Coates and R. Nowak, "Network loss inference using unicast end-to-end measurement," Proc. ITC Conference on IP Traffic, Modeling and Management, Monterey, CA, USA, Sept. 2000.
- [3] R. Schoonderwoerd, "Network performance measurement tools: a comprehensive comparison," Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, Nov. 2002.
- [4] M. Rabbat, R. Nowak, and M. Coates, "Multiple source, multiple destination network topology," Proc. IEEE INFOCOM, Hong Kong, China, March 2004.
- [5] T. S. Eugene Ng and Hui Zhang, "Predicting internet network distance with coordinates-based approaches," Proc. IEEE INFOCOM, New York, NY, USA, June 2002.

(注書き)紙面の都合により、本研究成果報告は、焦点を絞って記述している。詳しい研究成果は、下記の発表資料のとおりである。

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Point of Reference in Perception of Network Performance by Active Probing	Lecture Notes in Computer Science	2007年9月
Quantitative Analysis of Temporal Patterns in Loosely Coupled Active Measurement Results	Lecture Notes in Computer Science	2007年9月
Detection and Identification of Neptune Attacks and Flash Crowds	Lecture Notes in Computer Science	2007年9月
Methods of Distinguishing Flash Crowds from Spoofed DoS Attacks	3rd EuroNGI Conference on Next Generation Internet Networks (NGI 2007)	2007年5月
Applications of IP Aggregation for Network Anomaly Detection	IEICE Technical Report on Network System	2007年6月
Entropy-based Analysis of User IP Space	IEICE Technical Report on Information Network	2007年12月
Verifying Quality of Active Measurement Results	IEICE Communications Society Conference	2007年9月
Performance of Traffic Flow versus IP Space Analysis	IEICE Communications Society Conference	2007年9月
Analyzing Web Server Source Distribution by Data Image	IEICE Communications Society Conference	2007年9月
Time Series Analysis for Active Probing Results	IEICE General Conference	2008年3月
Sensitivity of Entropy-based Analysis to Detect Infected Hosts	IEICE General Conference	2008年3月
Performance Analysis of Extra-Large Network Simulations	IEICE General Conference	2008年3月