

## エンド間遅延の安定化を図る アトラクタ摂動モデルを応用した 送信レート制御手法の改良と評価

協みどり 若宮直紀 村田正幸  
大阪大学

### 研究の背景と目的

- ベストエフォート型のネットワーク
  - 様々な要因でネットワークの状態が変化
    - 同じ経路を通るセッションの数, トラフィック量の変化など
  - 通信特性が時々刻々と変化
    - 通信速度, 遅延, パケット棄却など
- 遅延のゆらぎを抑制, 除去しようとする取り組み
  - 遅延変動の予測, 中継ノードの変更が必要

遅延のゆらぎを効果的に活用した, ネットワークの機能に依存しない  
自律的な遅延ゆらぎの制御を提案  
→アトラクタ摂動モデルの応用

2012/1/27 IN研究会 2

### アトラクタ摂動モデル

K. Sato, Y. Ito, T. Yomo, and K. Kaneko, "On the relation between fluctuation and response in biological systems," *National Academy of Sciences*, vol. 100, pp. 14086-14090, Nov. 2003.

- ゆらぎのあるシステムに加える外力とその応答の間にゆらぎに比例した関係があることを示唆
- バクテリアの進化過程における遺伝子表現型の違いと蛍光タンパク質 (GFP) 量との相関から導出

$$\langle x \rangle_{a+\Delta a} - \langle x \rangle_a = b\sigma_a^2 \Delta a$$

GFP の平均質量の変化      GFP 量 表現型  
の分散                              の変化量

x : 観測値 (GFP 量)  
a : 外力 (遺伝子表現型)  
b : 係数

観測値の平均値をある量だけ変化させるために必要な  
外力の大きさを観測値の分散の大きさから推定可能

2012/1/27 IN研究会 3

### アトラクタ摂動モデルを応用した エンド間遅延の安定化を図る送信レート制御[IN2011-51]

- Realtime Transport Protocol (RTP)でデータを送信
- RTP Control Protocol (RTCP) を用いて双方向遅延を計測

アトラクタ 摂動モデル	システム	ゆらぎ	外力a	システムの観測値x
送信レート制御	情報ネットワーク	トラフィック 変動など	送信レート	エンド間遅延 (RTCPの双方向遅延)

$\langle x \rangle_{a+\Delta a}$

-

$\langle x \rangle_a$

=

$b\sigma_a^2 \Delta a$

観測した双方向遅延  
の分散

観測した双方向遅延  
の平均値

送信レート  
変更量 Δa 算出

- 問題点
  - RTCP の送受信頻度が高いとネットワークに負荷をかけるため遅延が大きく見積もられる
  - 送信レート更新間隔から外れた期間の双方向遅延を含むことによる誤差

データパケットである RTP パケットの片道遅延をシステムの観測値とする

2012/1/27 IN研究会 4

### 改良前の送信レート制御

- 観測値はRTCP の SR と RR を用いて計測される双方向遅延
  - 過去 K 回分の双方向遅延の計測結果の平均と分散を用いて送信レート更新

問題点

- K を大きくすると異なる送信レートのときの計測値を含むことによる誤差増
- SR, RR の送受信頻度を高くするとネットワークに負荷がかかり, 遅延が大きくなることによる誤差増

送信レート更新

更新間隔

送信レート更新

→ RTP : データを送信

--- Sender Report (SR)

--- Receiver Report (RR)

送信レート更新に用いる  
過去 K 回分の双方向遅延の計測結果

2012/1/27 IN研究会 5

### アトラクタ摂動モデルを応用した エンド間遅延の安定化を図る送信レート制御[IN2011-51]

- Realtime Transport Protocol (RTP)でデータを送信
- RTP Control Protocol (RTCP) を用いて双方向遅延を計測

アトラクタ 摂動モデル	システム	ゆらぎ	外力a	システムの観測値x
送信レート制御	情報ネットワーク	トラフィック 変動など	送信レート	エンド間遅延 (RTCPの双方向遅延)

$\langle x \rangle_{a+\Delta a}$

-

$\langle x \rangle_a$

=

$b\sigma_a^2 \Delta a$

観測した双方向遅延  
の分散

観測した双方向遅延  
の平均値

送信レート  
変更量 Δa 算出

- 問題点
  - RTCP の送受信頻度が高いとネットワークに負荷をかけるため遅延が大きく見積もられる
  - 送信レート更新間隔から外れた期間の双方向遅延を含むことによる誤差

データパケットである RTP パケットの片道遅延をシステムの観測値とする

2012/1/27 IN研究会 4

### 改良後の送信レート制御

- 観測値はRTP パケットの片道遅延
  - 受信側端末側は RTP パケットの片道遅延の平均と分散を含めた RR を送信
  - 送信側端末は RR 受信時に送信レートを更新

- SR, RR の送受信頻度は送信レート制御頻度と同程度
- 異なる送信レートの計測値を含まず計測精度が向上

2012/1/27 IN研究会 6

### 提案手法の送信レート更新

- 送信レートの変更量  $\Delta a$  を決定
  - アトラクタ摂動モデルの式を応用
    - 片道遅延の計測値の平均  $\bar{x}_i$  と分散  $\sigma_i^2$
    - $T$  は目標片道遅延
  - レート変更の上限  $\Delta_{max}$  (+1 Mbps) と下限  $\Delta_{min}$  (-1 Mbps)
    - 急激なレート変更を抑制

$$\Delta a = \min \left( \Delta_{max}, \max \left( \Delta_{min}, \frac{T - \bar{x}_i}{b \sigma_i^2} \right) \right)$$

- 新たな送信レート  $a_{new}$  を設定
  - 送信レートの上限  $a_{max}$  (9 Mbps) と下限  $a_{min}$  (1 Mbps)
    - アプリケーションの定める送信レートの範囲

$$a_{new} = \min(a_{max}, \max(a_{min}, a + \Delta a))$$

2012/1/27 IN研究会 7

### シミュレーション評価

- 評価モデル
  - ダンベル型トポロジ
  - $S_0, R_0$  間に提案手法を動作 (着目セッション)
  - バックグラウンドトラフィックとして平均送信レートが0.25 Mbps の  $S_i$  から  $R_i$  へのUDP セッション ( $1 \leq i \leq m$ ) を  $m$  本設定

- 予備実験によるアトラクタ摂動モデル成立の検証と係数  $b$  の決定
- 提案手法の送信レート制御のシミュレーション

パラメータ名	値
バッファサイズ	80 [パケット]
RTP パケットサイズ	1028 [byte]
SR パケットサイズ	64 [byte]
RR パケットサイズ	72 [byte]
UDP パケットサイズ	1000 [byte]

2012/1/27 IN研究会 8

### アトラクタ摂動モデルの検証方法

- $\Delta a$  を固定して片道遅延の分散と平均値の変化量に正の相関があればアトラクタ摂動モデルが成立

$$b = \frac{\langle x \rangle_{a+\Delta a} - \langle x \rangle_a}{\sigma_a^2 \cdot \Delta a}$$

- 評価モデルで送信レートを変化させて ( $\Delta a = 0.1 \text{ Mbps}$ ) CBR トラフィックを流し片道遅延の分散と平均値の変化量の関係を調査

$$(x_l, y_l) = (\sigma_{m,k,a}^2 \cdot 0.1, \langle x \rangle_{m,k,a+0.1} - \langle x \rangle_{m,k,a})$$

$m$ : バックグラウンドセッション数 (18~25本)  
 $k$ : 乱数シード(10通り)  
 $a$ : 送信レート (3.1~5.4Mbps)  
 $l$ :  $m, k, a$  の組み合わせ数 (1920)

2012/1/27 IN研究会 9

### アトラクタ摂動モデルの検証結果

- 正の相関がありアトラクタ摂動モデルが成立
- パケットロス発生前後で相関が変化
  - 提案手法の適用範囲はパケットロス率0.001以下とする
- 赤い点のデータから最小二乗法により近似線を算出
  - 傾きは635 → 係数  $b$  として使用

$$(x_l, y_l) = (\sigma_{m,k,a}^2 \cdot 0.1, \langle x \rangle_{m,k,a+0.1} - \langle x \rangle_{m,k,a})$$

2012/1/27 IN研究会 10

### 提案手法の動作検証

- 着目セッションで目標遅延を達成, 維持できるか検証
- シミュレーションシナリオ

時刻 (秒)	シミュレーション内容
0	シミュレーション開始
0~1	バックグラウンドセッション20本が通信開始
1	提案手法が通信開始
300	バックグラウンドセッションが23本に増加
600	シミュレーション終了

- 提案手法の代わりに RTP と RTCP を用いて CBR トラフィック4.0 Mbps を送信する場合 (CBR 通信) と改良前の手法も評価
- 目標遅延は同一条件のバックグラウンドセッション数が20本のときの CBR 通信の遅延
  - 改良前: RTCP 送受信で計測される双方向遅延
  - 改良後: RTP パケットの平均片道遅延

2012/1/27 IN研究会 12

### 評価指標

- 平均二乗誤差  $M$  : 平均片道遅延と目標片道遅延の誤差の大きさ
  - $M = \frac{1}{n+2} \sum_{i=0}^{n+1} (T_i - T)^2$
- 変動係数  $C$  : 平均片道遅延の安定度
  - $C = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt{\frac{1}{n+2} \sum_{i=0}^{n+1} (T_i - \bar{T})^2}$
- 遅延ジッタ  $J$  : 平均片道遅延と目標片道遅延との最大誤差
  - $J = \max_{0 \leq i \leq n+1} \{T_i - T\}$

送信側端末  
受信側端末  
平均片道遅延  $T_i$

$n$  : シミュレーションで送信した全 SR の個数  
 $T_i$  :  $i$  番目から  $i+1$  番目の SR 送信までに送信された RTP パケットの平均片道遅延  
 $T$  : 目標片道遅延  
 $\bar{T}$  :  $T_i$  ( $0 \leq i \leq n+1$ ) の算術平均

2012/1/27 IN研究会 12

### シミュレーション結果例

- CBR 通信はセッション数増加に伴って平均片道遅延が増加, 変動
- 改良前はセッション数によらず平均片道遅延が目標片道遅延より低いまま安定
  - 送信レートが低いため
- 改良後は目標片道遅延を達成, 維持
  - 改良後は改良前よりも高い送信レートで目標片道遅延を達成

M: 平均二乗誤差 C: 変動係数 J: 遅延ジッタ

CBR  
M: 144  
C: 0.375  
J: 41.9

改良後  
M: 10  
C: 0.152  
J: 29.7

改良前  
M: 2  
C: 0.092  
J: 1.8

平均片道遅延 (ミリ秒) vs time (秒)  
平均送信レート (Mbps) vs time (秒)

セッション数増加

平均4.03 Mbps  
平均3.44 Mbps  
平均2.82 Mbps  
平均1.85 Mbps

2012/1/27 IN研究会 13

### シミュレーション全体の結果

- 改良後は一時的な片道遅延の増加により評価指標の値が増大
  - 遅延変動は ITU-T で規定される値に近い
- 改良前の送信レート低下はテレビ電話などで画質, 音質の低下を招くため問題
  - 改良後はテレビ電話などの遅延に関するサービス品質要求が厳しいアプリケーションに対応できる

遅延変動 (IPDV)	50ms	54.33ms
ITU-T Y.1541 クラス 0 目標値		20回平均
改良後		

平均二乗誤差 vs 変動係数

遅延ジッタ vs 変動係数

2012/1/27 IN研究会 14

### 係数 $b$ の影響

- 係数  $b$  を変化させ平均二乗誤差の関係を評価
  - バッファ容量が80パケットと300パケット
  - セッション数の変化が20本→23本と22本→25本
- バッファ容量や負荷状態によって  $b$  の最適値は変化
  - 20本→23本では、バッファ容量による  $b$  の増加に過剰に単調減少したが、 $b$  が600より容量化により減少量が異なる
- 中継ノードのバッファ容量の情報を得ることは困難
- 経路の切り替えなどで  $b$  の最適値は変化

平均二乗誤差 vs 係数 b

レート制御の結果に基づいて係数  $b$  を適応的に調整する機構が必要

2012/1/27 IN研究会 15

### まとめ

- まとめ
  - RTP パケットの片道遅延を観測値とする改良を行った
  - シミュレーション評価の結果, 目標遅延を安定的に達成, 維持するとともに, 改良前よりも送信レートを高く保てることを示した
  - 提案手法の性能が係数  $b$  に影響を受けることが明らかとなった
- 今後の課題
  - 大規模なネットワークにおける提案手法の有用性の評価
  - 係数  $b$  を適応的に調整する機構の検討

2012/1/27 IN研究会 16