

インライン計測に基づく TCP によるバックグラウンド転送方式

津川 知朗[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 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 豊中市待兼山町 1-32

E-mail: [†]{t-tugawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 本稿では、データ転送のためのパケット以外に計測用パケットを必要としないインラインネットワーク計測によって得られる計測結果を用いて、従来の TCP よりも優先度の低いデータ転送を実現する新たなバックグラウンド転送方式を提案する。具体的には、送信ホストと受信ホスト間のネットワークパスの利用可能帯域に関する情報をインライン計測によって取得し、その計測結果を基に送信側 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。ネットワーク状態を高い精度で推測して輻輳制御を行うことによって、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。シミュレーションによる性能評価を通して、提案方式がフォアグラウンドトラフィックへの影響度や帯域の利用率に関して従来のバックグラウンド転送方式よりも優れた性質を持つことを示す。

キーワード バックグラウンド転送, インライン計測, 輻輳制御, 利用可能帯域, TCP

ImTCP-bg: Background TCP data transfer with inline network measurement

Tomoaki TSUGAWA[†], Go HASEGAWA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka 565-0871 Japan

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

E-mail: [†]{t-tugawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract In this paper, we propose ImTCP-bg, a new background TCP data transfer mechanism by using an inline network measurement technique. ImTCP-bg sets an upper limit of the congestion window size of the sender TCP based on the results of the inline network measurement of available bandwidth of the network path between the sender and receiver hosts. ImTCP-bg can provide a background data transfer without affecting the foreground traffic, whereas the previous methods can not avoid the network congestion essentially. We investigate the performance of ImTCP-bg through simulation experiments, and we validate the effectiveness of ImTCP-bg in terms of interference with foreground traffic and the link utilization.

Key words background data transfer, inline network measurement, congestion control, available bandwidth, TCP

1. はじめに

現在のインターネットにおけるサービスの中には、優先度の異なるデータ転送を実現することにより、サービス品質を向上することができるものが存在する。例えば Akamai [1] のような Contents Delivery Network (CDN) [2] 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発生するデータの転送を行っている [3, 4]。この時、ユーザからのコンテンツ閲覧要求に対するデータ転送に高い優先度を、またバックアップ等のデータ転送に低い優先度を設定することにより、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。

しかし、現在インターネットにおけるトランスポート層のプロトコルとして広く用いられている TCP Reno を用いて優先度の異なるデータ転送を実現するのは非常に難しいと考えられる。これは、TCP Reno の輻輳制御機構 [5] の基本的な性質が原因である。TCP Reno は、送信側端末が持つ輻輳ウィンドウサイズを動的に増減させることで、ネットワークの輻輳状況に応じたデータ転送速度の調節を行っている。しかしそのアルゴリズムは、ネットワーク内でパケット廃棄が発生しない限り輻輳ウィンドウサイズを線形的に増加させ続け、パケット廃棄が発生すると輻輳ウィンドウサイズ半減させるというものであるため、周期的な輻輳の発生およびパケット廃棄を避けることができない。有線ネットワークにおいて輻輳が発生すると、通常ルータの出力リンクバッファにパケットが蓄積され、最終的に

バッファ溢れによるパケット廃棄が発生する。そのため、そのリンクを通過するすべてのフローのネットワーク内での遅延時間の増大、およびそれに続くパケット廃棄を引き起こす。すなわち、従来の TCP を用いてバックグラウンド転送を行うことは、優先されるべきフォアグラウンド転送にも大きな影響を与える。

優先度の異なるデータ転送を実現する方法のひとつとして、IP ネットワークに新しい機構を組み込む DiffServ [6] のような手法が考えられる。しかしながら、IP レイヤにおける機能拡張手法の多くは、トラヒックが通過するネットワーク内のすべてのルータが対応している必要があるため、現在のインターネットにおいて適用することは、ネットワーク規模に対するスケラビリティの面で非常に困難であるといえる。したがって、そのような制限なしに優先度の異なるデータ転送を実現する為には、エンドホストのみで実現する必要があると考えられる。

エンドホストでの制御方法として、アプリケーションがデータ転送に優先度を与える方法が考えられる [7]。この場合、データ転送速度はトランスポート層プロトコルである TCP の制御によって決定されるため、データ転送の発生頻度を調整することが考えられるが、ネットワークの輻輳状態を考慮したパラメータ設定を行うことは困難である。すなわち、このような優先度を考慮したデータ転送は、トランスポート層プロトコルで実現することがもっとも望ましいと考えられる。

そこで本稿では、既存の TCP よりも優先度の低いバックグラウンド転送方式を提案することによって、インターネットにおける優先度の異なるデータ転送を実現する。提案方式は、インライン計測によってエンド端末間のネットワークの利用可能帯域の計測を行い、計測結果を TCP の輻輳ウィンドウサイズの制御へ利用することで、フォアグラウンド転送に影響を与えず、かつ空き帯域を可能な限り使用するバックグラウンド転送を行う。

以下、2 章ではバックグラウンド転送の目的、および既存のバックグラウンド転送方式の問題点を挙げ、その改善方法に関する議論を行う。3 章では、インライン計測に基づく新たなバックグラウンド転送方式を提案し、その特性について議論する。4 章では、シミュレーションにより提案方式の性能を評価する。最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を示す。

2. バックグラウンド転送

最も簡単にバックグラウンド転送を実現する方法として、輻輳ウィンドウサイズを非常に小さな値 (例えば 1 パケット) に固定してデータ転送を行う方法が挙げられる。これにより、フォアグラウンドトラヒックへ与える影響を小さく抑える事ができる。しかしながらこの方法では、ネットワークの利用率が低く、利用可能帯域が大きい場合にはその帯域を有効に利用できない。すなわちバックグラウンド転送は、

- (1) フォアグラウンド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

という 2 つの性質を持つことが重要である。

これまでに行われてきたトランスポート層におけるバックグラウンド転送に関する研究の多くは、(1) に主眼が置かれている。例えば TCP Nice [8] や TCP-LP [9] では、TCP コネクションが転送するデータパケットのラウンドトリップ時間 (RTT) を輻輳の指標として用いている。これは、前述のようにネットワークの輻輳はまず遅延時間の増大が発生し、その後パケット廃棄が発生するという仮定を基にした手法である。すなわち、RTT の増大を契機として輻輳ウィンドウサイズを減少させることで、パケット廃棄が発生するまで輻輳ウィンドウサイズを減少させない TCP Reno よりも早くネットワークの輻輳に反応することができるため、TCP Reno よりも優先度の低いデータ転送を実現することができる。

しかしながら [8, 9] において提案されているバックグラウンド転送方式においては、輻輳を検知した際にその輻輳の大きさ

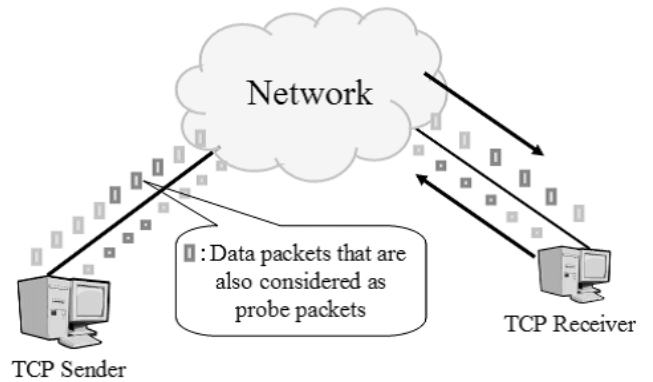


図 1 ImTCP によるインラインネットワーク計測

に関係なく輻輳ウィンドウサイズを一定量だけ減少させる。さらに、フォアグラウンドトラヒックへ影響を与えないという目的を達成する為には、その減少量が大きく設定されている。そのため、ネットワークで利用可能な帯域を十分に利用する事ができない。また、バックグラウンド転送の性質 (フォアグラウンドトラヒックへ与える影響および空き帯域の利用率) を決定する制御パラメータの設定が難しいという問題も存在する。

これらの問題点の原因は、TCP がエンドホスト間のパス上で利用可能な帯域を知る為の効率的な方法を持たないという事に起因すると考えられる。したがって、TCP が何らかの方法を用いて、エンドホスト間のパスで利用可能な帯域に関する情報を素早く、高い精度で取得できるのなら、その情報を基にして、上記 2 つの性質を満たすバックグラウンド転送を実現することができると考えられる。

ネットワークパスの利用可能帯域を計測する為の方法は、これまでに数多く提案されている [10–12]。しかしながら、それらの多くは計測を行う際に大量の計測用パケットを必要とし、計測結果を導出するまでに長い時間を必要とする。そのため、それらの方法を直接 TCP の輻輳制御に適用する事はできない。そこで我々の研究グループでは、これらの問題点を改善した Inline Measurement TCP (ImTCP) と呼ばれるインラインネットワーク計測手法を提案している [13, 14]。ImTCP が行うインライン計測は、図 1 に示すように、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 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アクティブ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。

本稿では、ImTCP によって取得できるネットワークパスの利用可能帯域の情報を利用した、新たなバックグラウンド転送方式 ImTCP-bg (ImTCP background mode) を提案する。

3. インライン計測に基づくバックグラウンド転送方式 ImTCP-bg

3.1 基本アルゴリズム

本稿では、インライン計測によって利用可能帯域を計測する ImTCP をベースに、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。具体的には、計測結果を基に送信側 TCP が持つ輻輳ウィンドウサイズの上限値を動的に設定する。

まず、インライン計測によって取得されたネットワークの利用可能帯域に対して、平滑化を行う。平滑化をインライン計測によって取得された最新のネットワークの利用可能帯域、 A を平滑化が行われたネットワークの利用可能帯域とすると、 \bar{A} は平滑化パラメータ γ を用いて次のような指数移動平均の式を用

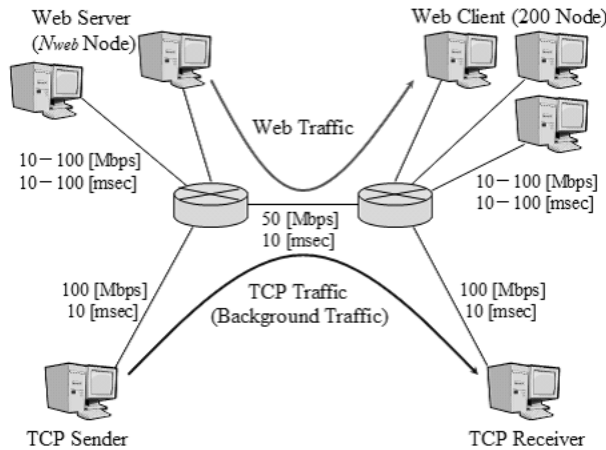


図 2 ネットワークモデル

いて求める．

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

次に、送信側 TCP の最大輻射ウィンドウサイズ ($\langle maxcwnd \rangle$) を、次式によって決定する．

$$\langle maxcwnd \rangle = \bar{A} \times RTT_{min} \quad (2)$$

ここで、 RTT_{min} は、今までに計測された RTT の最小値を表す．

3.2 計測誤差，計測失敗に対する対応

ImTCP はそのアルゴリズムの性質上、利用可能帯域の計測を行うことができない場合がある．例えば、輻射ウィンドウサイズが小さいために計測を行うために必要なデータパケットを確保することができない場合である．また、計測を行うことができる場合においても、その計測結果が不正確である場合もある．特に、複数の ImTCP コネクションがネットワーク内に存在し、それらのコネクションが利用可能帯域の計測を同時に行う場合には、計測結果が実際の利用可能帯域の値よりも大きくなる．これは、TCP がバースト的にパケットを送信する性質を持つことが原因である．すなわち、複数の TCP コネクションが 1 つのリンクを共有してデータ転送を行っている場合においても、TCP はバースト的にパケットを送信するため、それらのコネクションからのパケットが混ざらずに、それぞれのコネクションのパケットが固まってリンクを通過する傾向があるためである．そのため、複数本の ImTCP コネクションが存在する環境においては、1 本の ImTCP コネクションのみが存在する場合と同じ計測結果を、すべてのコネクションが得ることになる．したがって、それをそのまま輻射ウィンドウサイズの制御に用いると輻射ウィンドウサイズが理想的な値よりも大きくなり、フォアグラウンドトラヒックに影響を与える．そこで ImTCP-bg においては、以下のような方式により、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射ウィンドウサイズが大きくなっている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射が発生する．そこで、出力リンクバッファにパケットが蓄積されている場合には、最大輻射ウィンドウサイズは変化させずに輻射ウィンドウサイズを強制的に減少させることによって、輻射回避を行う．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．現在の RTT の値を RTT_{cur} 、これまでに計測された 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．

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

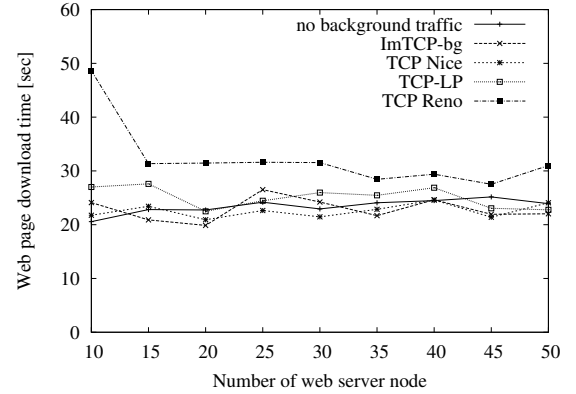


図 3 Web サーバノード数に対する Web ページの平均ダウンロード時間の変化

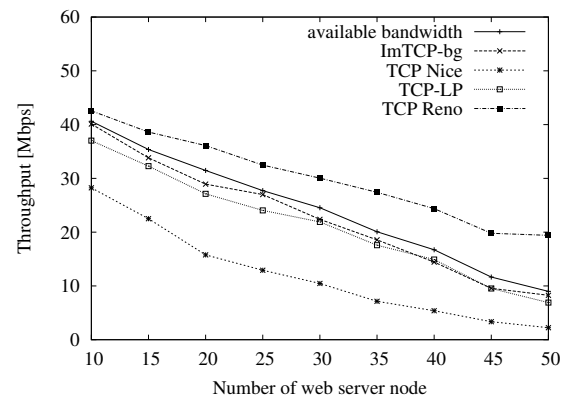


図 4 Web サーバノード数に対するバックグラウンドトラヒックのスループットの変化

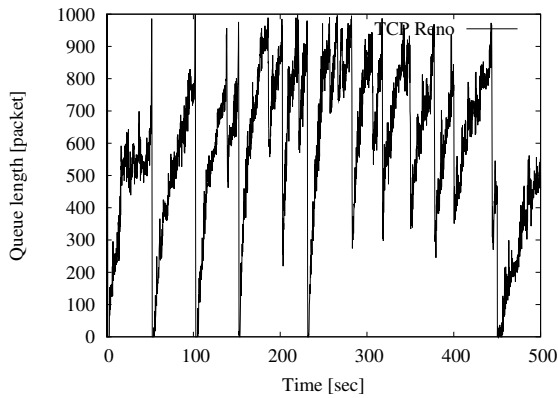
ここで、 δ はしきい値を表し 1.0 以上の値である．(3) 式が真となり出力リンクバッファにパケットが蓄積されていると判断されると、現在の輻射ウィンドウサイズ ($\langle cwnd \rangle$) を次式を用いて減少させる．

$$\langle cwnd \rangle = \langle cwnd \rangle \times \frac{RTT_{min}}{RTT_{cur}} \quad (4)$$

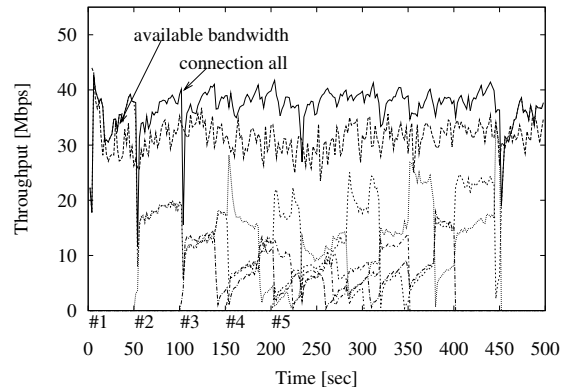
4. シミュレーションによる評価

本章では、3 章で提案したバックグラウンド転送方式の性能をシミュレーションにより評価する．シミュレーションは、ns-2 [15] を用いて行った．提案方式の比較対象として、TCP Reno, TCP Nice, 及び TCP-LP を用いた．提案方式のパラメータは $\gamma = \frac{1}{8}$, $\delta = 1.5$ とし、TCP Nice 及び TCP-LP のパラメータはそれぞれ [8] 及び [9] において示されているものを用いる．

シミュレーションに用いるネットワークモデルを図 2 に示す．ボトルネックリンクの帯域を 50Mbps、伝播遅延時間を 10msec とし、バッファサイズは 1000 パケットとする．フォアグラウンドトラヒックとして Web トラヒックを想定し、 N_{web} 台の Web サーバノードが 200 台の Web クライアントノードからのリクエストを受けてデータ転送を行う．Web クライアントは、最大 N_{web} の Web ページが同時にダウンロードされるようにリクエストを送る．さらに、バックグラウンド転送を行うための TCP コネクションを設定する．また、性能評価指標として、フォアグラウンドトラヒックへの影響度と帯域の利用率を用いる．フォアグラウンドトラヒックへの影響度として、フォアグラウンドトラヒックとして転送されている Web ページのダウンロード時間を用いる．帯域の利用率としては、バックグラウ

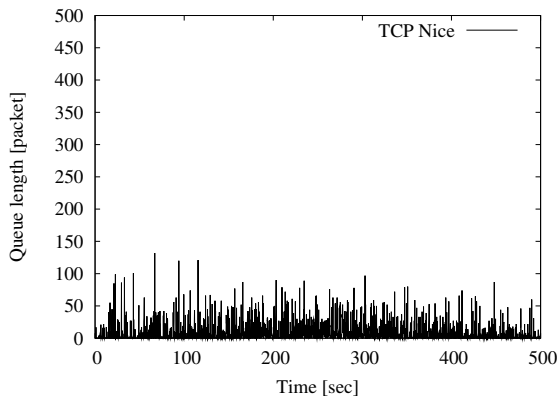


(a) ボトルネックルータのキュー長

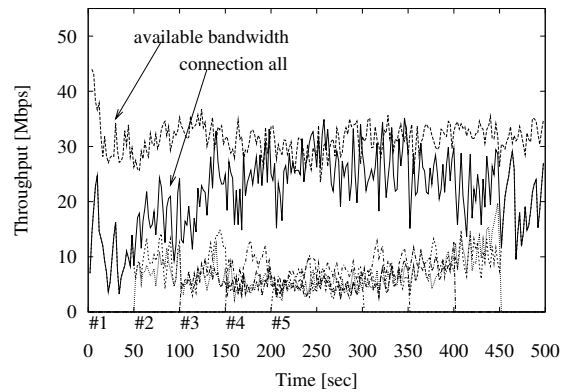


(b) バックグラウンドトラフィックのスループット

図 5 TCP Reno を用いた場合

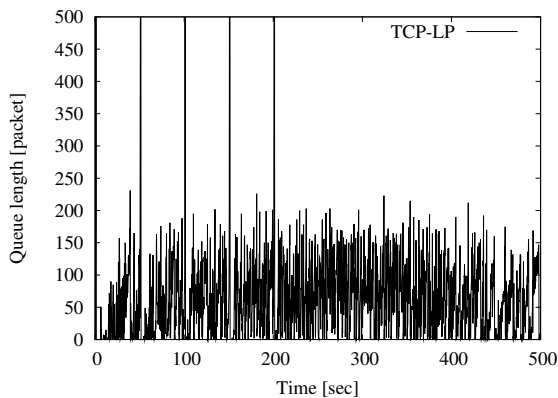


(a) ボトルネックルータのキュー長

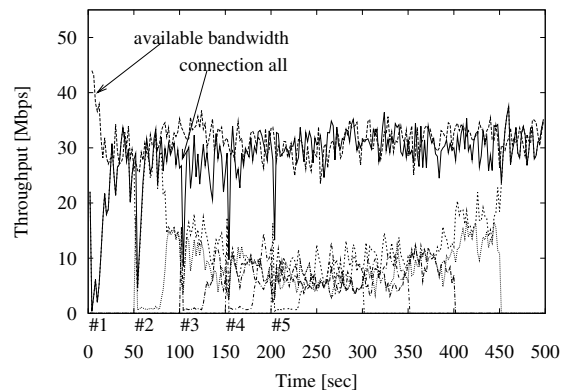


(b) バックグラウンドトラフィックのスループット

図 6 TCP Nice を用いた場合



(a) ボトルネックルータのキュー長



(b) バックグラウンドトラフィックのスループット

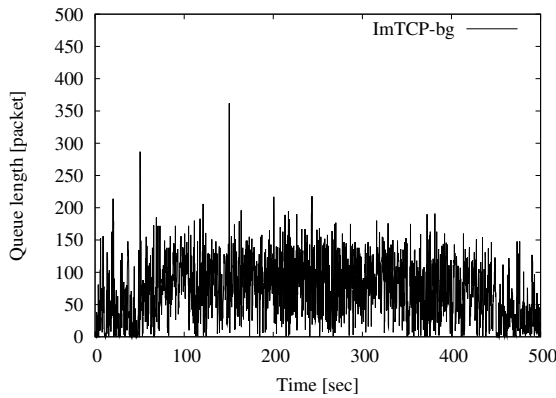
図 7 TCP-LP を用いた場合

ンドトラフィックのスループットを用いる。

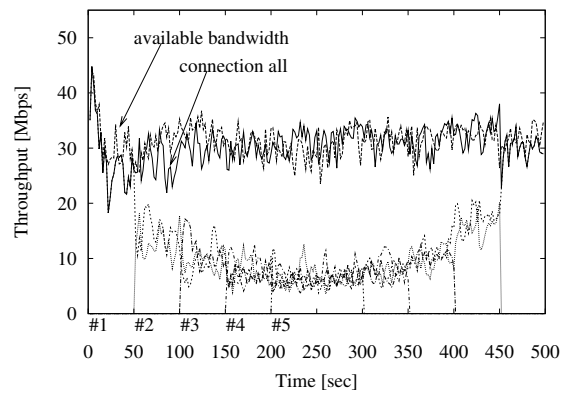
4.1 1本のバックグラウンド転送の評価

まず、1本のバックグラウンド転送のコネクションが設定されている場合についてのシミュレーションを行い、フォアグラウンドトラフィックへの影響度と帯域の利用率に関して評価を行

う。ここでは、Webサーバノード数 N_{web} は、10から50まで変化させる。図3、図4は、それぞれTCP Reno、TCP Nice、TCP-LP、およびImTCP-bgにおける、Webサーバノード数に対するWebページの平均ダウンロード時間とバックグラウンドトラフィックのスループットの変化を表している。図3の

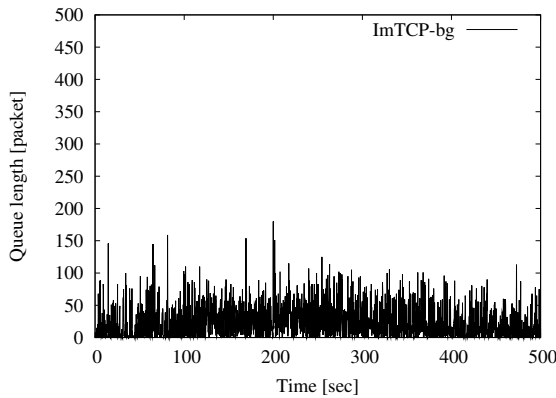


(a) ボトルネックルータのキュー長

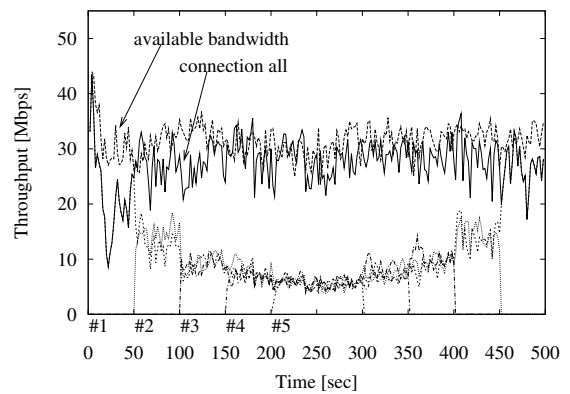


(b) バックグラウンドトラフィックのスループット

図 8 ImTCP-bg を用いた場合 ($\delta = 1.5$)



(a) ボトルネックルータのキュー長



(b) バックグラウンドトラフィックのスループット

図 9 ImTCP-bg を用いた場合 ($\delta = 1.2$)

no background traffic, および図 4 の available bandwidth は, バックグラウンド転送が存在せず, フォアグラウンド転送のみが存在する場合の, フォアグラウンドトラフィックの Web ページのダウンロード時間, およびネットワークの空き帯域の平均値を現している.

図 4 から, TCP Reno を用いた場合にもっとも高いバックグラウンド転送のスループットが得られていることが分かる. しかし, 図 3 に示されているように, バックグラウンドトラフィックが何も存在しない場合と比較して, Web ページの平均ダウンロード時間が増大している. すなわち, TCP Reno によるバックグラウンドトラフィックがネットワーク内に存在することで, フォアグラウンド転送に大きな影響を与えているといえる. これは, 図 4 に示すように, TCP Reno によるバックグラウンド転送が, フォアグラウンドトラフィックのみが存在する場合のネットワークの空き帯域よりも高いスループットを得ていることから明らかである. それに対して, TCP Nice, TCP-LP および ImTCP-bg を用いた場合はいずれも, Web ページの平均ダウンロード時間がバックグラウンドトラフィックが存在しない場合とほぼ同等であり, フォアグラウンドトラフィックへの影響を小さく抑えている. さらに図 4 から, ImTCP-bg を用いた場合では, これらのバックグラウンド転送方式の中で最も真の利用可能帯域に近いスループットを得ていることがわかる. すなわち, 提案手法である ImTCP-bg は, フォアグラウンドトラフィックに影響を与えず, 最も高いスループットでバックグ

ラウンド転送を実現している.

4.2 複数本のバックグラウンド転送の評価

次に, 複数本のバックグラウンド転送のコネクションが設定されている場合についてのシミュレーションを行い, フォアグラウンドトラフィックへの影響度, 帯域の利用効率, コネクション間の公平性に関して評価を行う. バックグラウンド転送の TCP コネクションは 5 本存在し, それぞれ 0, 50, 100, 150, 200 秒でデータ転送を開始し, 500, 450, 400, 350, 300 秒でデータ転送を終了する. これによりネットワークに存在するバックグラウンド転送のための TCP コネクション数が変化する. またここでは, Web サーバノード数 N_{web} は 20 に設定する. 図 5-8 は, それぞれ TCP Reno, TCP Nice, TCP-LP および ImTCP-bg ($\delta = 1.5$ および 1.2) における, 経過時間に対するボトルネックルータのキュー長とバックグラウンドトラフィックのスループットの 1 秒毎の変化を表している.

図 5 から, TCP Reno を用いた場合には, 図 3, 4 に示した結果と同様, バックグラウンドトラフィックのスループットはもっとも高い反面, フォアグラウンドトラフィックに多大な影響を与えていることがわかる. また, 図 6(a) から, TCP Nice を用いた場合にボトルネックルータのキュー長がもっとも短くなることがわかる. したがって, フォアグラウンドへの影響度に関しては TCP Nice がもっとも小さく抑えているといえる. しかし, 図 6(b) から, バックグラウンドトラフィックのスループットに関しては, 特にコネクション数が少ない時には他の方式と比較

してもっとも低いことがわかる。また図 6(a) から、ボトルネットワークのキュー長は短いが増加しているため、フォアグラウンドトラフィックへの影響がないとはいえない。これは、TCP Nice が RTT の増加を輻輳の指標として用いるため、フォアグラウンドトラフィックへの影響を完全に避けることはできないためである。

図 7(b) から、TCP-LP を用いた場合は新たなコネクションが参加したときにパケット廃棄が発生していることが分かる。これは、TCP-LP は輻輳制御のために RTT の最大値を必要とするためであると考えられる。TCP Nice および TCP-LP は、それぞれ RTT、片道遅延時間の現在値、最大値、および最小値を用いて輻輳の検知を行っている。しかし、バックグラウンド転送 RTT や片道遅延時間の最大値を計測することは本質的に難しい。そのため TCP-LP では、データ転送開始直後のスロースタートで意図的にパケット廃棄を発生させることで、RTT の最大値を計測していると考えられる。また、図 7(b) から、データ転送開始直後のスループットが低いことがわかる。これは、データ転送開始直後のスロースタートで廃棄されたパケットの再送に時間がかかっているためであると考えられる。また、図 7(a) から、ボトルネットワークのキュー長が TCP Nice に比べて大きいことがわかる。これは、スループットとフォアグラウンドトラフィックへ与える影響にトレードオフが存在し、それを決定している制御パラメータを適切な値に設定することが難しいためであると考えられる。

図 8(b) から、ImTCP-bg を用いた場合はコネクションが 1 本の時点から空き帯域を有効に利用できていることがわかる。これは、ImTCP-bg が利用可能帯域の計測を行っており、輻輳ウィンドウサイズの制御が適切に行われているためである。また、コネクションが複数存在している場合にバックグラウンドトラフィックのスループットの変動が他方式に比べて小さいこともわかる。これは、ImTCP-bg が輻輳を検知して輻輳ウィンドウサイズを減少させるときに、RTT の増加量に応じて動的に輻輳ウィンドウサイズの減少量を変化させる (式 (4)) ためであると考えられる。さらに、利用可能帯域の計測だけではなく RTT の変動も監視することにより、計測を行うコネクションが複数存在するために計測結果が不正確になる場合においても、TCP Nice や TCP-LP と同様に、コネクション間の公平性を維持している。一方、図 8(a) から、ImTCP-bg を用いた場合にボトルネットワークのキュー長が若干増加していることが分かる。これは、輻輳を検知するためのしきい値が大きい ($\delta = 1.5$) ためである。図 9(a) に示されているように、しきい値を小さくするとボトルネットワークのキュー長は短くなるが、図 9(b) に示すように、特にコネクション数が少ないときの空き帯域の利用率が低下する。すなわち、 δ の設定には TCP-LP と同様スループットとのトレードオフが存在するため、適切なパラメータ設定に関しては今後の課題である。しかし、しきい値が大きい場合においてもコネクションが 1 本の場合にボトルネットワークのキュー長が小さく、かつ利用可能帯域を使い切ることができているのは、利用可能帯域の計測結果を用いることによって、輻輳ウィンドウサイズが適切な最大値によって抑えられているためである。すなわち、提案方式においては、利用可能帯域の計測結果を利用した制御と RTT を用いた制御とがうまく組み合わせられているといえる。

5. おわりに

本稿では、インラインネットワーク計測手法を用いた新しいバックグラウンド転送方式を提案した。提案方式は、インライン計測の計測結果を用いて輻輳ウィンドウサイズの上限值を動的に決定することにより、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を実現した。シミュレーションによる性能評価を通して、提案方式がフォアグラウンドトラフィックへの影響度や帯域の利用率に関して従来のバックグラウンド転送よりも優れた性能を持つことを示した。

今後の課題としては、計測結果が不正確になった場合に、輻輳を検知する為の適切なしきい値および輻輳ウィンドウサイズの減少量を決定することや、提案方式を用いた場合のフォアグラウンドトラフィックへの影響度や帯域の利用率を実ネットワーク環境で評価を行うことが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究 (A)(2) (15200004) によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Akamai Home Page. <http://www.akamai.com/>.
- [2] 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.
- [3] L. Breslau, P. Cao, L. Fan, G. Phillips, and S. Shenker, "Web caching and zipf-like distributions: Evidence and implications," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 1999*, Mar. 1999.
- [4] A. Venkatramani, P. Yalagandula, R. Kokku, S. Sharif, and M. Dahlin, "The potential costs and benefits of long term prefetching for content distribution," *Computer Communication Journal*, vol. 25, pp. 367–375, Mar. 2002.
- [5] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. Addison-Wesley, 1994.
- [6] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An architecture for differentiated service," *RFC 2475*, Dec. 1998.
- [7] R. Kokku, P. Yalagandula, A. Venkataramani, and M. Dahlin, "NPS: A non-interfering deployable web prefetching system," in *Proceedings of the 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*, 2003.
- [8] A. Venkataramani, R. Kokku, and M. Dahlin, "TCP Nice: A mechanism for background transfers," in *Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, Dec. 2002.
- [9] A. Kuzmanovic and E. W. Knightly, "TCP-LP: A distributed algorithm for low priority data transfer," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003.
- [10] B. Melander, M. Bjorkman, and P. Gunningberg, "A new end-to-end probing and analysis method for estimating bandwidth bottlenecks," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM2000*, Nov. 2000.
- [11] M. Jain and C. Dovrolis, "End-to-end available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, Aug. 2002.
- [12] V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, "pathChirp: Efficient available bandwidth estimation for network paths," in *Proceedings of NLANR PAM2003*, Apr. 2003.
- [13] M. L. T. Cao, "A study on inline network measurement mechanism for service overlay networks." Master's thesis, Graduate School of Information Science, Osaka University, Feb. 2004.
- [14] 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.
- [15] The VINT Project, "UCB/LBNL/VINT network simulator - ns (version 2)." available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.