

異速度 TCP フロー集約リンクにおける TCP 品質推定法と帯域設計管理法

01110530 *川原亮一¹ KAWAHARA Ryoichi 01013530 石橋圭介² ISHIBASHI Keisuke
森 達哉¹ MORI Tatsuya 01009830 小沢利久³ OZAWA Toshihisa
01203040 住田修一¹ SUMITA Shuichi 1006850 阿部威郎¹ ABE Takeo

NTT サービスインテグレーション基盤研究所¹ NTT 情報流通プラットフォーム研究所² 駒澤大学経営学部³

1 はじめに

本稿では、様々な転送速度を持つ TCP フローを集約するリンク (図 1) における TCP 品質推定法を提案し、それを元に帯域設計管理法を構築する。これまでに、アクセス回線速度が均一な場合の TCP 平均ファイル転送時間は待ち行列における processor-sharing (PS) モデルで評価できることが報告されている [1]。しかし、あるリンクに集約されるアクセス回線速度は一般に不均一である。また文献 [1] では、集約リンクが輻輳していなければ各 TCP フローは常にアクセス回線速度でファイル転送が可能として扱っているが、TCP フローの実際の転送速度は、往復伝播遅延や集約リンク以外での輻輳に起因する遅延やパケット損によっても制限され、集約リンクが輻輳していなくてもアクセス回線速度を使い切れるとは限らない。さらに、これらの要因は個々のフローによって異なり、各フローの転送速度も様々となる [2]。

そこで本稿では、まず、文献 [1] の結果を元にアクセス回線速度が不均一な場合の TCP ファイル転送時間近似式を導く。次に、着目する集約リンク使用率が十分小さいときのファイル転送速度を仮想アクセス回線速度としてその近似式に適用することにより、アクセス回線以外の転送速度制限要因も考慮して TCP フローの品質を推定する方法を提案する。さらに、その推定法に基づいた帯域設計管理法についても述べる。

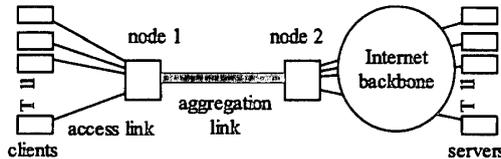


図 1 ネットワークモデル

2 TCP 平均ファイル転送時間近似式

本稿で扱うモデルを説明する (図 1)。各フローが占有できるアクセスリンクと、フローが多重される集約リンクから成り、集約リンク帯域を C とおく。アクセス回線速度 r_i ($i = 1 \sim K$) を持つフローをクラス i フローとし、 $i < j$ のとき、 $r_i < r_j$ とする。また、 $i < j$ のとき、クラス j はクラス i よりも高いクラスであると定義する。ここでは、時刻 t におけるクラス i フローの利用可能帯域 $A_i(t)$ は、max-min 公平性を満たすように決定されると仮定する。すなわち、

$$A_i(t) = \min(r_i, B(t, I)) \quad (1)$$

とする。ここで、 I は式 (2) を満たす最小の整数であり、 $B(t, I)$ は以下で定義される。

$$r_I > B(t, I) := \frac{C - \sum_{j=1}^{I-1} (N_j(t) \times r_j)}{N(t) - \sum_{j=1}^{I-1} N_j(t)} \quad (2)$$

ここで、 $N_j(t)$ は時刻 t におけるクラス j の同時接続フロー数であり、 $N(t) = \sum_{j=1}^K N_j(t)$ である。もしクラス i フローの到着過程が到着率 λ_i のポアソン過程に従

い、かつファイルサイズが平均 s_i の指数分布に従うとき、同時接続フロー数の遷移はマルコフ連鎖でモデル化できる ($N_i(t)$ の n_i から $(n_i + 1)$ への遷移率は λ_i 、 n_i から $(n_i - 1)$ への遷移率は $n_i A_i(t) / s_i$)。しかしながら、同時接続フロー数の定常状態確率を陽な式で導出するのは困難であり、仮に求められたとしても、全クラスの到着率とファイルサイズが必要となり、これらパラメータを予め決定する / 実測から求めるのは、一般に困難である。

そこで、均一アクセス回線モデルでの結果 [1] を元に、着目するクラス i フローのアクセス回線速度 r_i 、平均ファイルサイズ s_i と、測定が簡易な集約リンクの平均使用率 ρ (と帯域 C) のみを用いて、クラス i フローの平均ファイル転送時間を近似する式を以下のように提案する。

$$T_i(r_i, s_i, \rho, C) = \frac{s_i}{r_i} \left[1 + \frac{E_{2,R_i}(\rho)}{(1-\rho)C/r_i} \left\{ 1 - (1-\rho) \left(\frac{C}{r_i} - R_i \right) \right\} \right] \quad (3)$$

ここで、 $R_i = \lfloor C/r_i \rfloor$ 、 $E_{2,R}(\rho)$ はサーバ数が R のときのアーラン C 式 [3] である。式 (3) は、 r_i を r に、 s_i を s に置き換えると、全フローのアクセス回線速度を r 、平均ファイルサイズを s とした場合の均一モデルでの平均ファイル転送時間の式 [1] と一致する。

式 (3) では、クラス i 以外のフローを全て背景トラヒックとみなし、それらはリンク使用率 ρ のみ反映されるとして扱っている。もし、帯域割当てが式 (1) に従っているとすると、集約リンクが輻輳している場合、他クラスのフロー混在比率に依らず高クラスフローはアクセス回線速度を使い切れなくなる。従って、式 (3) のように他クラスフローを背景トラヒックとして扱っても、高クラスフローの品質 (ファイル転送時間) が劣化し始めるようなリンク使用率を精度良く近似できると期待される。

3 近似式の精度評価

式 (1) に従って遷移率が決まるマルコフ連鎖シミュレーションを通じて、式 (3) の推定精度を評価した。クラス数 $K = 4$ 、 $C = 22.5$ Mbps、 $(r_1, r_2, r_3, r_4) = (0.5, 1.5, 2.5, 4.5)$ Mbps、 $(s_1, s_2, s_3, s_4) = (1, 3, 5, 9)$ MB とし、 λ_i を変えて様々なリンク使用率 $\rho (= \sum_{i=1}^K \lambda_i s_i / C)$ を模擬した (ただし、 $\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 : \lambda_4 = 0.5 : 0.278 : 0.167 : 0.055$)。図 2 に、クラス i の平均ファイル転送時間に対するシミュレーション結果 (図中 $T_i\text{-sim}$) と式 (3) による近似結果 (図中 $T_i\text{-apx}$) を示す。これより、高いクラス (クラス 3, 4) に対する品質劣化開始リンク使用率 (e.g., クラス 4 に対してはリンク使用率 0.6 の辺り) が精度良く近似できていることが確認できる。つまり、高クラスフローの品質劣化開始リンク使用率 ρ_{th} を決定できることになり、リンク使用率を監視してそれが閾値 ρ_{th} を超えているか否かで、TCP 品質を考慮して帯域を管理することが可能となる。

また図 2 から、リンク使用率が高い領域では高クラスに対しては小さめに、低クラスに対しては大きめにファイル転送時間を近似していることがわかる。この理由について説明する。簡単のため、 $K = 2$ 、 $r_2 = 2r_1$ と

し、集約リンク輻輳時における低クラス(クラス1)のファイル転送時間を、近似式がどのように見積もるかを説明する。まず、1本のクラス2フローを、アクセス回線速度が半分である2本のフローに分ける。つまり、2本の(仮想的な)クラス1フローが同時に到着したとみなす。こうすることにより、クラス2フローが最大で r_2 の帯域を利用可能であることを、2本のクラス1フローが $2r_1(=r_2)$ の帯域を利用可能であることに置き換える。このとき、仮想的なクラス1フローの到着率 λ'_1 は $\lambda'_1 = 2\lambda_2$ となる。また、仮想的なクラス1フローの平均ファイルサイズを $s'_1 = (1/2)s_2$ とみなすことになる。このような置き換えにより得られる仮想モデルはクラス1フローのみから構成され、そのときの集約リンク使用率は $\rho' = \lambda_1 s_1 + \lambda'_1 s'_1 = \rho$ となり、元の2クラス混在モデルのそれと一致する。近似式(3)はこの仮想モデルを扱っていることに相当するので、集約リンク輻輳時に、この仮想モデルと元のモデルがどのように振る舞うかを比較する。今、クラス1フローが4本接続中のときにクラス2フローが発生したとする(図3)。ここで、 $C = 1$, $r_1 = 1/4$, $r_2 = 1/2$ とする。max-min公平性に従えば、クラス1に $1/5$ の帯域が割り当てられるが、仮想モデルでは $1/6$ しか割り当てられない。従って、低いクラスの利用可能帯域を小さめに見積もることになり、その結果、ファイル転送時間を大きめに見積もることになる。(同様の議論により、高クラスファイル転送時間を小さめに見積もることも説明できる。)

以上をまとめると、提案近似式を用いれば、

- 高クラスに対して品質劣化点を精度良く推定でき、
 - 低クラスに対しては転送時間を安全側に推定できる。
- なお、これらの結果は、各クラスの混在比率やアクセス回線速度比率を振らせてシミュレーションしても常に成り立っていた(結果は省略)。

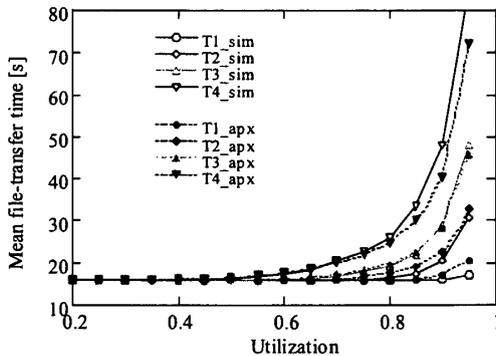


図2 近似式の精度評価結果

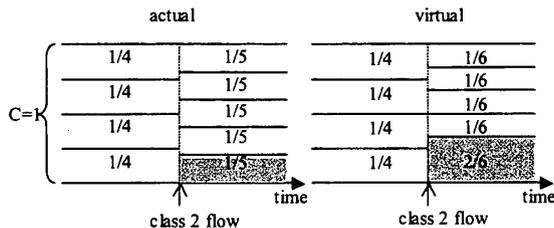


図3 帯域割当の例

4 アクセス回線以外の転送速度制限要因への応用

1節で述べたように、TCPフローの実際の転送速度は、往復伝播遅延や集約リンク以外の輻輳によっても制限されるため、集約リンクが輻輳していなくてもアクセス回線速度を使い切れるとは限らない。そこで、集約リ

ンク使用率が十分小さいときのファイル転送速度を仮想アクセス回線速度 r_i^* と定義し、それを式(3)に適用することにより、リンク使用率が増加したときのTCP品質を推定する方法を提案する。 r_i^* は、集約リンク使用率が低い時間帯に実測を通じて求める。具体的には、

- 着目するホスト間でアクティブ測定を実施するか、
- 集約リンク上のパケットをキャプチャし、フローを組み上げ、予め定めたポリシー(e.g., アプリケーション種別)に従ってクラス分けし、着目するクラス i の平均ファイルサイズ s_{0i} と平均ファイル転送時間 T_{0i} を求め、 $r_i^* = s_{0i}/T_{0i}$ とする。

推定法の評価例として、TCPの動作をシミュレーションした結果と推定結果を比較した(図4)。10 Mbpsの集約リンクにアクセス回線速度が2 MbpsのTCPフローを多重し、往復伝播遅延が42.5msのフローと2.68msのフローを混在させた。(各フローは平均10 KBのファイル転送を行うとした。)前者をクラス1フロー、後者をクラス2フローとみなしてそれぞれの平均ファイル転送時間をプロットした(図中 T_i .sim)。推定結果(図中 T_i .apx)については、まずリンク使用率が0.2のときの平均ファイル転送時間を測定し、それを元に仮想アクセス回線速度を求め($r_1^* = 0.569$, $r_2^* = 1.62$ Mbps), r_i^* を式(3)に適用することによってリンク使用率が0.2以上のときのファイル転送時間を推定した。これより、提案方式がファイル転送時間を精度良く推定できていることが確認できる。

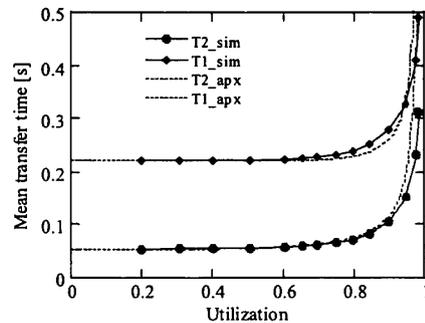


図4 TCP品質推定法の評価結果

5 帯域設計管理法

4節の推定法を用いた帯域管理法を以下に示す。

Step 1) 着目するクラス i フローの仮想アクセス回線速度 r_i^* と平均ファイルサイズ s_i を実測から求める。

Step 2) r_i^* , s_i を式(3)に代入し、 $T_i(r_i^*, s_i, \rho_{th}(i), C) = \hat{T}_i$ を満たす $\rho_{th}(i)$ を求める。(\hat{T}_i は予め定めたファイル転送時間の目標値。))

Step 3) 測定されたリンク使用率が $\rho_{th}(i)$ を超えたら、集約リンク輻輳によりTCP品質が劣化していると判定する。

帯域設計法としては、帯域増設時に加わると予測されるトラフィック量 L_{max} bps(e.g., 最繁時間帯でのトラフィック量の y パーセンタイル値)を用いて、 $\hat{T}_i = T_i(r_i^*, s_i, L_{max}/C_i^*, C_i^*)$ を満たす C_i^* をクラス i トラフィックに必要な帯域として算出する。

参考文献

- [1] S. B. Fredj et al., "Statistical bandwidth sharing: a study of congestion at flow level," ACM SIGCOMM 2001.
- [2] Y. Zhang et al., "On the characteristics and origins of Internet flow rates," ACM SIGCOMM 2002.
- [3] L. Kleinrock, *Queueing Systems: Volume 1*, John Wiley & Sons, New York, 1976.