

特別研究報告

題目

インラインネットワーク計測手法および
その応用手法の公衆網における性能評価

指導教員

中野 博隆 教授

報告者

森 一成

平成 18 年 2 月 20 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

インラインネットワーク計測手法および
その応用手法の公衆網における性能評価

森 一成

内容梗概

近年の急速なインターネットの発展に伴って、インターネット上では様々なネットワークサービスが提供されている。これらのデータ転送の制御に下位層ネットワークに関する情報を利用することにより、サービスの品質を向上させることが可能となると考えられる。

そこで我々の研究グループでは、これまでにネットワークパスの利用可能帯域を高い精度で継続的に計測するインラインネットワーク計測手法である ImTCP、およびその計測結果を利用するバックグラウンド転送方式である ImTCP-bg の提案を行ってきた。ImTCP はデータパケットとそれに対する ACK パケットのみを用いて計測を行うことで計測用パケットを必要とすることなく高い精度で利用可能帯域を推測するもので、RTT の 1-4 倍という非常に短い周期で継続的に計測結果を取得することが出来る。一方、ImTCP-bg は、ImTCP の計測結果を用いることによりネットワークの利用状況を高い精度で推測して輻輳制御を行うことで、従来提案されてきたラウンドトリップ時間を指標として早期にネットワーク輻輳を検知する方式とは異なり、輻輳を発生させることなくバックグラウンド転送を行うことができる。また、ImTCP-bg は RTT に基づく輻輳制御機構を併用することで、輻輳ウィンドウサイズが小さすぎる場合、およびバースト性が高い TCP コネクションが存在する場合に ImTCP の計測結果が不正確になる場合においてもネットワーク輻輳を検知し回避することができる。

これらの手法について我々の研究グループはこれまで、コンピュータ上のシミュレーション、および実験室ネットワークにおける実装実験によってその有効性を示した。しかし、実際のインターネット環境では、様々なネットワーク機器の特性やネットワークを流れるトラ

ヒックのバースト性からラウンドトリップ時間が大きく変動することがあり、パケットの送信・受信間隔を用いて計測を行う提案手法が良好に動作しない可能性がある。

そこで本報告では、公衆インターネット網を用いた通信実験を行う。その結果、公衆インターネット環境における ImTCP のエンド端末間パスの利用可能帯域の計測精度、および ImTCP-bg が他のトラヒックに与える影響の大きさに関してシミュレーション、および実験室ネットワークにおける評価結果と同等の有効性があることがわかった。

主な用語

インライン計測、輻輳制御、利用可能帯域、TCP、バックグラウンド転送

目次

1	はじめに	5
2	インラインネットワーク計測手法とその応用手法	8
2.1	インラインネットワーク計測手法 ImTCP	8
2.2	バックグラウンド転送手法 ImTCP-bg	9
3	実験環境	12
4	実験結果と考察	14
4.1	ImTCP の計測精度の評価	14
4.1.1	クロストラヒックが UDP トラヒックの場合	14
4.1.2	クロストラヒックが TCP トラヒックの場合	15
4.2	ImTCP-bg の性能評価	17
4.2.1	実験方法	17
4.2.2	実験結果	19
5	おわりに	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目 次

1	ImTCP の動作概要	9
2	ImTCP-bg アルゴリズム概要	10
3	実験環境	13
4	ImTCP 計測結果 (クロストラヒックが UDP の場合)	16
5	ImTCP 計測結果 (クロストラヒックが TCP の場合)	18
6	実験タイムチャート	19
7	ImTCP-bg 計測結果:パターン 1	20
8	ImTCP-bg 計測結果:パターン 2	21
9	TCP-LP 計測結果:パターン 1	23
10	TCP-LP 計測結果:パターン 2	24

1 はじめに

近年のネットワーク速度の飛躍的な向上やインターネット利用者数の爆発的な増加にともないインターネットが急速に発展していくにつれて、提供されるサービスも多種多様なものとなってきている。例えば、コンテンツ配信を目的とした Contents Delivery Network (CDN)[1, 2]、ピア同士の直接的な通信を実現する P2P ネットワーク [3, 4]、ネットワーク上で分散計算環境を提供するグリッドネットワーク [5, 6]、IP ネットワーク上に仮想網を構築する IP-VPN [7] などのサービスオーバレイネットワークが挙げられる。これらのネットワークサービスの品質を向上させるためには、ネットワークの基盤となる IP ネットワークの資源状況を把握し、有効に利用することが重要となる。特に、ネットワークパス・リンクの帯域に関する情報を得ることによって、様々なネットワークサービスの品質を向上させることができると考えられる。

そこで我々の研究グループでは、エンドホスト間の利用可能帯域を計測するための新たなインラインネットワーク計測手法 ImTCP [8] を提案している。利用可能帯域を計測するための手法はこれまでも多く提案されている (たとえば [9-11]) が、それらの手法の多くは、計測を行う際に多くの計測用パケットを必要とするためにネットワークへ大きな影響を与える、計測に長い時間がかかるなどの問題が存在する。一方 ImTCP は TCP コネクションがデータ転送に用いるデータパケットとそれに対する ACK パケットのみを用いてネットワークの利用可能帯域を計測するため、計測用パケットを必要とすることなく高い精度のアクティブ計測を可能としている。また、非常に短い周期 (ラウンドトリップ時間 (RTT) の 1-4 倍) で継続的に計測結果を取得することが出来るため、ネットワーク状況の変化に素早く追従することができる。

また我々は、この計測結果に基づいた応用手法として、バックグラウンド転送方式 ImTCP-bg [12] を提案している。バックグラウンド転送とは、他のトラフィックに影響を与えずにネットワークの空き帯域のみを利用して行うデータ転送のことである。バックグラウンド転送が実現されることによって、優先度の異なるデータ転送が可能となり、サービスの品質が向上する場合がある。例えば、前述した CDN ではユーザからのコンテンツ閲覧要求を受けて行われるデータ転送以外にもバックアップ、キャッシング、プリフェッチなどによってデータ

転送が発生する。このとき、バックアップ等のデータ転送をバックグラウンド転送によって行うことで、バックアップ等のデータ転送中にもユーザからのコンテンツ要求に迅速に対応することが可能となる。

ImTCP-bg は、ImTCP によって計測された利用可能帯域を基に送信ホスト側の TCP が持つ輻輳ウィンドウサイズの上限值を動的に設定することで、輻輳を発生させることなく空き帯域を効率的に利用したバックグラウンド転送を行うことが出来る。一方、従来提案されているバックグラウンド転送手法 [13, 14] は、輻輳制御のために RTT の最小値や最大値を用いている。これらの手法においては、RTT の最大値は、ボトルネックリンクのバッファが一杯であるときの RTT 値であることを前提としている。すなわち、制御のために必要となる最大 RTT を取得するにはネットワーク輻輳を発生させる必要があり、バックグラウンド転送の趣旨に合致しているとはいえない。また、[13, 14] においては輻輳発生時のウィンドウサイズの減少幅がネットワーク状況に関係なく固定であるため、ネットワークの空き帯域を有効に利用できない [12]。

[8, 12, 15] においては、ImTCP および ImTCP-bg の効果をシミュレーション、および実験室ネットワークにおける実装評価により評価した。[8, 12] においては、提案手法の有効性を ns-2 [16] を用いたシミュレーションによって評価し、ImTCP が提案した計測手法が少ないパケット数で高い精度の計測結果を継続的に導出することができること、および ImTCP-bg が優先されるべきトラフィックにほとんど影響を与えずにネットワークの空き帯域のみを用いてデータ転送を行うことができることを確認している。[15] においては、ImTCP および ImTCP-bg を FreeBSD [17] のカーネルシステムに実装し、実験室ネットワークにおける実装実験によって ImTCP の計測精度や ImTCP-bg のスループットおよび他のトラフィックに与える影響度に関して、シミュレーションによる評価結果と同等の有効性があることを示した。

しかし、インターネットではネットワーク機器の負荷増大やネットワーク輻輳レベルの変動などのさまざまな要因による瞬間的な RTT の変動があるため、このようなネットワークノイズに対して、パケットの送信・到着間隔を用いて計測を行う提案手法が、期待通りの挙動をしない可能性がある。したがって、提案手法の有効性を示すためには、シミュレーショ

ン、実験室ネットワークのみの評価では不十分であり、インターネット上での評価が不可欠であるといえる。そこで本報告においては、公衆インターネット回線を用いた実験を行うことで、ImTCP が高い精度で利用可能帯域を計測できること、また、ImTCP-bg が他のトラフィックに影響を与えず、かつネットワークの利用可能帯域を有効に利用できることを確認する。

以下、2章ではインラインネットワーク計測手法 ImTCP およびバックグラウンド転送方式 ImTCP-bg のアルゴリズムの概略の説明を行う。3章では実験で用いるネットワークを説明する。4章では、実インターネットを用いてこれらの提案方式の評価を行った結果を示す。最後に 5章で本報告のまとめと今後の課題を示す。

2 インラインネットワーク計測手法とその応用手法

本章では、我々の研究グループが提案している、インラインネットワーク計測手法 ImTCP およびその応用手法 ImTCP-bg のアルゴリズムについて、その概要の説明を行う。

2.1 インラインネットワーク計測手法 ImTCP

ImTCP は、送受信エンドホスト間のネットワークパスにおける現在の利用可能帯域を計測する。TCP によるデータ転送においては、送信側端末が受信側端末にパケットを送信し、受信側端末が ACK パケットを返送する。この性質を利用することにより、送信側端末で設定したデータパケットの送信間隔に対して、その ACK パケットの到着間隔の変化を観察することによって利用可能帯域の計測を行う (図 1)。ImTCP は、TCP コネクションがデータ転送に用いるデータパケットおよび ACK パケットのみを用いてネットワークの利用可能帯域を計測するため、計測用パケットを必要とすることなく計測を可能としている。また、非常に短い周期 (1-4 RTT) で継続的に計測結果を取得することができるため、ネットワークの状況の変化に素早く追従することができる。

利用可能帯域を計測する際には、現在の利用可能帯域が含まれていると考えられる帯域の上限と下限を過去の計測結果を用いて設定し、この区間の中から利用可能帯域を探索する。この区間のことを探索区間と呼ぶ。探索区間を設定することで、不必要に高いレートでパケットを送出することが避けられるため、ネットワークに与える影響を最小限に抑えることが出来る。また、探索する帯域の範囲が狭くなるため、計測の精度を保ちながら用いるパケット数を減少させることが出来る。探索区間は過去の計測結果を基に設定するため、ネットワーク状況の変化に伴い利用可能帯域が急激に変化した場合、探索区間内に利用可能帯域が存在しない場合が存在する。ImTCP では、そのような場合においても、数回の計測で新たな利用可能帯域を発見することが出来る。ImTCP の動作概略を以下に示す。それぞれのステップにおける詳細なアルゴリズムについては、[18] を参照されたい。

1. Cprobe アルゴリズム [19] に基づいて、初期探索区間を決定する
2. 探索区間を複数の小区間に分類する

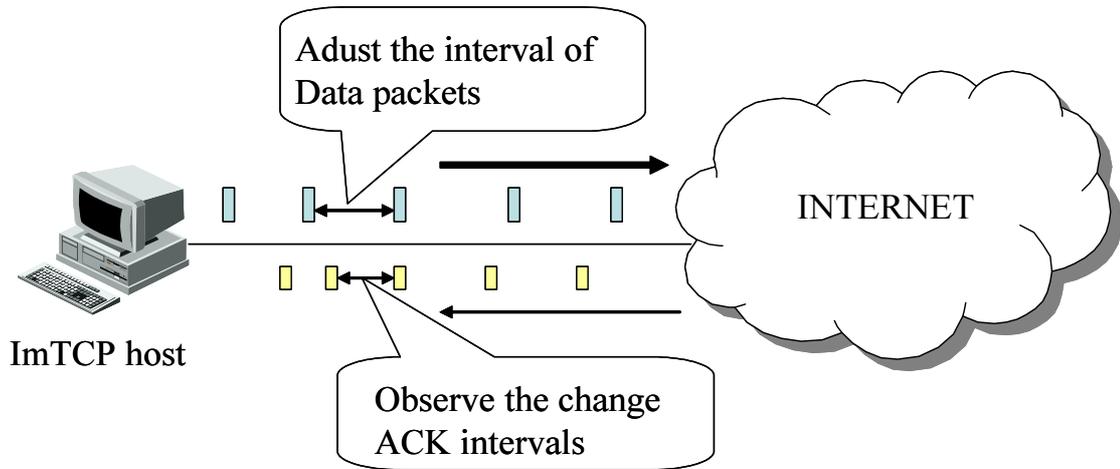


図 1: ImTCP の動作概要

3. 各小区間に対応する計測ストリームを計測アルゴリズムに基づいて決定されたタイミングで送信し、送信間隔とそれらの ACK パケットの受信間隔の比較を行い、パケット間隔が増加したかを確認する
4. パケットの送受信結果から、利用可能帯域が含まれていると考えられる小区間を選択する
5. 選択した小区間に対応する計測ストリームの送受信結果から、利用可能帯域を導出する
6. 過去の計測結果から 95%信頼区間を導出する。その区間を次回の探索区間として設定し、(2)へ戻る

2.2 バックグラウンド転送手法 ImTCP-bg

ImTCP-bg は、インラインネットワーク計測によって利用可能帯域を計測する ImTCP を基に、計測結果を輻輳ウィンドウサイズの制御に用いることによってバックグラウンド転送を行う TCP を実現する。

まず、インライン計測によって取得された利用可能帯域に対して平滑化を行う。 A_{cur} をインライン計測によって取得された最新の利用可能帯域、 \bar{A} を平滑化が行われた利用可能帯

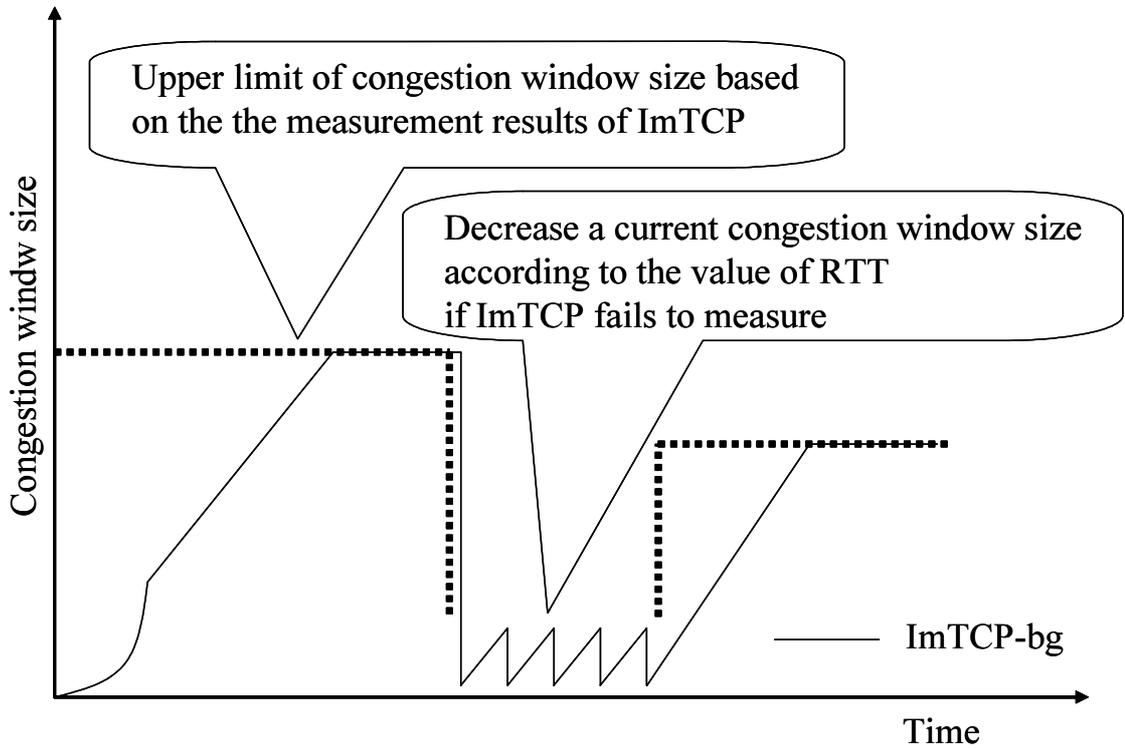


図 2: ImTCP-bg アルゴリズム概要

域とすると、 \bar{A} は平滑化パラメータ γ ($0 < \gamma < 1$) を使用して次式を用いて求める。

$$\bar{A} \leftarrow (1 - \gamma) \times \bar{A} + \gamma \times A_{cur} \quad (1)$$

次に、送信側 TCP の輻輳ウィンドウサイズの上限值 $maxcwnd$ を次式によって決定する。

$$maxcwnd \leftarrow \bar{A} \times RTT_{min} \quad (2)$$

ここで、 RTT_{min} は、今までに観測された RTT の最小値を表す。

ImTCP-bg のアルゴリズムの性能は、ImTCP の利用可能帯域の計測精度に大きく依存する。しかし ImTCP はそのアルゴリズムの性質上、利用可能帯域の計測が不正確になる場合がある。たとえば、他のトラヒックが高いバースト性を持つデータ転送を行った場合、そのトラヒックが計測結果に大きく影響を与え、計測結果が不正確になる。そこで、ImTCP-bg は以下のような方式を用いることによって計測結果が不正確である場合の対策を行う。

計測誤差によって輻輳ウィンドウサイズが適切な値よりも大きい状態でデータ転送を続けると、ボトルネックとなっているルータの出力リンクバッファにパケットが蓄積され始め、輻輳が発生する。その結果、TCP コネクションの RTT が増大する。そこで ImTCP-bg は、RTT の増大が観測された場合には、輻輳ウィンドウサイズを強制的に減少させることによって輻輳回避を行う。ボトルネックとなっているルータの出力リンクバッファにパケットが蓄積されているかどうかの判断は、現在の RTT の値およびこれまでに計測された RTT の最小値の比を用いて行う。 \overline{RTT} を TCP が保持している平滑化された RTT の値、これまでに観測された RTT の最小値を RTT_{min} とし、次式が真となる場合に出力リンクバッファにパケットが蓄積されていると判断する。

$$\frac{\overline{RTT}}{RTT_{min}} > \delta \quad (3)$$

ここで、 δ はしきい値を表し 1.0 以上の値である。(3) 式が真となり出力リンクバッファにパケットが蓄積されていると判断されると、現在の輻輳ウィンドウサイズ $cwnd$ を次式を用いて減少させる。

$$cwnd \leftarrow cwnd \times \frac{RTT_{min}}{\overline{RTT}} \quad (4)$$

3 実験環境

本実験では、NEC(東京側)と大阪大学(大阪側)の間に図3に示すような通信回線を準備し、通信実験を行う。この環境を用いたのは、日本国内では通信量が多いと考えられる東京-大阪間のネットワーク環境を用いることが望ましく、また本環境におけるエンド端末間のホップ数は16ホップであり、特異なルータのみでネットワークパスが構成されている可能性が軽減できると考えたためである。

実験ネットワークはインターネットを介した100 Mbpsのイーサネットによって構築され、イーサネットスイッチを介してクロストラヒックを発生させるエンドホスト(Traffic generator)、ImTCPおよびImTCP-bgが実装されたエンドホスト(Sender)、それぞれのエンドホストからパケットを受信するエンドホスト(Receiver)が接続されている。それぞれ、Traffic generator, Senderは大阪側、Receiverは東京側に設置されている。

また、以降の実験では、大阪側のエンドホスト(Sender)を送信側ホスト、東京側のエンドホスト(Receiver)を受信側ホストとして用いた実験結果を示す。

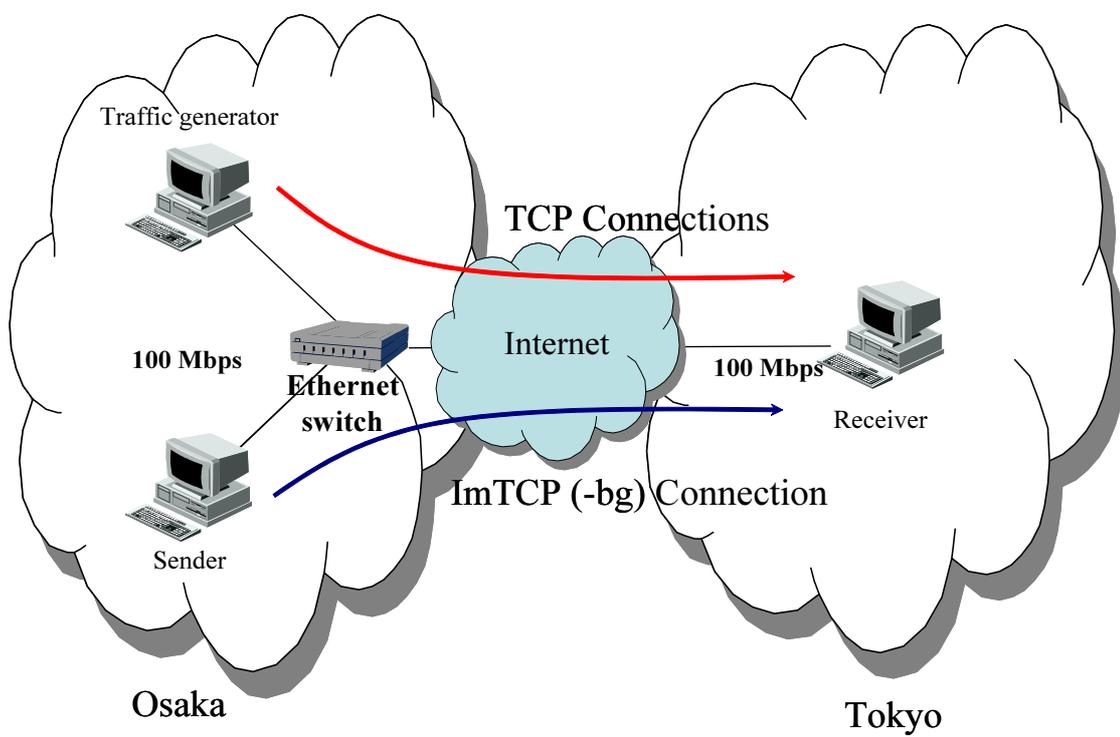


图 3: 実験環境

4 実験結果と考察

4.1 ImTCP の計測精度の評価

本節では、クロストラフィックとして UDP トラフィックおよび TCP トラフィックを用いて ImTCP の計測精度の評価を行う。

4.1.1 クロストラフィックが UDP トラフィックの場合

まず、クロストラフィックとして UDP トラフィックを用いた場合の ImTCP の計測精度の評価を行う。

図 4 は、発生させる UDP トラフィックの量を時間の経過と共に変動させたときの、ImTCP の計測結果、平滑化した計測結果、および推定される利用可能帯域の値を示している。インターネット回線においては、正確なネットワーク帯域の値を得ることが出来ないが、本実験においては、最大で 70 Mbps 程度の値を示すことが多かった。そこで本節の実験では、以下のパターンに従って変化させた。

パターン 1 : UDP トラフィックを 0 sec から 20 sec までは 0Mbps、20 sec から 40 sec までは 50Mbps、40 sec から 60 sec までは 30Mbps と変化させる。したがって、利用可能帯域の推定値は 0 sec から 20 sec までは約 70 Mbps、20 sec から 40 sec までは約 20 Mbps、40 sec から 60 sec までは約 40 Mbps となる。

パターン 2 : UDP トラフィックを 0 sec から 20 sec までは 30Mbps、20 sec から 40 sec までは 50Mbps、40 sec から 60 sec までは 0Mbps と変化させた。したがって、利用可能帯域の推定値は 0 sec から 20 sec までは約 40 Mbps、20 sec から 40 sec までは約 20 Mbps、40 sec から 60 sec までは約 70 Mbps となる。

図 4 より、UDP トラフィックのレートに応じて変動するネットワークの利用可能帯域の推定値に追随し、高い精度の計測結果が得られていることが分かる。また、図 4(a) の 25 sec 付近、および図 4(b) の 25 sec、35 sec 付近で急激に計測値が大きくなっているが、これは実網において非常に生存時間の短い TCP コネクションがバースト的に混入したためと考えら

れる。これは、生存時間の短い TCP コネクションのためにボトルネックリンクのバッファにおいてキューイングが発生すると、ImTCP のパケット群もキューイングされ、ImTCP が送信側で設定したパケット間隔が縮小することにより、計測結果が実際の空き帯域に比べて大きくなるためである。このような生存時間の短い TCP コネクションは Web ドキュメント転送などに代表されるように、インターネットでは多く存在するが、図 4 に示すように、計測結果を平滑化することによって、このような瞬間的な変動を除去することができる。また、ここで得られた結果は、[15] における実験室ネットワークにおける性能評価とほぼ同じ精度を示している。

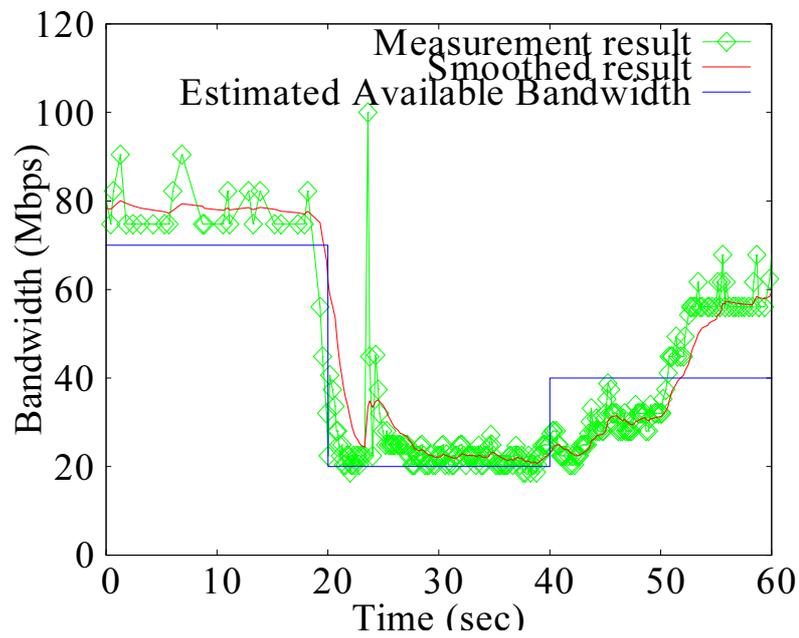
4.1.2 クロストラヒックが TCP トラヒックの場合

次に、クロストラヒックとして TCP トラヒックが存在している場合について、4.1.1 節と同様に ImTCP の計測精度の評価を行う。

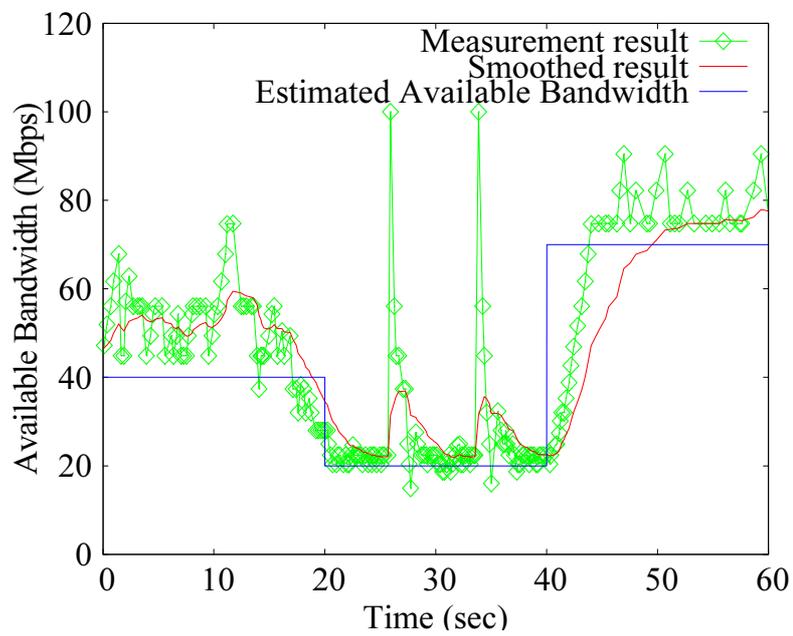
TCP コネクションは通常、受信バッファサイズを十分大きく設定している場合、ネットワークの空き帯域を使い切る性質を持つ。そこで、背景トラヒックを構成する TCP コネクションの受信側バッファサイズを 12.5 Kbytes に設定することで、1 本あたりのスループットが約 5 Mbps に制限されるようにする。本節の実験では TCP コネクションの本数を変化することによって利用可能帯域の推定値を変化させた。図 5 に示す実験は以下のシナリオにしたがっている。

パターン 1：0 sec から 30 sec までは 0 本、30 sec から 40 sec で 1 秒おきに合計 10 本の TCP コネクションを確立、40 sec から 90 sec までは 10 本とする。したがって、利用可能帯域は 0 sec から 30 sec までは約 70Mbps、30 sec から 40 sec で約 70Mbps から約 20Mbps まで減少、40 sec から 90 sec までは約 20Mbps となる。

パターン 2：0 sec から 30 sec までは 10 本、30 sec から 40 sec で 1 秒おきに合計 10 本の TCP コネクションを切断、40 sec から 90 sec までは 0 本とする。したがって、利用可能帯域は 0 sec から 30 sec までは約 20Mbps、30 sec から 40 sec で約 20Mbps から約 70Mbps まで増加、40 sec から 90 sec までは約 70Mbps となる。



(a) パターン 1



(b) パターン 2

図 4: ImTCP 計測結果 (クロストラヒックがUDP の場合)

図 5 は、このシナリオに従った場合の経過時間に対する ImTCP の計測結果、平滑化された計測結果の変化、および利用可能帯域の推定値を示したものである。図 5 より、TCP トラフィックの変動により変化した利用可能帯域の推定値を高い精度で計測できていることがわかる。また、ImTCP の計測結果が 4.1.1 節と同程度の精度を示していることがわかる。このことから、クロストラフィックが TCP トラフィックの場合においても ImTCP はシミュレーション環境、および実験室ネットワーク環境と同様の高い精度で計測を行うことができることが分かる。以上より、[8] で示された計測アルゴリズムが実インターネット環境においても有効であることが示された。

4.2 ImTCP-bg の性能評価

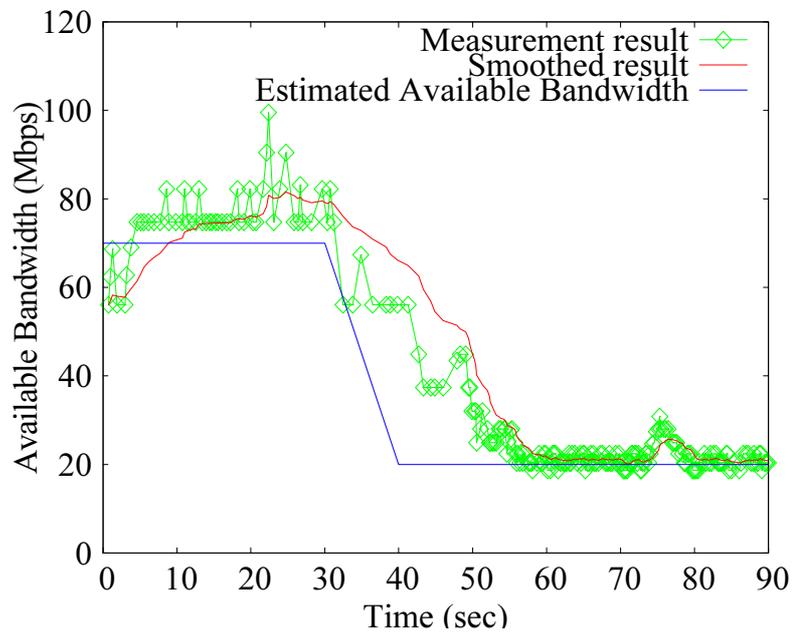
本節においては、クロストラフィックとして TCP トラフィックを発生させたネットワーク環境下で ImTCP-bg を用いたバックグラウンド転送を行い、その性能の評価を行う。

4.2.1 実験方法

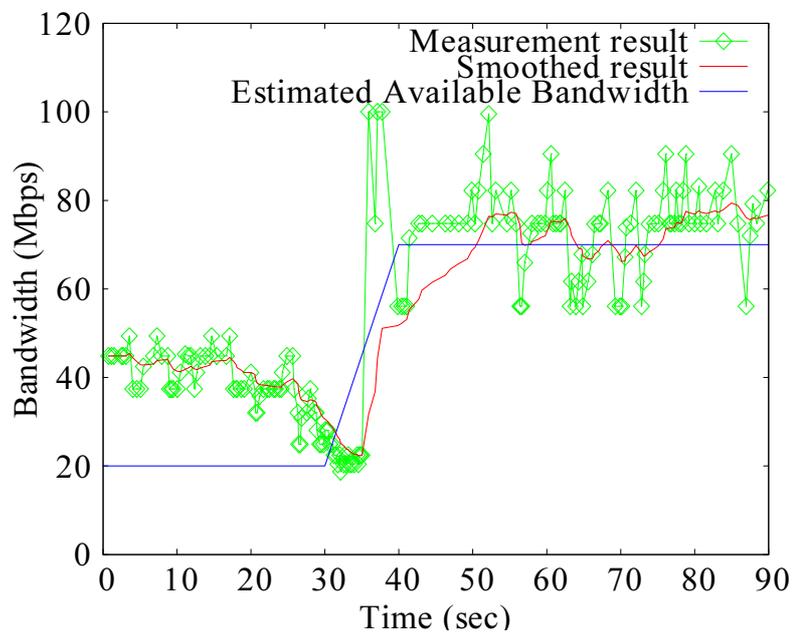
TCP コネクションを用いたクロストラフィックは、4.1.2 節における実験と同様に、受信側ウィンドウサイズを 17.5 Kbytes に制限することによって、TCP コネクション 1 本あたりのスループットを約 7 Mbps に設定し、本数を変動させることによってトラフィックを変動させる。最大 10 本の TCP コネクションを用いてクロストラフィックのスループットを約 70 Mbps とすることで、推定されるネットワーク帯域のほとんどを使用することができる。本節においては、以下のシナリオにしたがって実験を行った。

パターン 1 : 0 sec から 60 sec までは クロストラフィックはなし、60 sec から 120 sec までは TCP コネクションを 5 本用いて 35Mbps、120 sec から 180 sec までは TCP コネクションを 10 本用いて 70Mbps、180 sec から 300 sec までは TCP コネクションを 5 本用いて 35Mbps とした。ImTCP-bg トラフィックは 0 sec から 240 sec までパケットを送信する。

パターン 2 : 0 sec から 120 sec TCP コネクションを 5 本用いて 35Mbps、120 sec から 180 sec までは TCP コネクションを 10 本用いて 70Mbps、180 sec から 240 sec までは TCP コネク



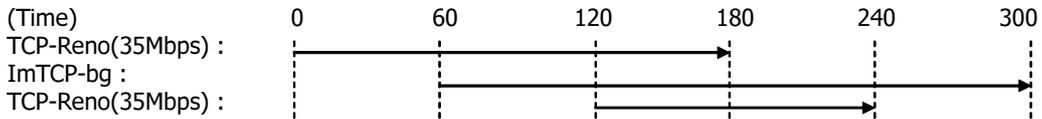
(a) パターン 1



(b) パターン 2

図 5: ImTCP 計測結果 (クロストラヒックが TCP の場合)

●パターン1



●パターン2

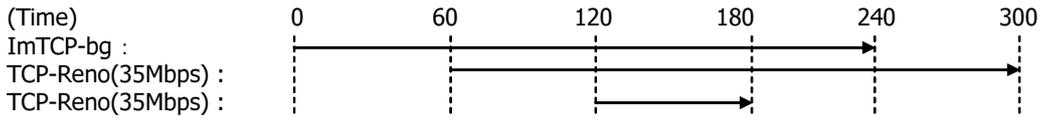


図 6: 実験タイムチャート

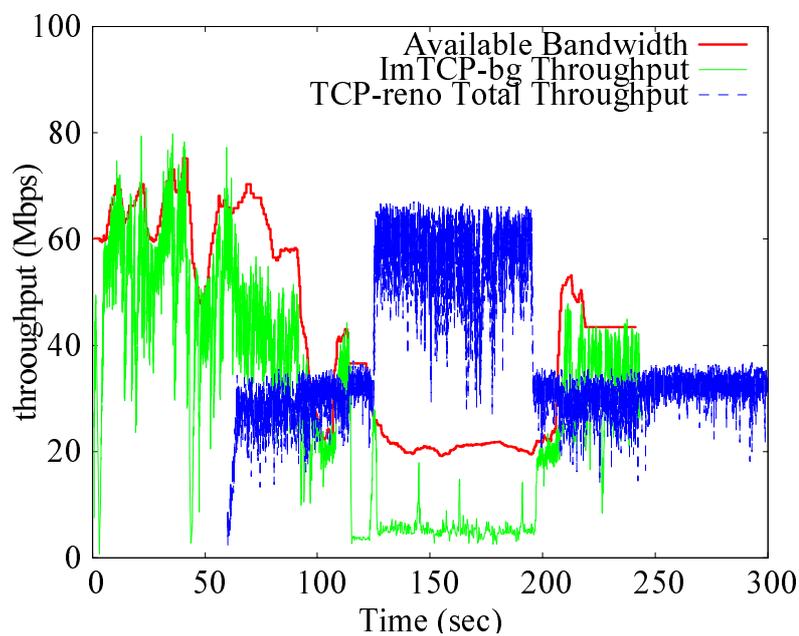
ションを 5 本用いて 35Mbps とした。ImTCP-bg トラヒックは 60 sec から 300 sec までパケットを送信する。

また、ImTCP-bg の比較として既存のバックグラウンド転送手法である TCP-LP [14] を用いる。TCP-LP の実装コードは Web サイト上 (<http://www-ece.rice.edu/networks/TCP-LP/>) で公開されている。以上の実験により、ImTCP-bg がバックグラウンド転送に求められる以下の二つの性質を満たしているかどうかを確認することでその評価を行う。

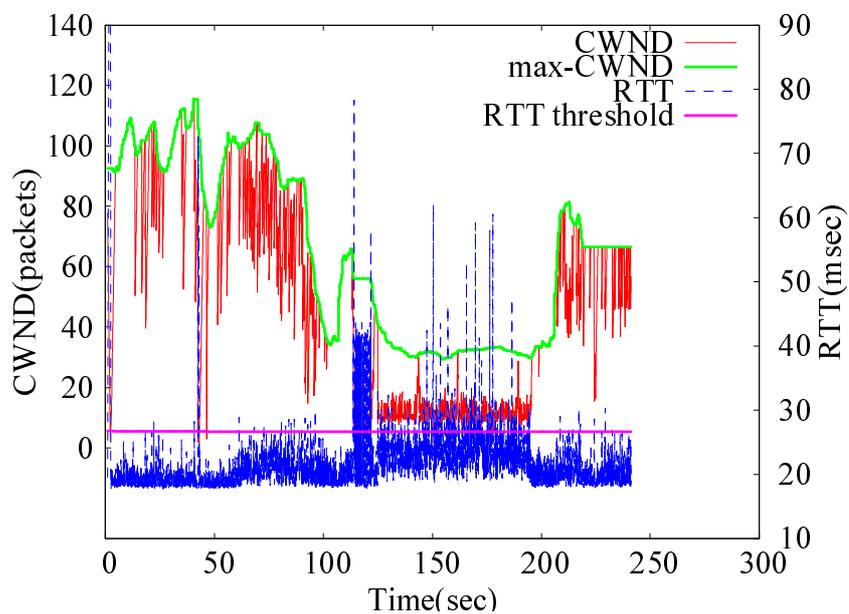
1. 他のトラヒックに影響を与えない
2. ネットワークで利用可能な帯域を有効に利用する

4.2.2 実験結果

図 7 および図 8 に、ImTCP-bg の実験結果を示す。図 7(a) および図 8(a) はクロストラヒック (TCP Reno) および ImTCP-bg コネクションのスループット、利用可能帯域の計測結果、および利用可能帯域の推定値を示している。図 7(b) および図 8(b) は ImTCP-bg のウィンドウサイズ、最大ウィンドウサイズ、RTT、および輻輳制御に用いる RTT の閾値の変化を示している。

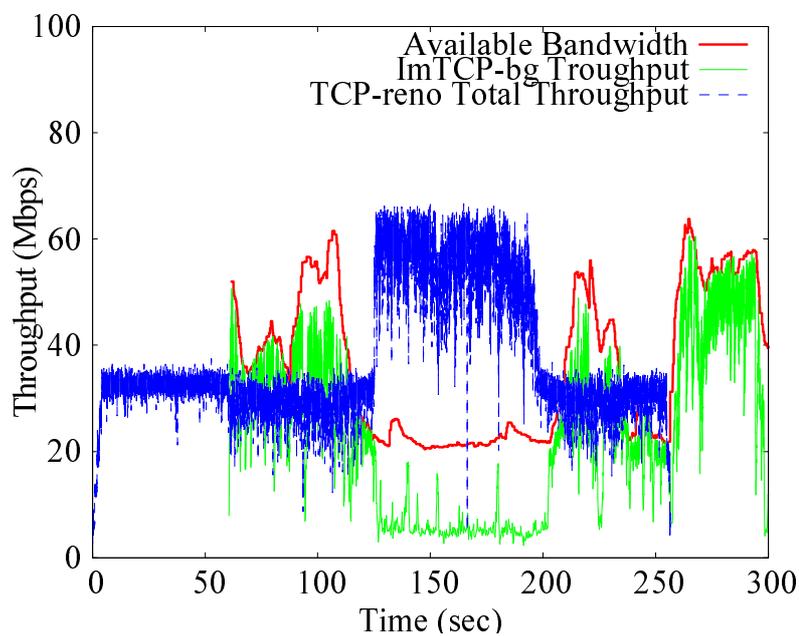


(a) スループットおよび利用可能帯域の推定値の計測結果

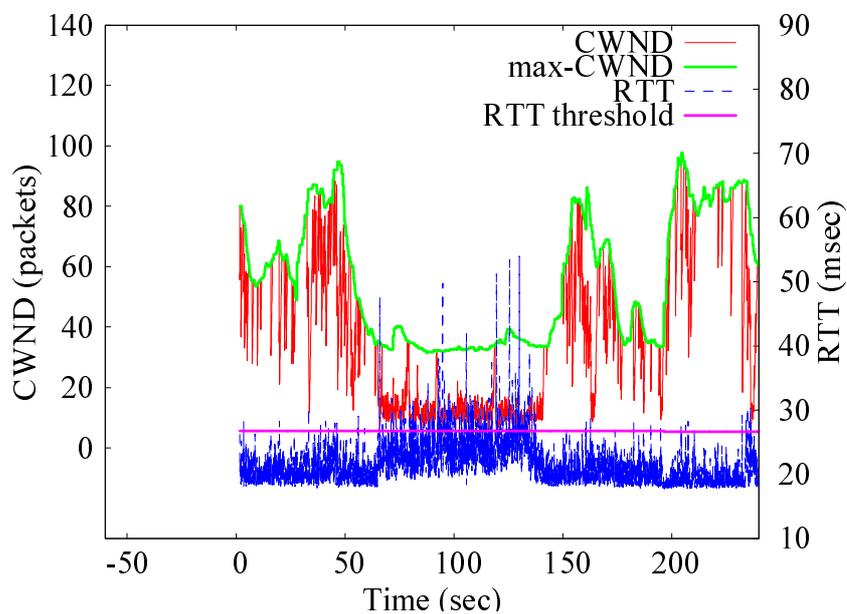


(b) ウィンドウサイズおよび RTT

図 7: ImTCP-bg 計測結果:パターン 1



(a) スループットおよび利用可能帯域の計測結果

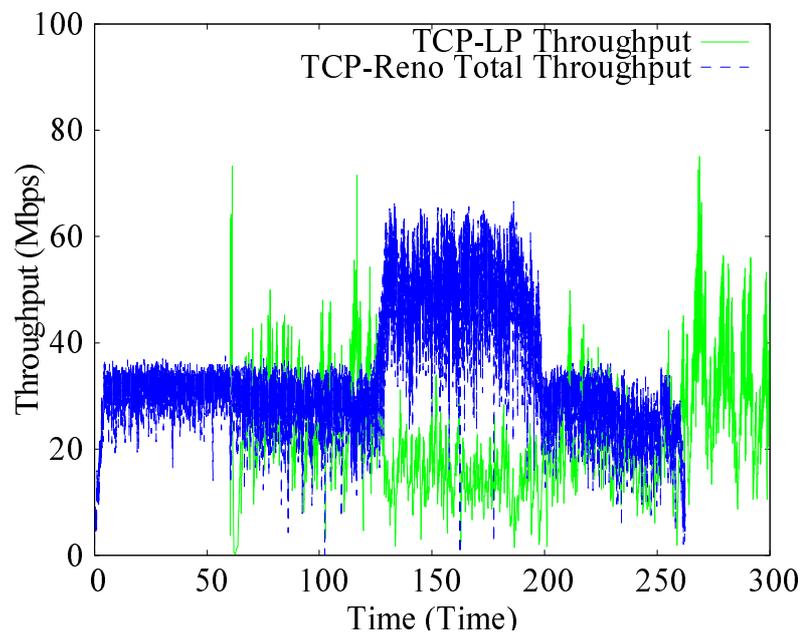


(b) ウィンドウサイズおよび RTT

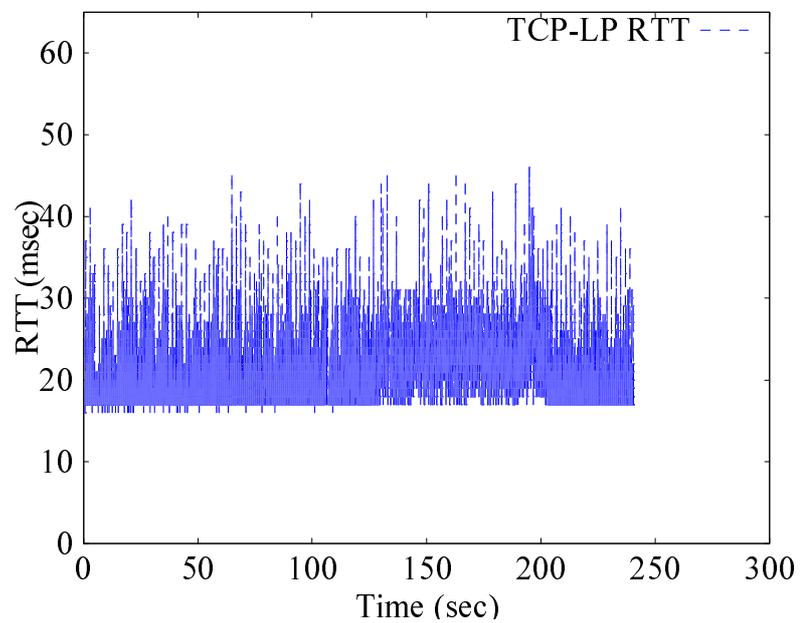
図 8: ImTCP-bg 計測結果:パターン 2

図 7(a) の 60 sec から 120 sec、および図 8(a) の 0 sec から 120 sec おいて、ImTCP-bg コネクションが利用可能帯域の推定値の計測結果に応じたスループットを獲得できていることが確認できる。また、図 7(a)、および図 8(a) の 120 sec から 180 sec において、クロストラヒックのレートが約 70 Mbps とネットワーク帯域とほぼ等しいにもかかわらず、ImTCP の計測結果が約 20 Mbps と大きくなっている。しかし、ImTCP-bg のスループットは計測結果に比べて低い。これは、図 7(b) および図 8(b) に示すように RTT が大きくなっているために、ImTCP-bg が RTT を用いた輻輳制御を行い、スループットを下げることでクロストラヒックに対する影響を少なくしているためである。

図 9 および図 10 に、TCP-LP の実験結果を示す。図 9(a) および図 10(a) はクロストラヒックおよび TCP-LP コネクションのスループットを示す。図 9(b) および図 10(b) は TCP-LP の RTT の変化を示している。図 9(a) および図 10(a) の 120 sec から 180 sec において、クロストラヒックがネットワーク帯域の推定値をほぼ使い切っていると考えられる状況においても TCP-LP のスループットは約 10 Mbps であり、クロストラヒックのスループットが低下していることがわかる。しかしながら、実験ネットワークにおける TCP-LP の評価結果 [12] では、利用可能帯域の推定値がほとんど存在しない場合には、TCP-LP はウィンドウサイズを十分小さくし、スループットを低く抑えることが確認されている。これは、実ネットワークで発生している RTT の変動が悪影響を与えているためであると考えられる。そのため、TCP-LP を実ネットワークで使用する際には、RTT の閾値を大きくするなどのパラメータ調整を行い、RTT の揺れを吸収する必要があると考えられる。

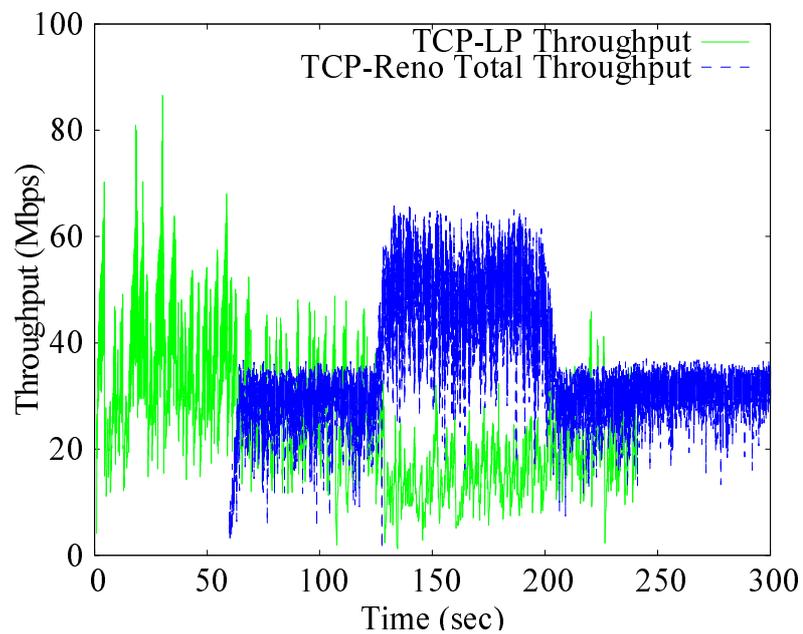


(a) スループット

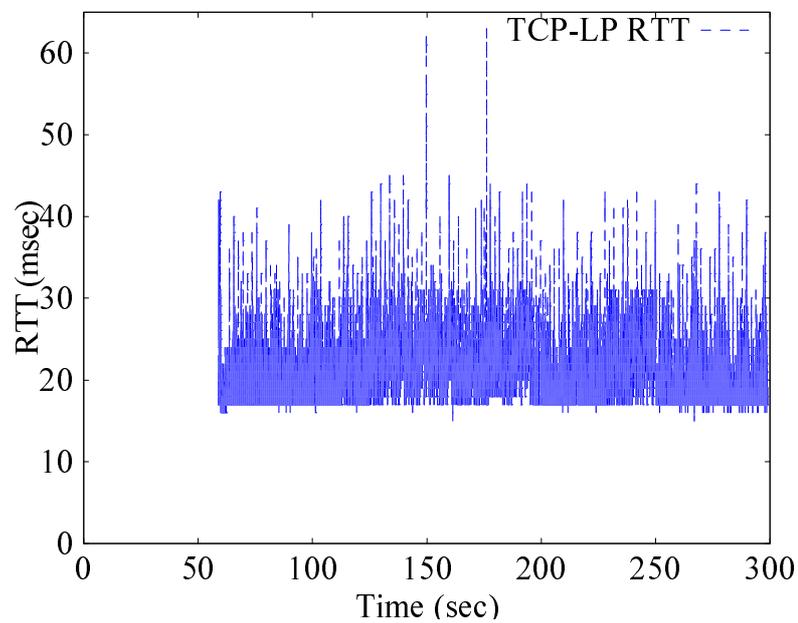


(b) *RTT*

図 9: TCP-LP 計測結果:パターン 1



(a) スループット



(b) *RTT*

図 10: TCP-LP 計測結果:パターン 2

5 おわりに

本報告では、我々の研究グループがこれまでに提案したインラインネットワーク計測手法 ImTCP およびその計測結果に基づいたバックグラウンド転送方式である ImTCP-bg の有効性を、公衆インターネット環境におけるデータ転送実験を通じて検証した。その結果、ImTCP の計測精度や ImTCP-bg の他のトラヒックに与える影響の大きさに関して、シミュレーション、および実験室ネットワークにおける評価結果と同等の有効性があることを示した。なお、ImTCP および ImTCP-bg の実装コードは Web サイト上 (<http://www.anarg.jp/imtcp/>) で公開している。

今後の課題としては、高速・高遅延ネットワーク環境における提案手法の評価、およびインラインネットワーク計測手法の計測結果に基づいた応用手法の提案、実装、および評価が挙げられる。

謝辞

本報告を終えるにあたり、御指導、御教授を頂きました中野博隆教授に深く感謝致します。並びに御指導、御教授を頂きました村田正幸教授に深く感謝致します。また本報告の作成にあたり、終始熱心に指導および助言を頂きました長谷川剛助教授に深く感謝致します。並びに的確な助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科若宮直紀助教授、大阪大学サイバーメディアセンター笹部昌弘助手、大阪大学大学院経済学研究科荒川伸一助手に心から感謝致します。また、インラインネットワーク計測手法の実験評価に関し、様々な助言を頂きました NEC システムプラットフォーム研究所の村瀬勉様、下西英之様、浜崇之様に心から感謝致します。また本報告を執筆するにあたり、大阪大学の Cao Le Thanh Man および津川知朗の両氏に的確な助言を頂きました。ここに記して謝意を示します。最後に、日頃から操短に答えて頂きました中野研究室および村田研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] G. Pierre and M. van Steen, “Design and implementation of usercentered content delivery network,” in *Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Internet Applications*, June 2003.
- [2] Akamai Home Page. available at <http://www.akamai.com/>.
- [3] A. Rao, K. Lakshminarayanan, S. Surana, and I. Stoica, “Load balancing in structured P2P systems,” in *Proceedings of IPTPS 2003*, Feb. 2003.
- [4] F. Dabek, B. Zhao, P. Druschel, J. Kubiatowicz, and I. Stoica, “Towards a common API for structured peer-to-peer overlays,” in *Proceedings of IPTPS 2003*, Feb. 2003.
- [5] K. Czajkowski, S. Fitzgerald, I. Foster, and C. Kesselman, “Grid information services for distributed resource sharing,” in *Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on High-Performance Distributed Computing (HPDC-10)*, Aug. 2001.
- [6] Y. Zhao and Y. Hu, “GRESS – a grid replica selection service,” in *Proceedings of the 15th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS-2003)*, Aug. 2003.
- [7] J. Jha and A. Sood, “An architectural framework for management of IP-VPNs,” in *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, Sept. 1999.
- [8] M. L. T. Cao, G. Hasegawa, and M. Murata, “Available bandwidth measurement via TCP connection,” in *Proceedings of IFIP/IEEE MMNS 2004 E2EMON Workshop*, Oct. 2004.

- [9] M. Jain and C. Dovrolis, "End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput," in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002*, Aug. 2002.
- [10] V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, "pathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths," in *Proceedings of NLANR PAM 2003*, Apr. 2003.
- [11] N. Hu and P. Steenkiste, "Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, Aug. 2003.
- [12] T. Tsugawa, G. Hasegawa, and M. Murata, "Background TCP data transfer with inline network measurement," in *Proceedings of APCC 2005*, Oct. 2005.
- [13] A. Venkataramani, R. Kokku, and M. Dahlin, "TCP Nice: A mechanism for background transfers," in *Proceedings of OSDI 2002*, Dec. 2002.
- [14] A. Kuzmanovic and E. W. Knightly, "TCP-LP: A distributed algorithm for low priority data transfer," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003.
- [15] T. Tsugawa, G. Hasegawa, and M. Murata, "Implementation and evaluation of an inline network measurement algorithm and its application to TCP-based service," in *Proceedings of IFIP/IEEE NOMS 2006 E2EMON Workshop (to appear)*, Apr. 2006.
- [16] The VINT Project, "UCB/LBNL/VINT network simulator - ns (version 2)." available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [17] FreeBSD Home Page. available at <http://www.freebsd.org/>.
- [18] M. L. T. Cao, G. Hasegawa, and M. Murata, "A new available bandwidth measurement technique for service overlay networks," in *Proceedings of IFIP/IEEE MMNS 2003 E2EMON Workshop*, Sept. 2003.

- [19] R. L. Carter and M. E. Crovella, "Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks," *International Journal on Performance Evaluation*, vol. 27–28, pp. 297–318, Oct. 1996.