

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 送信レート制御手法の提案と評価

脇 みどり[†] 若宮 直紀[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]{m-waki,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットは、複数の利用者が資源を共有、競合するベストエフォート型のネットワークであるため、あるセッションから見た通信速度や遅延、パケット棄却などの通信特性が時々刻々と変化する。そのため、例えばテレビ電話や動画ストリーミングのような遅延や遅延のゆらぎに関する QoS 要求が厳しいアプリケーションに対しては、バッファリングや送信レート制御、パケットスケジューリングなどの様々な手法によって、ゆらぎを制御する努力がなされてきた。しかしながら、既存手法では、遅延変動の予測やトラフィック特性の申告が必要であり、ゆらぎによってそれらの条件に大きな変化が生じると QoS 要求を満たせなくなる。そこで、本稿では、ゆらぎを活用する新しい設計論にもとづくネットワーク制御として、ゆらぎが内在するシステムにおける外力とシステムの応答との関係を表すアトラクタ摂動モデルを用いることにより、ネットワークの負荷変動に対して所望のエンド間遅延を達成、維持する送信レート制御手法を提案する。提案手法により、バックグラウンドトラフィックが変化する環境において、所望のエンド間遅延を達成、維持できることをシミュレーション評価によって示した。

キーワード 送信レート制御, 遅延, アトラクタ摂動モデル

Proposal and Evaluation of Attractor Perturbation-based Rate Control for Stable End-to-end Delay

Midori WAKI[†], Naoki WAKAMIYA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: [†]{m-waki,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Due to the best-effort nature of the Internet, delay and delay jitter observed by a session always fluctuate, even if it generates CBR traffic. Buffering at a host and packet scheduling at routers would solve the problem to some extent, but they require prior knowledge of delay variation and traffic characteristics. In this paper, we propose a novel rate control mechanism to achieve and maintain the targeted delay in the dynamically changing environment. Our proposal does not filter or conceal fluctuation, but it exploits fluctuation to accomplish the goal by using the attractor perturbation model derived from biological behavior. Through simulation experiments, we confirmed that our proposal could achieve and maintain the targeted delay when background traffic changed.

Key words Rate control, End-to-end delay, Attractor perturbation

1. はじめに

インターネットは、それぞれの制御規律に従って動作する複数のセッションがネットワーク帯域を共有するベストエフォート型のネットワークであるため、あるセッションから見た通信速度や遅延、パケット棄却などの通信特性が時々刻々と変化する。例えば、送信側端末から一定の送信レートでパケットを送

出しても、同じ経路を通るセッションの数やトラフィック量の変動、ルーティングテーブルの更新によるネットワーク層での経路の変更、また、無線ネットワークにおいてはリンク品質の変動などの影響を受け、パケットの転送遅延や棄却率もまた変化する。

そのため、例えばテレビ電話や動画ストリーミングのような遅延や遅延のゆらぎに関する QoS 要求が厳しいアプリケー

ションに対しては、受信端末側でパケットをバッファリングして遅延のゆらぎを吸収する手法 [1] や、通信経路上のルータや中間ノードにおいて、遅延や遅延ゆらぎに対するアプリケーションの要求を考慮して、パケット送出のスケジューリングを行うことで遅延ゆらぎを抑制する手法 [2-5] など、ゆらぎを抑制、除去する様々な手法が提案されている。

しかしながら、ネットワークがますます大規模化、複雑化していく現状において、遅延変動を予測して、あらかじめ必要なバッファ量を定めることは難しく、また、新たな機能を有するルータや機器を多数配置することはネットワークをよりいっそう複雑にし、制御や管理の困難さを増すだけでなく、ネットワークの適応性、頑健性の低下を招き、予期しない状態変化に対してネットワークが脆弱になってしまう [6]。したがって、ネットワークの機能に依存することなく、送受信端末における自律的な機構によって遅延のゆらぎを制御できることが望ましい。

システムに内在するゆらぎと制御の関係に関して、近年、生物システムを対象にアトラクタ振動という概念が提唱されている [7]。アトラクタ振動モデルでは、ゆらぎのあるシステムへの外力 a を微量 Δa だけ変化させたときのシステムの観測値 x の変化量が、外力の変化量 Δa と観測値の分散 σ_a^2 の積に比例することが示されている。すなわち、アトラクタ振動モデルにもとづく、ゆらぎを持つシステムにおいて、観測値 x の分散から制御 a の変化量 Δa に対する観測値 x の変化量、すなわち制御効果を推定でき、また、観測値 x をある量だけ変化させるために必要な制御 a の変化量 Δa を観測値 x の分散から推定することができることとなる。文献 [8] では、このようなアトラクタ振動モデルのネットワーク制御への応用例として、無線アクセス網のマルチホーミング環境における網選択や、トランスポート層における輻輳制御などのアイデアが示されている。

本稿では、アトラクタ振動モデルにおいて、外力を送信レート、送受信端末で測定するエンド間遅延を観測値とすることにより、所望のエンド間遅延を達成、維持するための送信レートを決定するレート制御手法を提案する。これにより、ネットワーク内部に特殊なルータや機器を設置することなく、また、ネットワークの動作原理や構造の情報を必要としない、送受信端末による自律的かつ簡便な制御が実現できる。さらに、アトラクタ振動モデルが成立する環境においては、従来手法のように送信レートを段階的に上げ下げして望むエンド間遅延を達成できるレートを発見的に探索したりせずとも、通信状態の変化に対して適切な送信レートを簡単な式の計算により直接的に決定することができる。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2. 章でアトラクタ振動モデルの概要について述べる。次に、3. 章においてアトラクタ振動モデルを応用したレート制御手法を提案する。次に、4. 章において、シミュレーション評価により、提案手法の有効性を示す。最後に、5. 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2. アトラクタ振動モデル

アトラクタ振動モデルは、バクテリアの進化過程における蛍

光タンパク質の量と遺伝子表現型の違いとの相関から導出されたモデルであり、内在するゆらぎの影響を受けるシステムにおいて、外力に対する応答の変化量が、システムの変動の大きさに比例することを表している。生物システムにおける代謝反応などのあらゆる挙動は熱ゆらぎなどの様々なゆらぎや変動の影響を受けている。例えば、一定の環境においても細胞内の代謝物濃度は時々刻々と変化し、また、同一環境内に存在する細胞の代謝物濃度も細胞ごとに様々に異なる。文献 [7] では、このような内在するゆらぎが、環境変化に対する生物システムの適応性をもたらしていることを明らかにしている。

文献 [7] の実験においては、蛍光タンパク質の量が細胞間で大きくばらついている世代ほど、遺伝子表現型の変化に対する平均蛍光タンパク質量の世代間の変化が大きくなることが示されている。これにもとづき、アトラクタ振動モデルでは、システムに対して外力 a を加えた際の観測値 x の変化量の関係を次式で与える。

$$\langle x \rangle_{a+\Delta a} - \langle x \rangle_a = b\Delta a\sigma_a^2 \quad (1)$$

式 (1) において、 $\langle x \rangle_a$ は外力の大きさが a の時の観測値 x の平均値、 σ_a^2 は分散である。また、 Δa は外力の微小変化量、 b は外力の大きさ a に無関係な定数である。上記の生物実験においては、遺伝子表現型の変化が外力、蛍光タンパク質の量が観測値に対応している。すなわち式 (1) は、振動 Δa に対するシステムの変化量が、システムに内在するゆらぎの大きさに比例することを意味する。これにより、外力 a と観測値 x の関係を直接知ることなく、観測値 x の分散から外力 Δa の効果を推定し、その結果に基づく効果的な制御が可能となる。

3. アトラクタ振動モデルを用いたレート制御手法

提案手法は RTP/UDP と RTCP/UDP [9] を用いて定期的に通信を行うアプリケーションを対象とし、UDP データグラムの送信間隔を調整することによって送信レート制御を行う。なお、アプリケーションは、送信レートに関して、最低レート a_{min} Mbps と最大レート a_{max} Mbps の制約を持つものとする。以降では、提案手法の詳細を述べる。

3.1 提案手法の概要

提案手法では、ある一定間隔ごとに UDP データグラムの送信間隔を変更することによってレート制御を行う。レート制御のタイミングにおける送信レート a に対して、過去の通信におけるエンド間遅延の平均値を $\langle x \rangle_a$ 、分散を σ_a^2 とする。このとき、安定化の目標とするエンド間遅延を $\langle x \rangle_{a+\Delta a}$ とみなし、送信レートの変更量 Δa を、 $\Delta a = (\langle x \rangle_{a+\Delta a} - \langle x \rangle_a) / (b\sigma_a^2)$ により導出する。なお、 b は制御パラメータである。

以後、エンド間遅延を RTT、所望のエンド間遅延を目標 RTT とよぶ。アトラクタ振動モデルによれば、目標 RTT に対して現在の RTT が大きいとき、目標 RTT を達成するためには、分散 σ_a^2 の大きい状態では送信レートを少しだけ下げればよく、一方、分散 σ_a^2 が小さい状態では送信レートを大きく下げなければならない。前者は、RTT の分散が大きいことからネット

ワークの負荷状態が中程度であると考えられ、送信レートのわずかな変更により、エンド間遅延を容易に下げられることを、一方、後者の場合には、ネットワークが高負荷状態にあると考えられるため、大きく送信レートを下げなければ RTT を下げられないということを、それぞれ示唆している。

3.2 アトラクタ摂動モデルを用いた送信レート制御手法

送信側端末は、まず、アプリケーションの設定した最低レートである a_{min} Mbps を送信レートとして通信を開始する。送信側端末は、送信レート a Mbps と定数 N ($N > 0$) の積である $[aN]$ 個の RTP パケットを送信するごとに、受信側端末に向けて RTCP の Sender Report パケット (以降、SR パケットと表記する) を送信する。なお、 i 番目に送信した SR パケットのヘッダには送信時刻 S_i が timestamp フィールドに記録される。定数 N により、送信側端末は送信レートに比例した数の RTP パケットごと、すなわち一定時間ごとに SR パケットを送信することになる。なお、送信側端末でタイマを用いて SR パケットの送信間隔を制御してもよい。

i 番目の SR パケットを受信した受信側端末は、Receiver Report パケット (以降、RR パケット) を生成し、送信側端末へ送信する。RR パケットの Last SR timestamp (LSR) フィールドには受信した SR パケットのタイムスタンプ S_i 、Delay since Last SR (DLSR) フィールドには SR パケットを受信してから RR パケットを送信するまでに要した時間 D_i がそれぞれ格納される。

RR パケットを受信した送信側端末は、受信時刻 R_i とヘッダに含まれる情報から、 i 番目の SR パケットによって観測された RTT $t_i = R_i - D_i - S_i$ s を得る。送信側端末は、通信開始から K 個目 ($K > 0$) の RR パケットを受信すると、最初の送信レート制御を行う。以降、RR パケットを受信するごとに、前回の送信レート制御から I s ($I > 0$) 以上経過していれば、送信レートの制御を行う。送信側端末が i 番目 ($i \geq K$) の SR パケットに対する RR パケットを受信したものとす。送信レートの制御においては、まず、新たに受信した RR パケットから算出されるものも含めた過去 K 個分の RTT の観測値 t_k ($i - K + 1 \leq k \leq i$) から RTT の相加平均 \bar{t}_i と分散 σ_i を次式でそれぞれ求める。

$$\bar{t}_i = \frac{1}{K} \sum_{k=i-K+1}^i t_k \quad (2)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{K} \sum_{k=i-K+1}^i (t_k - \bar{t}_i)^2 \quad (3)$$

次に、アプリケーションの要求する目標 RTT T s と定数 b ($b > 0$) から、次式により送信レートの変更量 Δa を決定する。なお、急激なレート変更を抑制するため、送信レートの変更量には上限 Δ_{max} Mbps と下限 Δ_{min} Mbps を設ける。

$$\Delta a = \min(\Delta_{max}, \max(\Delta_{min}, \frac{T - \bar{t}_i}{b\sigma_i})) \quad (4)$$

さらに、アプリケーションの定める送信レートの範囲にしたがって、新たな送信レート a_{new} Mbps を次式で決定し、送信

レートを a_{new} Mbps に変更する。

$$a_{new} = \min(a_{max}, \max(a_{min}, a + \Delta a)) \quad (5)$$

4. シミュレーション評価

本章では、シミュレーション評価により、提案手法の有効性を示す。シミュレーションは ns-2 [10] を用いて行った。

4.1 評価モデル

評価には、BA (Barabási-Albert) モデル [11] で生成した 100 ノードからなるネットワークを用いる。シミュレーションでは、全てのリンクを全二重とし、帯域を 10 Mbps、伝搬遅延を 10 ms とした。また、ノードは FIFO、DropTail で管理されたバッファサイズが 100 パケットのバッファを有している。提案手法のセッションを、ランダムに選んだノード間に設定する。提案手法で送信されるデータパケットのサイズを、アプリケーションで発生するデータに RTP ヘッダ、UDP ヘッダ、IP ヘッダを付加した 1028 byte とし、また RTCP の SR パケット、RR パケットのサイズは、それぞれ IP ヘッダを含めて 64 byte、72 byte とした。バックグラウンドトラヒックとして、任意の本数の TCP セッションを、他のセッションおよび提案手法のセッションと重複しない、ランダムに選ばれたノード間に設定した。TCP セッションのアプリケーションは FTP とし、継続的にファイル転送を行う。TCP セッションで送信されるデータパケット、ACK パケットのサイズは、IP ヘッダを含めてそれぞれ 1040 byte、40 byte とした。

4.2 アトラクタ摂動モデルの検証と定数 b の設定

4.1 節で定義したシミュレーションモデルにおいて、外力として UDP トラヒックを与え、RTT を観測値とし、その相関の有無を確認するとともに、制御に用いるパラメータ b を決定する。具体的には、あるランダムに生成されたトポロジ、セッションの組み合わせ j ($1 \leq j \leq 850$) に対して、バックグラウンドトラヒックとして 49 本の TCP セッションを設定する。また、バックグラウンドのセッションとは異なるランダムなノード対に UDP セッションを設定し、この着目セッションにおいて、平均送信レートを 1 Mbps から 10 Mbps に 1Mbps ずつ増加させ、それぞれの送信レートにおける平均 RTT と、RTT の分散を求める。

次に、送信レート i Mbps における RTT の平均 $\langle x \rangle_i^j$ と、RTT の分散 σ_i^j から、次式を用いて定数 b_i^j を求める。

$$b_i^j = \frac{\langle x \rangle_{i+1}^j - \langle x \rangle_i^j}{\sigma_i^j} \quad (6)$$

さらに、トポロジ、セッションの組み合わせについて b_i^j の平均値 b_i を次式で求める。

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^w b_i^k \quad (7)$$

850 回のシミュレーションで得られた結果から、 $b_i^j \leq -10000$ または $b_i^j \geq 10000$ である外れ値を除いた 732 回分 (約 86%) の結果について、 b_i の平均値と 95% 信頼区間を求めたものを図

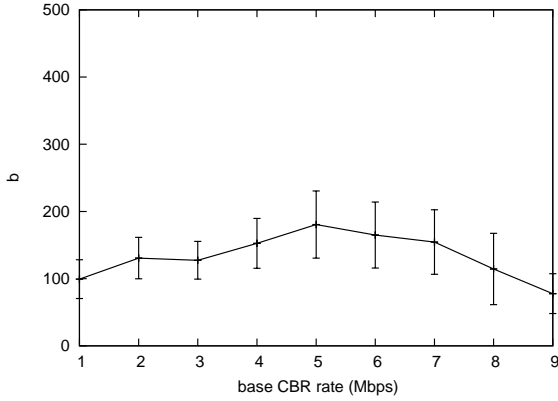


図 1 b_i と 95%信頼区間

1 に示す．ばらつきは認められるものの， b_i がおおよそ 100 であることから，本シミュレーション条件において，UDP トラフィックを外力，RTT を観測値としたアトラクタ摂動モデルが成立しているとみなせる．そこで，以降では，提案手法における定数 b を 100 として，シミュレーションを行う．なお，図 1 から取り除かれた外れ値は，CBR セッションと TCP セッションの競合がほとんどないようなトポロジ，セッションの組み合わせの時に多く得られている．そのような条件においては，遅延の変動が小さく，分散が 0 に近くなっており，したがって，システムにゆらぎがない状態である．すなわち，本シミュレーション結果は，アトラクタ摂動モデルにもとづくレート制御は，ネットワークにある程度の負荷がかかっており，ゆらぎが生じている環境に適用可能であることを示している．

4.3 評価指標

本節では，目標 RTT の達成度，安定度合いを評価するための評価指標について述べる．

4.3.1 平均二乗誤差

目標 RTT の達成度を，以下で求める平均二乗誤差により評価する．あるシミュレーションにおいて，送信側端末が受信した i 個目の RR メッセージから算出される RTT を t_i とする．こうして得られた直近 100 個の RTT の観測値について単純移動平均を求めたものを T_i とし，次式で求める．

$$T_i = \frac{1}{100} \sum_{k=i-99}^i t_k \quad (8)$$

なお，シミュレーションで得られた RTT の観測値の個数を n とすると， i は $100 \leq i \leq n$ である．このシミュレーションにおける目標 RTT を T としたとき，平均二乗誤差 M を次式で求める．

$$M = \frac{1}{n-99} \sum_{k=100}^n (T_k - T)^2 \quad (9)$$

平均二乗誤差 M が小さいほど，多くの時間において目標 RTT に近い RTT が達成できていることを意味する．

4.3.2 変動係数

RTT の安定性を，以下で求める変動係数を用いて評価する．前節で定義した指標を用いて，あるシミュレーションにおける

遅延の相加平均 \bar{T} と，標準偏差 σ をそれぞれ次式で求める．

$$\bar{T} = \frac{1}{n-99} \sum_{k=100}^n T_k \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-99} \sum_{k=100}^n (T_k - \bar{T})^2} \quad (11)$$

これより，このシミュレーションにおける変動係数 C を次式で求める．変動係数 C が小さいほど RTT が安定していることを意味する．

$$C = \frac{\sigma}{\bar{T}} \quad (12)$$

4.3.3 遅延ジッタ

受信側端末が設定，管理するゆらぎ吸収バッファの必要サイズなどに対する影響を評価するため，以下で求める遅延ジッタを用いる．4.3.2 節で定義した指標により，あるシミュレーションにおける遅延ジッタ J を次式で求める．

$$J = \max_{100 \leq k \leq n} \{|T_k - T|\} \quad (13)$$

すなわち，遅延ジッタは目標 RTT に対する得られた RTT の最大誤差である．例えば，平均二乗誤差 M と変動係数 C がともに小さいが，遅延ジッタ J が大きい場合には，一時的な輻輳などによって瞬時的に RTT が変動していると考えられる．

4.4 評価結果

表 1 パラメータ設定

パラメータ	値
定数 N	10
定数 K	100 [個]
送信レート更新間隔 I	3 [s]
定数 b	100
レート変更の下限 Δ_{min}	-1 [Mbps]
レート変更の上限 Δ_{max}	+1 [Mbps]
最小送信レート a_{min}	0.1 [Mbps]
最大送信レート a_{max}	9.9 [Mbps]

提案手法を用いることで，バックグラウンドトラフィックの変動があった場合にも，アプリケーションの要求する目標 RTT を維持できることを示すために，バックグラウンドの TCP セッション数をある時刻において増加させるシミュレーションを行った．本評価におけるパラメータ設定を表 1 に示す．TCP セッション数を 20 本から 25 本に変化させる場合と，25 本から 30 本に変化させる場合のそれぞれについて，10 通りのトポロジと 10 通りのセッションの組み合わせを設定することにより，100 回ずつのシミュレーションを行った．シミュレーション時間は 600 s とし，シミュレーション開始後，1 s までに TCP セッションがランダムなタイミングに通信を開始し，1 s に提案手法を用いたセッションが通信を開始するものとした．さらに，シミュレーション時間 300 s に新たに 5 本の TCP セッションが通信を開始するものとした．また，本評価では，提案手法の評価に用いたものと同じのトポロジ，セッションの組み

合わせにおいて、提案手法の代わりに TCP を用いた場合の、時刻 320 s から 600 s の期間における平均 RTT の 98% を、目標 RTT とした。

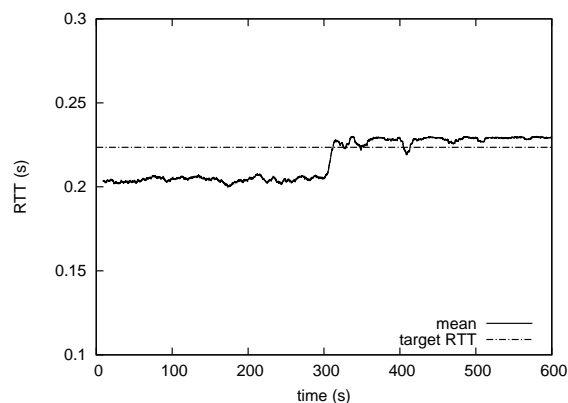
図 2 にシミュレーション結果の一例を示す。ここでは、バックグラウンドの TCP セッション数を時刻 300 s で、25 本から 30 本に増加させている。図 2(a) は、提案手法の代わりに TCP を用いた場合の幅を 9 秒とした RTT の移動平均値を示している。なお、提案手法において過去 100 個分の RTT の観測値を得るための期間はおよそ 9 秒である。図に示されるとおり、バックグラウンドトラヒックの増加にともない、RTT が大きくなっている。図 2(b) に、目標 RTT を図 2(a) にもとづいて設定した場合の、提案手法における、過去 100 個分の RR パケットの RTT の観測値から導出された RTT の平均値を示す。また、図 2(c) に、提案手法における送信レートの変化の様子を示す。図に示されるとおり、提案手法においては、送信レートを制御することによって、バックグラウンドトラヒックによらず目標 RTT に近い RTT が達成できていることが分かる。

図 3 および図 4 に、TCP セッション数を 20 本から 25 本に変更した場合、25 本から 30 本に変更した場合のそれぞれにおける、変動係数 C と平均二乗誤差 M の関係、および変動係数 C と遅延ジッタ J の関係をそれぞれ示す。図中の丸印は平均値を表す。なお、いずれの図においても、外れ値となった 1 回のシミュレーションの結果を除いた。

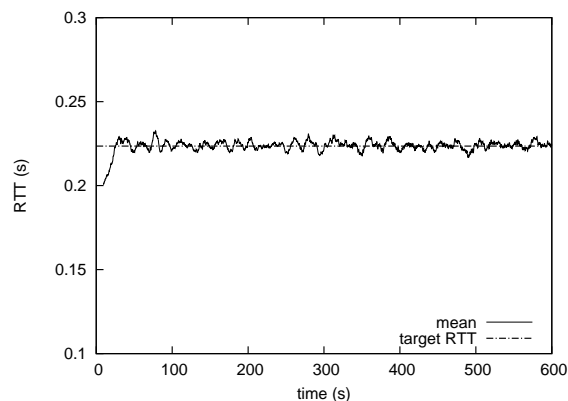
いずれの図においても、比較的多くの点が左下、すなわち誤差や変動、ジッタが小さい領域に集まっている。平均二乗誤差、変動係数、遅延ジッタが大きい結果については、送信レートの増減が原因と考えられる。これらのシミュレーションでは、特に、バックグラウンドトラヒックを増加させる前での送信レートの変動が大きい(図 2(c))。これは、目標 RTT を、バックグラウンドトラヒック増加後の TCP の RTT にあわせて設定しているためである。目標 RTT が大きいため、送信側端末は、ある程度バッファにパケットが蓄積されて RTT が大きくなるように、送信レートを上げる。送信レートがある程度高くなり、いったんパケットが蓄積されはじめると、微小な送信レートの増減が RTT の大きな変化となって現れるようになる。その結果、送信レートの増減が過制御に陥りやすくなり、平均 RTT が大きく変動してしまう。そのため、平均二乗誤差、変動係数、遅延ジッタが大きくなる。

また、バックグラウンドトラヒック増加後において、送信レートが最小送信レート a_{min} に達してしまうことにより、平均 RTT が目標 RTT を上回った状態で安定する結果も得られている。競合する TCP セッション数が多く、過負荷な環境においては、提案手法のセッションが送信レートを下げても影響が小さい。そのため、バッファに蓄積されたパケット数が減らず、RTT が小さくならないため、送信レートを下限まで下げ続けることになる。

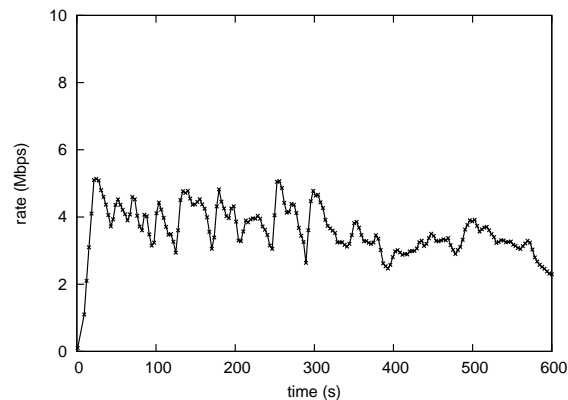
例えば許容できる変動の大きさとして平均二乗誤差を 20 以下、変動係数を 0.03 以下、ジッタを 15 ms 以下とした場合、これを達成できているシミュレーションの割合は、図 3、図 4 において、それぞれ 52%、45% である。また、平均二乗誤差 40



(a) TCP セッションの場合の平均 RTT の変化



(b) 提案手法における平均 RTT の変化



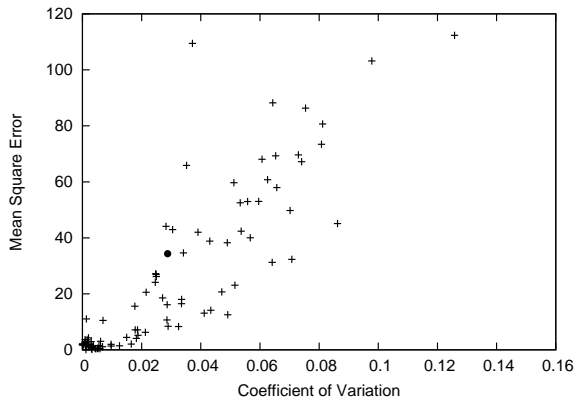
(c) 提案手法における送信レートの変化

図 2 RTT と送信レートの時間変動

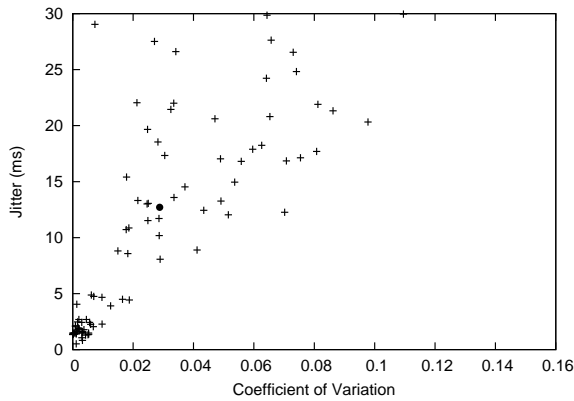
以下、変動係数 0.06 以下、ジッタ 25 ms 以下と条件を緩和した場合には、それぞれ 67%、63% となる。ITU-T Y.1541 勧告においては、双方向性の高いマルチメディアアプリケーション向けのクラス 0、クラス 1 では遅延ジッタとして 50ms が要求されている。

5. おわりに

本稿では、ネットワーク内部の構造や動作原理の情報を必要とせず、エンド間で観測される遅延のみにもとづいて、送信レートの制御を行うことにより、ネットワークの負荷変動に対して所望のエンド間遅延を達成、維持することのできる自律的な送



(a) 変動係数 C と平均二乗誤差 M の関係



(b) 変動係数 C と遅延ジッタ J の関係

図 3 TCP セッションを数 20 本から 25 本に変化させた場合

信レート制御手法を提案し、シミュレーション評価を行った。

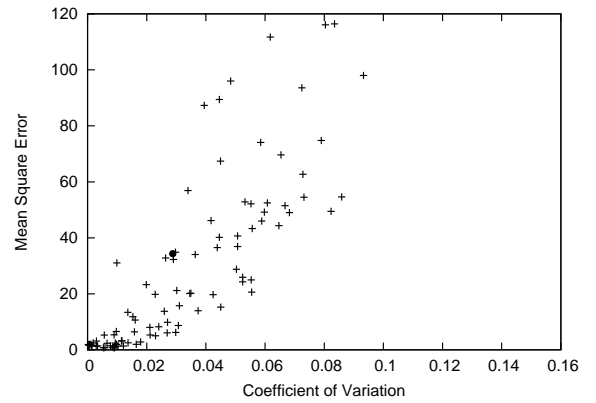
およそ半分のシミュレーションにおいては平均二乗誤差、変動係数、遅延ジッタが小さく、目標 RTT を安定的に達成できているものの、トポロジやバックグラウンドトラフィックとの競合度合いなどによって、その性能が大きく影響を受けることが明らかとなった。本稿でのシミュレーションでは、ノード数やセッション数が少なく、セッションの挙動間の相互依存性が強いことがその一因と考えられる。そこで、今後は、ネットワークをより大規模にすることにより、提案手法のセッションから見て、より安定したゆらぎの状態が得られる環境を設定し、提案手法の有効性を評価したい。また、送信レートの更新間隔や、平均 RTT や分散を算出するための観測範囲、定数 b などのパラメータを変化させ、提案手法のパラメータ依存性や、パラメータのネットワーク環境への依存性についても分析したい。

謝 辞

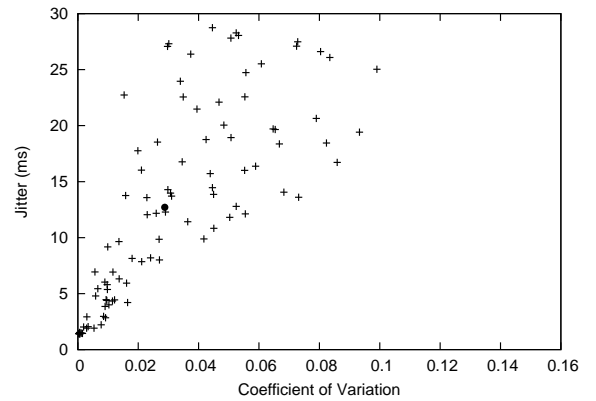
本研究の一部は科研費基盤 (B) 22300023, 文部科学省グローバル COE プログラム (研究拠点形成費) によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] L. Atzori and M. Lobina, "Playout buffering in IP telephony: a survey discussing problems and approaches," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 8, pp. 36–46, 3th quarter 2006.
- [2] Y. Mansour and B. Patt-Shamir, "Jitter control in QoS net-



(a) 変動係数 C 平均二乗誤差 M の関係



(b) 変動係数 C と遅延ジッタ J の関係

図 4 TCP セッションを数 25 本から 30 本に変化させた場合

works," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, pp. 492–502, Aug. 2001.

- [3] J. Pedrasa and C. Festin, "Value-based utility for jitter management," in *Proceedings of IEEE Region 10 Conference*, pp. 1–5, Nov. 2006.
- [4] D. Hay and G. Scalosub, "Jitter regulation for multiple streams," *ACM Transactions on Algorithms*, vol. 6, pp. 1–19, Dec. 2009.
- [5] W. He, K. Nahrstedt, and X. Liu, "End-to-end delay control of multimedia applications over multihop wireless links," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*, vol. 5, pp. 1–20, Nov. 2008.
- [6] N. Wakamiya, K. Leibnitz, and M. Murata, *Autonomic Network Management Principle: From concepts to Applications*, ch. A Self-organizing architecture for scalable, adaptive and robust networking. Elsevier, 2010.
- [7] 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.
- [8] 若宮直紀, 村田正幸, "生物ダイナミクスに学ぶ情報ネットワーク制御," システム制御学会誌特集「ダイナミクスに基づく情報処理の諸相」, vol. 54, pp. 15–21, Jan. 2010.
- [9] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RFC3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," July 2003.
- [10] "The network simulator ns-2." <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [11] A. L. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.