

流体近似法を用いたDCCPおよびREDのモデル化および性能評価

久松潤之 大崎博之 村田正幸
大阪大学 大学院情報科学研究科 情報ネットワーク学専攻



① 研究の背景

- リアルタイム系アプリケーションの普及
- ネットワークの広帯域化
- マルチメディアアプリケーションへの要求
 - ビデオストリーミング、IP電話、オンラインゲーム
- 従来のリアルタイム系アプリケーション
 - トラヒックをTCPまたはUDPを用いて転送
 - TCP: 転送レートの変動が大きい
 - リアルタイム系アプリケーションには不向き
 - UDP: 輻輳制御機構を持たない
 - アプリケーションが個別に輻輳制御する必要あり
- リアルタイム系アプリケーション向けのトランスポート層通信プロトコルが新たに提案
 - TFRC (TCP-Friendly Rate Control)
 - TEAR (TCP Emulation At Receiver)
 - RAP (Rate Adaptation Protocol)
 - DCCP (Datagram Congestion Control Protocol)

② DCCP (Datagram Congestion Control Protocol)

- 輻輳制御機構を持つ
- アプリケーションに応じて輻輳制御アルゴリズムを選択できる
 - TCP型輻輳制御プロファイル
 - TFRC型輻輳制御プロファイル
- データの信頼性はない
- パケットが棄却されても再送しない

TCP型輻輳制御プロファイル

- AIMD型のウィンドウ制御
 - 輻輳を検出するまでウィンドウサイズを加算的に増加
 - 輻輳を検出すると、ウィンドウサイズを乗算的に減少

TFRC型輻輳制御プロファイル

- TCP-Friendlyなレート制御
 - 受信側ホスト: 輻輳を検出 & 送信側ホストに通知
 - 送信側ホスト: 受信側ホストの情報に基づき、送信レートを決定

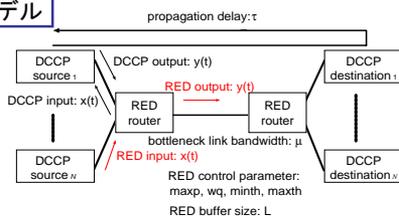
③ RED (Random Early Detection)

- 代表的なアクティブキュー管理機構
- ルータに到着するパケットを確率的に廃棄
- TCPの輻輳制御機構を補助
- DropTail ルータと比較して良好な性能が期待
 - 平均キュー長(バッファ内パケット数)が小さく抑えられる
 - 高いスループットを実現

研究の目的

- 流体近似法を用いたDCCPおよびREDのモデル化
 - DCCP/RED: DCCPとREDルータからなるネットワーク全体のモデル
- DCCP/REDの定常状態解析
 - DCCPのスループットおよびパケット棄却率
- DCCP/REDの過渡特性解析
 - 立ち上がり時間、行き過ぎ量、整定時間

④ 解析モデル



REDのモデル化

- $x(t)$: 入力 (パケット到着レート)
 - $y(t)$: 出力 (パケット送出レート)
 - 平均キュー長
 - 現在キュー長
 - パケット棄却率
- $$p_b(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } q(k) < \min_{th} \\ \frac{\max_p - \min_{th}}{\max_{th} - \min_{th}} (q(k) - \min_{th}) & \text{if } \min_{th} \leq q(k) < \max_{th} \\ 1 & \text{if } q(k) \geq \max_{th} \end{cases}$$
- $$p(k) = \frac{2p_b(k)}{1 + p_b(k)}$$
- $$q(k+1) = \min\{x(k), \mu\}$$
- $$q(k+1) = \min\{\max\{q(k) + N x(k) \Delta, 0\}, L\}$$
- $$\bar{q}(k+1) \approx \bar{q}(k) + N x(k) \Delta w_q (q(k) - \bar{q}(k))$$

⑤ TCP型輻輳制御プロファイルのモデル化

- $x(t)$: 入力 (パケット到着レート)
 - $y(t)$: 出力 (パケット送出レート)
 - R : ラウンドトリップ時間
 - Δ : 離散時間スロット
 - TCP timeout
 - additive increase
 - multiplicative decrease
- $$z(k) = y(k - \frac{R}{\Delta}) - x(k)$$
- $$y(k+1) \approx f(x(k), y(k), R)$$
- $$y(k+1) \approx y(k) \left[\frac{1 + \frac{\Delta}{R} \frac{z(k)}{y(k)}}{1 + \frac{\Delta}{R} \frac{z(k)}{y(k)}} \right] \left[1 - p_{TCO}(k) \right] - \frac{1}{2} y(k) - \frac{1}{2} \Delta z(k) p_{TCO}(k)$$

TFRC型輻輳制御プロファイルのモデル化

- $x(t)$: 入力 (パケット到着レート)
 - $y(t)$: 出力 (パケット送出レート)
 - R : ラウンドトリップ時間
 - Δ : 離散時間スロット
 - 再送タイマー
 - パケット棄却イベント率
- $$y(k) = g(x(k), y(k), R)$$
- $$X(p(k), R) = \frac{1}{R \sqrt{\frac{2p(k)}{3}} + t_{PRO} \left(3 \sqrt{\frac{2p(k)}{3}} p(k) (1 + 32p(k)^2) \right)}$$

⑥ 定常状態解析

時刻 $k \rightarrow \infty$ の時の、DCCPのパケット送出レート等を導出

- y_D^* 定常状態におけるDCCPのパケット送出レート
- y_R^* 定常状態におけるREDのパケット送出レート
- N : DCCP コネクション数
- 以下のおき、 y_D^* 、 y_R^* を数值的に解く
 - DCCP: $y(k+1) = y(k) = y_R^*$, $x(k) = \frac{y_D^*}{N}$
 - RED: $y(k+1) = y(k) = y_R^*$, $x(k) = N y_D^*$

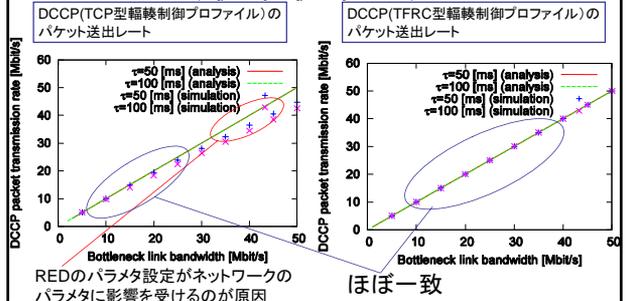
過渡状態解析 (TFRC型輻輳制御プロファイル)

平衡点近傍の振舞いに注目

- A: 送信側ホストがACKを受け取ったときの状態遷移行列
- B: 送信側ホストがACKを受け取らなかったときの状態遷移行列
- n: 受信側ホストはnタイムスロットに一度ACKを送出
- DCCP/REDを平衡点近傍で線形近似
 - $x(k+n) = A B^{n-1} x(k)$
- 状態遷移行列 $A B^{n-1}$ の固有値がシステム全体の安定性・過渡特性を決定

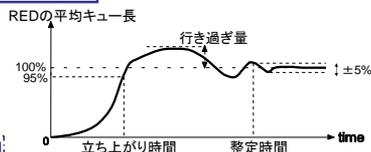
⑦ 数値例(定常状態解析)

- 用いたパラメータ
- DCCPコネクション数 $N=10$
 - DCCPコネクションの往復伝搬遅延 $\tau = 50, 100[\text{ms}]$
 - REDのバッファサイズ $L=250[\text{packet}]$
 - REDの制御パラメータ (minth,maxth,maxp,wq) = (20[packet], 100[packet], 0.1, 0.002)



⑧ 数値例(過渡状態解析)

- 立ち上がり時間
- 行き過ぎ量
- 整定時間



DCCP/REDの過渡特性

輻輳制御プロファイル	w_q	遷移行列の固有値	立ち上がり時間 [ms]	行き過ぎ量 [packet]	整定時間 [ms]
TCP 型	0.0002	0.9996	920	27.5	27340
輻輳制御	0.002	0.9967	小	350	23.2
プロファイル	0.02	0.9678	小	170	14.3
TFRC 型	0.0002	0.9995	1520	35.1	31970
輻輳制御	0.002	0.9954	小	530	21.6
プロファイル	0.02	0.9533	250	2.8	250

REDの移動指数平均の重み w_q が大きくなるにつれて、立ち上がり時間、行き過ぎ量、整定時間が小さい