

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

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、ベストエフォート型のネットワークであるため、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。そこで我々は、ゆらぎが内在するシステムにおける外力と応答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、制御パケットの送受信によって観測される双方向遅延に基づき送信レートを決定することで、ネットワークの負荷変動に対して所望のエンド間遅延に安定させる送信レート制御手法を提案している。本稿では、データパケットの片道遅延に基づいてレート制御を行う改良を行い、シミュレーション評価により、ボトルネックリンクを模したダンベル型トポロジにおいて、バックグラウンドトラヒックの増減に対し、事前に定められた所望のエンド間遅延を達成、維持しつつ、改良前の手法よりも高い送信レートを保てることを示した。

キーワード 送信レート制御, 遅延, ゆらぎ, アトラクタ摂動モデル

Improvement 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 We proposed a novel rate control mechanism based on the attractor perturbation model, which accomplishes and maintains the targeted delay in dynamically changing environment. The attractor selection model was derived from biological experiments and it explains the proportional relationship between a reaction of a fluctuating system and the amount of external force. In this paper, we improve the proposal by changing the observed object from RTT to one-way delay. We confirm that the improved method can stably maintain the targeted delay while keeping the sending rate higher than the former method.

Key words rate control, end-to-end delay, fluctuation, attractor perturbation model

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、それぞれのセッションにおける通信速度や遅延、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、テレビ電話や動画ストリーミングなど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を対象に、遅延ゆらぎを抑制、除去する手法が提案されているが [1-5], いずれも遅延変動の予測や中継ノードの変更が必要となるなど、今後のネットワークの大規模化、複雑化に対して十分に対応できるものではない。そこで我々は、送受信端末に

おける自律的かつ簡便な機構によって遅延のゆらぎを抑制することのできる、送信レート制御手法を提案している [6]。

提案手法では、ゆらぎの内在するシステムにおいて、システムに加える外力とその応答の間に、ゆらぎの大きさに比例した関係があることを表したアトラクタ摂動モデルを用いることにより、所望の遅延を達成するための送信レート変更量を決定し、効果的なレート制御を行う。アトラクタ摂動モデルは、バクテリアの進化過程において、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いという現象から導出された数理モデルである [7]。遺伝子表現型を a , その変化量を Δa , また、遺伝子表現型が a であるときの平均蛍光タンパク

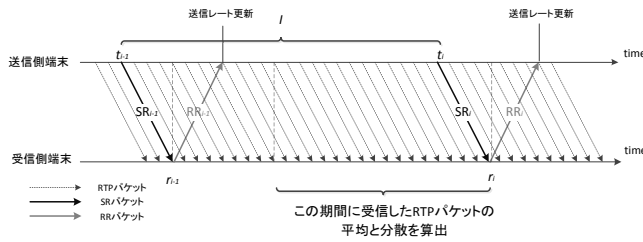


図1 提案手法におけるパケット送受信とレート制御のタイミング

質量を $\langle x \rangle_a$ 、蛍光タンパク質量の分散を σ_a^2 とすると、アトラクタ摂動モデルは次式として表現される。

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

係数 b は定数である。式(1)は、ゆらぎのあるシステムへの外力 a を微量 Δa だけ変化させた時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を表している。したがって、アトラクタ摂動モデルに従うと、例えば、ゆらぎの小さいシステムにおいて高い制御効果を得るためには外力を大きく変更する必要があり、一方、ゆらぎの大きいシステムにおいては小さな制御によって大きな効果が得られることとなる。

提案手法は、アトラクタ摂動モデルにおける外力 a を送信レート、観測値 x をエンド間遅延と対応づけ、所望の目標遅延 $\langle x \rangle_{a+\Delta a}$ 秒を達成するための送信レート変更量 Δa Mbps を算出することにより、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、効果的に送信レートを調整し、エンド間遅延を安定化させることができる。文献[6]では、シミュレーション評価により、200回のシミュレーション条件のうち、130回においては、バックグラウンドトラヒックによる負荷が変化した場合にも、目標遅延に対する平均遅延の平均二乗誤差や、平均遅延の変動係数、遅延ジッタが小さく抑えられ、目標遅延を安定して達成できることを示した。一方、残り70回のシミュレーションでは、自らの送信レートの変更によってエンド間遅延の変動が大きくなっていた。これは、提案手法では、一定時間ごとに送受信される RTCP の Sender Report パケットと Receiver Report パケット（以降、SR パケット、RR パケットと表記する）を用いて計測した往復伝搬遅延を制御に用いていたことによる。具体的には、送信レート a Mbps と定数 $N(N > 0)$ の積以上の個数の RTP パケットごとに SR パケットを送信して、一定時間ごとの計測を行い、 D 秒ごとに過去 K 回の計測結果に基づいて送信レートの更新を行っていた。エンド間遅延の平均や分散の算出のもととなる標本数を増やすために、ウィンドウサイズ K を大きくすると、送信レート更新間隔から外れた期間の計測結果を含むことによる誤差が生じ、一方、SR パケット送信間隔 N を小さくすると、計測によってネットワークに負荷をかけるために遅延が大きく見積もられてしまう。

そこで、本稿では、遅延の計測精度を高めるため、RTP パケットの片道遅延を送受信端末間で観測するように改良を行った。送信側端末が、受信側端末での RTP パケットの片道遅延の計測結果を得るために、SR パケットと RR パケットの送受

信を行うが、その送受信間隔を送信レート制御間隔と等しくしても、十分な標本数を得ることができる。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2. 章では、RTP パケットの片道遅延を観測値とするレート制御手法の詳細を述べる。次に、3. 章において、シミュレーション評価により、その有効性を示す。最後に、4. 章で本稿のまとめを述べる。

2. アトラクタ摂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 [8] を用いて数分程度以上の通信を行うアプリケーションを対象とし、RTP パケットの送信間隔を調整することによって送信レートを制御する。なお、アプリケーションは、安定化の目標とする目標遅延 T 秒と、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 を申告する。以降では、提案手法の詳細を述べる。

2.1 提案手法の概要

提案手法では、一定間隔 I 秒ごとに RTCP パケットを送受信し、RTP パケットの送信間隔を変更する。レート制御の間隔を制御インターバルと呼ぶ。送信側端末は RR パケットを受信することで、送信レート a Mbps で RTP パケットを送っていた直前の制御インターバルにおける RTP パケットの片道遅延の平均値 $\langle x \rangle_a$ 秒、分散 σ_a^2 を得る。このとき、安定化の目標とする片道遅延 T 秒をアトラクタ摂動モデルにおける $\langle x \rangle_{a+\Delta a}$ とみなし、送信レートの変更量 Δa Mbps を、 $\Delta a = (\langle x \rangle_{a+\Delta a} - \langle x \rangle_a) / (b\sigma_a^2)$ により導出する。 b は制御パラメータである。

2.2 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指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。その後、制御インターバル I 秒ごとに、受信側端末に向けて SR パケットを送信する。ここで、送信される SR パケットが通信開始から i 番目であり、送信時刻 t_i 秒であるものとする。SR パケットには拡張ヘッダを設け、前回の SR パケットの送信時刻 t_{i-1} 秒を格納する。図1に RTP パケット、SR パケット、RR パケットの送受信、及び、レート変更の様子を示す。

i 番目の SR パケットを受信した受信側端末は、その受信時刻 r_i 秒よりも以前に受信し、かつ、タイムスタンプが $t_{i-1} + 2(r_i - t_i)$ 秒より大きい RTP パケットについてその片道遅延の平均 \bar{x}_{i-1} 秒と分散 σ_{i-1}^2 を算出し、拡張ヘッダにそれらの値を格納した RR パケットを送信側端末へ送信する。

送信側端末は、 i 番目の SR パケットに対する RR パケットを受信すると、受信した RR パケットに含まれる情報を用いて送信レートの更新を行う。まず、アプリケーションの指定する目標片道遅延 T 秒とあらかじめ設定された係数 $b (b > 0)$ から、次式により送信レートの変更量 Δa Mbps 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。

$$\Delta a = \min(\Delta_{max}, \max(\Delta_{min}, \frac{T - \bar{x}_{i-1}}{b\sigma_{i-1}^2})) \quad (2)$$

更に、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

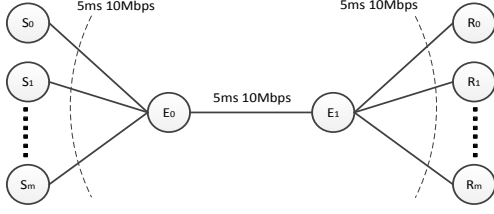


図2 シミュレーション評価のネットワークポロジ

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．

$$a_{new} = \min(a_{max}, \max(a_{min}, a + \Delta a)) \quad (3)$$

なお、 i 番目の SR パケット送信予定時刻 $t_{i-1} + I$ 秒において、送信側端末が $i - n$ ($n \in \{1, 2, 3\}$) 番目の SR パケットに対する RR パケットを全て受信していなければ、ネットワーク内で輻輳が発生していると判断し、SR パケットを送信せずに、送信レートを現在の送信レートの半分に更新する．更に I 秒経過後に送信される i 番目の SR パケットの拡張ヘッダには、前回の送信レート更新時刻 $t_{i-1} + I$ 秒を格納する．この SR パケットを受信した受信側端末は、SR パケットの拡張ヘッダに格納されている時刻を用いて、 i 番目の SR パケットを受信した時刻 r_i 秒よりも前に受信し、かつ、タイムスタンプが $t_{i-1} + I + 2(r_i - t_i)$ 秒より大きい RTP パケットについて、その片道遅延の平均 \bar{x}_{i-1} 秒と分散 σ_{i-1}^2 を算出して、RR パケットにより送信側端末に通知する．

3. 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 を用いて行った．

3.1 評価モデル

シミュレーションでは、図2に示したダンベル型トポロジを用いる．全てのリンクを全二重とし、帯域を 10 Mbps、伝搬遅延を 5 ミリ秒とした．また、ノード E_0, E_1 は FIFO、DropTail で管理された容量 80 パケットのバッファを有している．

バックグラウンドトラヒックとして、セグメントの送出間隔が指数分布に従うような m 本の UDP セッションをノード S_i を送信側端末、ノード R_i を受信側端末として設定した ($1 \leq i \leq m$)．なお、バックグラウンドセッションでの UDP データグラムのペイロード長は 1000 byte とした．

また、ノード S_0 を送信側端末、ノード R_0 を受信側端末として設定したセッションにおいて、提案手法を動作させた．このセッションを着目セッションと呼ぶ．RTP パケットは、ペイロード、RTP ヘッダ、UDP ヘッダ、IP ヘッダをあわせて 1028 byte の大きさとし、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．

3.2 アトラクタ摂動モデルの検証と係数 b の設定

着目セッションに CBR トラヒックを設定し、送信レートと片道遅延の関係を検証することにより、本シミュレーション条件におけるアトラクタ摂動モデルの成立を確認し、レート

制御に用いる係数 b を決定する．具体的には、まず、平均送信レート 0.25 Mbps のバックグラウンドセッションを m 本設定し、乱数のシードを k としてシミュレーションを行った際の、着目セッションの送信レート a Mbps における平均片道遅延 $\langle x \rangle_{m,k,a}$ 秒と分散 $\sigma_{m,k,a}^2$ を求める．なお、送信レート a Mbps は 0.1 Mbps 刻みとし、各々の送信レートでのシミュレーションを別々に行う．

次に、 m, k, a のそれぞれの組み合わせ $l = (m, k, a)$ について、その組み合わせ数を n とし、片道遅延の分散、及び平均片道遅延の変化量 $(x_l, y_l) = (\sigma_{m,k,a}^2 \Delta a, \langle x \rangle_{m,k,a+0.1} - \langle x \rangle_{m,k,a})$ を求める．更に、次式を用いて、最小二乗法により $y = \alpha x + \beta$ の近似線を求め、得られた α を係数 b とする．

$$\alpha = \frac{n \sum_{l=1}^n x_l y_l - \sum_{l=1}^n x_l \sum_{l=1}^n y_l}{n \sum_{l=1}^n x_l^2 - \left(\sum_{l=1}^n x_l \right)^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\sum_{l=1}^n x_l^2 \sum_{l=1}^n y_l - \sum_{l=1}^n x_l y_l \sum_{l=1}^n x_l}{n \sum_{l=1}^n x_l^2 - \left(\sum_{l=1}^n x_l \right)^2} \quad (5)$$

バックグラウンドセッション数 m について 18 本から 25 本の 8 通り、更にそれぞれの m に対して乱数のシード k が 10 通りの計 80 通りのバックグラウンドセッションの設定に対し、着目セッションの送信レート a を 3.0 Mbps から 5.5 Mbps まで 0.1 Mbps 刻みの 26 通りのシミュレーションを行って得た結果より、片道遅延の変化量 $\langle x \rangle_{m,k,a+0.1} - \langle x \rangle_{m,k,a}$ 秒と片道遅延の分散 $\sigma_{m,k,a}^2$ の組を 1920 個算出した．

片道遅延の変化量 $\langle x \rangle_{m,k,a+0.1} - \langle x \rangle_{m,k,a}$ と片道遅延の分散と送信レートの変化量の積 $\sigma_{m,k,a}^2 \Delta a$ の関係を図3に示す．図3より、分散が小さいと送信レートの変化に対して片道遅延の変化量が小さく、分散が大きいと片道遅延の変化量も大きくなっていることが確認できる．よって、 $\langle x \rangle_{a+0.1} - \langle x \rangle_a$ と $\sigma_a^2 \Delta a$ に正の相関が確認され、アトラクタ摂動モデルが成立していると考えられる．

しかしながら、送信レート a Mbps におけるパケットロス率が 0.001 以下の点 (図中、丸) と 0.001 より大きい点 (四角) では相関が異なる．これは、図には現れていないが、パケットロス発生前後で、送信レート増加に対する片道遅延の変化量や分散の変化の様子が異なるためである．送信レートが低い状態では、ノード E_0 のバッファにはほとんどパケットが蓄積しておらず、片道遅延の分散や、送信レートの増加に対する片道遅延の変化は小さい (左下に位置する丸印)．送信レートが高くなるにしたがい、徐々にパケットがバッファに蓄積されるようになるため、片道遅延が大きくなるとともに、その分散や変化量も大きくなり、図3の右上方向に丸印が増えていく．送信レートがより高くなると、バッファに空きがなくなってくるため、パケットロスが発生するようになる．更に送信レートを上げると、多くのパケットが棄却されるようになるとともに、棄却されずに受信側端末で受信されたパケットの片道遅延は大きいまま安定するため、分散や送信レート増加に対する変化量が小さくなる．そのため、送信レートの増加にともなって、図3の右上から左下方向へと四角印が増えていく．

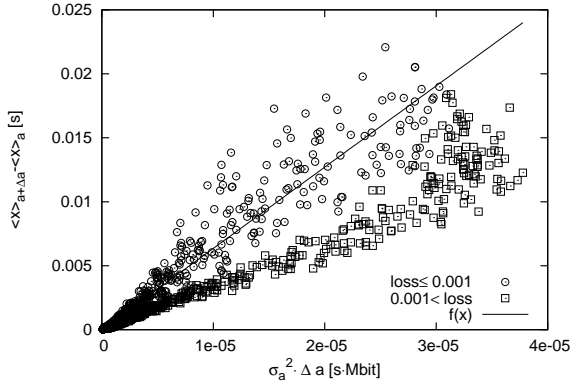


図 3 片道遅延の平均値の変化量と片道遅延の分散の関係

このように、適切な係数 b はネットワークの負荷状態によって異なると考えられるが、本稿では、ITU-T Y.1541 勧告において、双方向性の高いアプリケーション向けのクラス 0、クラス 1 で上限とされているパケットロス率 0.001 以下を提案手法の適応範囲とする。1920 個のデータのうち、送信レート a Mbps におけるパケットロス率が 0.001 以下である 1121 個 ($n = 1121$) から最小二乗法により求めた近似線 $f(x) = \alpha x + \beta$ (図 3 の直線) の傾き α から、係数 b を 635 とする。

3.3 評価指標

本節では、目標片道遅延の達成度、遅延の安定度を評価する指標について述べる。

3.3.1 平均二乗誤差

目標片道遅延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、 i 番目の SR パケットの送信時刻 t_i 秒から $i+1$ 番目の SR のパケットの送信時刻 t_{i+1} 秒の間に送信され、かつ、この期間に受信側端末に受信された RTP パケットの平均片道遅延を T_i 秒とする。なお、 $T_i \neq \bar{x}_i$ である。あるシミュレーションで送信した全 SR パケットの個数を n とし、そのシミュレーションにおける目標片道遅延を T 秒としたとき、平均二乗誤差 M を次式で求める。なお、 T_0 はシミュレーション開始時刻から 1 番目の SR パケット送信時刻までに送信され、かつ受信側端末に受信された RTP パケットの平均片道遅延、 T_{n+1} は n 番目の SR パケット送信時刻から、シミュレーション終了時刻までに送信され、かつ受信側端末に受信された RTP パケットの平均片道遅延とする。

$$M = \frac{1}{n+2} \sum_{i=0}^{n+1} (T_i - T)^2 \quad (6)$$

平均二乗誤差 M が小さいほど、多くの時間において目標片道遅延に近い片道遅延が達成できていることを意味する。

3.3.2 変動係数

平均片道遅延の安定性を、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平均遅延の相加平均 \bar{T} と、標準偏差 σ^2 をそれぞれ次式で求める。

$$\bar{T} = \frac{1}{n+2} \sum_{i=0}^{n+1} T_i \quad (7)$$

表 1 パラメータ設定

パラメータ	値
係数 b	635
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}	1 [Mbps]
最大送信レート a_{max}	9.0 [Mbps]
SR パケット送信間隔 I (RTP ベース)	5 [秒]
定数 N (RTCP ベース)	10
定数 K (RTCP ベース)	100 [個]
送信レート更新間隔 D (RTCP ベース)	5 [秒]

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{1}{n+2} \sum_{i=0}^{n+1} (T_i - \bar{T})^2} \quad (8)$$

これにより、変動係数 C を次式で求める。変動係数 C が小さいほど片道遅延が安定していることを意味する。

$$C = \frac{\sigma^2}{\bar{T}} \quad (9)$$

3.3.3 遅延ジッタ

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。

$$J = \max_{0 \leq i \leq n+1} \{|T_i - T|\} \quad (10)$$

すなわち、遅延ジッタは目標片道遅延に対する得られた平均片道遅延の最大誤差である。

3.4 基本評価

提案手法により、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片道遅延を維持できることを示すために、バックグラウンドセッション数をシミュレーション時刻 300 秒に 20 本から 23 本へと増加させる 600 秒のシミュレーション評価を 20 回行った。20 本のバックグラウンドセッションはシミュレーション開始後 1 秒までにそれぞれ通信を開始し、着目セッションは時刻 1 秒に通信を開始する。本評価におけるパラメータ設定を表 1 に示す。比較対象として、着目セッションにおいて、RTP と RTCP を用いて 4.0 Mbps の CBR トラフィックを送信する場合 (以降 CBR 通信と呼ぶ)、及び文献 [6] で提案した改良前の手法 (以降、RTCP ベースと呼び、改良後のものを RTP ベースと呼ぶ) についても評価を行った。なお、制御には用いていないが、CBR 通信における SR パケットの送信間隔は 5 秒とした。RTCP ベース、及び RTP ベースの手法の目標遅延としては、同一のシミュレーション条件における、バックグラウンドセッション数が 20 本の時の CBR 通信の RTP パケットの平均片道遅延、及び RTCP パケット送受信で計測される平均双方向遅延をそれぞれ用いた。

図 4 に、ある同じ条件下において、CBR 通信と RTP ベースで送受信された RTP パケットの SR パケット送信間隔での平均片道遅延と、RTCP ベースの送信レート更新間隔での平均片道遅延をそれぞれ示す。セッション数が 20 本のときの CBR 通信の RTP パケットの平均片道遅延は 19.721 ミリ秒、RTCP パケット送受信で計測された平均双方向遅延は 33.446 ミリ秒

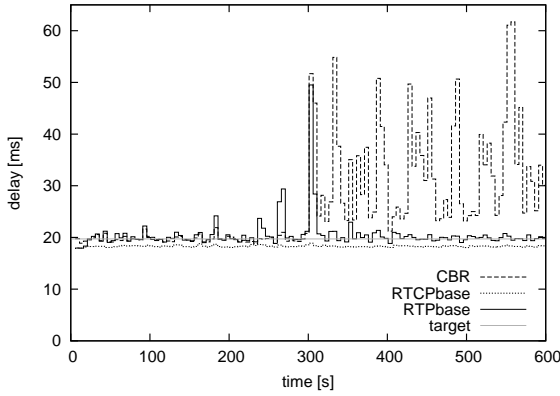


図 4 平均片道遅延の変化

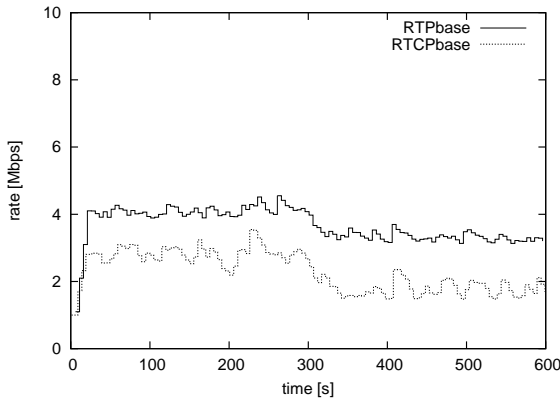
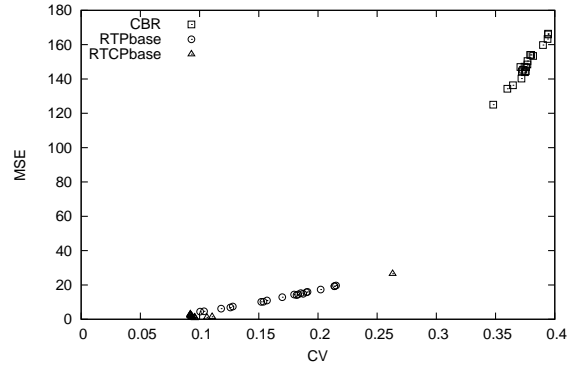


図 5 提案手法における送信レートの変化

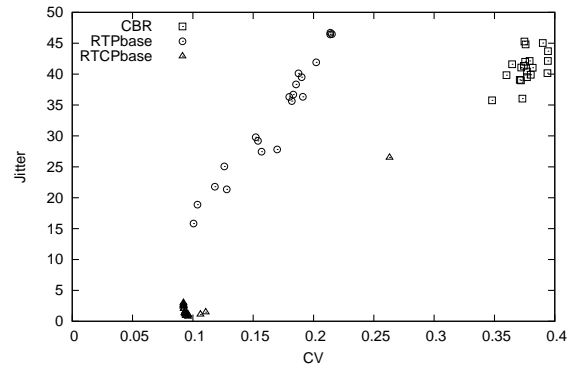
であった．また図 5 に RTCP ベースと RTP ベースのそれぞれの手法における送信レートの変化を示す．図 4 より，CBR 通信ではバックグラウンドセッション数の増加にともなって平均片道遅延が増加し，また，変動していることが分かる．

また，RTCP ベースの場合には，バックグラウンドセッション数の増加前後で平均片道遅延が変化せず，安定しているものの，CBR 通信での平均片道遅延よりも低いことが分かる．これは，図 5 に示されるように，RTCP ベースの送信レートが低く保たれているためであるが，このとき，RTCP パケットの送受信で計測される双方向遅延は目標遅延を達成しているため，送信レートを上げることができない．RTCP ベースの送信レートが低く保たれているためであるが，このとき，RTCP パケットの送受信で計測される双方向遅延は目標遅延を達成しているため，送信レートを上げることができない．これは，RTCP ベースでは，同一条件の CBR 通信よりも双方向遅延を大きく計測されているためである．また，5 秒ごとの送信レート制御に対して，100 個の双方向遅延の計測期間はおよそ 8 秒であり，直近よりも前の制御インターバルの計測値を含み，その結果には誤差が生じる．

一方，RTP ベースにおいては，バックグラウンドセッション数の増加直後に一時的な平均片道遅延の上昇が見られるものの，おおむね目標片道遅延を達成している．また，図 5 に示されるように，バックグラウンドセッション数増加前の平均送信レートは 4.035 Mbps と CBR 通信のものと同く，セッション数が



(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 6 平均二乗誤差，変動係数，遅延ジッタの関係

増加した後も平均 3.444 Mbps と高い送信レートを保っている．なお，全シミュレーションを通した RTCP ベース，RTP ベースの平均送信レートは，それぞれ 2.513 Mbps と 3.721 Mbps であった．

図 6 に変動係数 C と平均二乗誤差 M の関係，及び変動係数 C と遅延ジッタ J の散布図をそれぞれ示す．いずれの図においても，RTP ベースは CBR 通信よりも左下，すなわち，平均二乗誤差，変動係数，遅延ジッタが小さい領域に点が集まっている．CBR 通信の変動係数，平均二乗誤差が大きいのは，バックグラウンドセッション数の増加後に，平均片道遅延が大きくなるとともに変動していることによる．また，RTCP ベースと RTP ベースを比較すると，一部を除き，RTCP ベースの方が性能が高く，例えばアプリケーションの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 0.2 以下，遅延ジッタを 50 ミリ秒以下とした場合，これを達成できているシミュレーションは，RTCP ベースでは 20 回中 19 回，RTP ベースでは 20 回中 16 回であった．これは，RTCP ベースにおける平均片道遅延が低い値で安定しているためであるが，送信レートも低いため，テレビ電話などへ適用した場合，画質や音質の低下を引き起こす可能性がある．20 回のシミュレーションにおいて，RTCP ベースの送信レートが最低レートである 1.0 Mbps のままであったものが 3 回あった．一方，RTP ベースにおいて平均二乗誤差，変動係数，遅延ジッタが大きいのは，バックグラウンドセッション数増加直後の一時的な平均片道遅延の増加によるものであるが，平均片道遅延が目標片道遅延よりも 10

ミリ秒以上大きい期間は平均 7.509 秒であった。

3.5 係数 b の影響

前節では予備実験によって得られた係数 b を用いた評価を行ったが、ネットワークの状態などによって最適な値は異なると思われる。そこで本節では、ノードのバッファ容量が 80 パケット、及び 300 パケットの場合について、係数 b の値と平均二乗誤差の関係性を評価した。結果を図 7 に示す。図には、それぞれのバッファサイズに対して、バックグラウンドセッション数を 20 本から 23 本、あるいは 22 本から 25 本に増加させるシミュレーションを、係数 b を 100 から 1000 まで 100 刻み、また 1100 から 4100 まで 500 刻みに変化させ、10 回ずつ行って得られた平均二乗誤差の平均値を示している。

バックグラウンドセッション数が 20 本から 23 本に増加した場合においては、バッファ容量によらず、係数 b が大きくなるにしたがい平均二乗誤差がいったん小さくなった後、係数 b が 600 を超えると徐々に大きくなっている。なお、図 3 から求めたバッファ容量 80 パケットにおける係数 b の値は 635 であり、図 7 の結果と適合している。一方、バックグラウンドセッション数が 22 本から 25 本に増加する場合には、係数 b の増加に対して平均二乗誤差が単調減少しており、また、ある係数 b の値に対する平均二乗誤差がバッファ容量によって大きく異なる。この理由は次のように考えられる。まず、バックグラウンドセッション数が 20 本から 23 本に増加する場合には、ネットワークが比較的軽負荷な状態にとどまり、パケットロス率が 0.001 を下回るため、提案手法が効果的に動作することによってバッファ容量の影響を受けにくく、平均二乗誤差が小さく抑えられる。一方、バックグラウンドセッション数が 25 本に増加すると、パケットロスが発生するようになるため、平均片道遅延がバッファ容量の影響を受けやすくなる。更に、3.2 節で述べたように、パケットロス発生前後で送信レート制御に対する平均片道遅延の変化の振る舞いが異なるため、そもそも共通の係数 b を定めることは難しい。

例えば、バッファ容量が 80 パケットの場合には係数 b を 600 近傍に、またバッファ容量が 300 パケットの場合には、低負荷時、高負荷時それぞれの係数 b と平均二乗誤差の関係から 3100 近傍に、それぞれ設定すればよいと言える。しかしながら、送信端末間の通信において、中継ノードのバッファ容量の情報を得ることは困難であり、また、トポロジなど他の条件も適切な係数 b の値に影響を与えられられるため、この結果のみに基づいて係数 b を定めることはできない。また、事前の計測によって係数 b を決定したとしても、経路の切り替えや、トポロジ変化などのために、最適値は時々刻々と変化する。したがって、実際のネットワークにおいては、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になるものと考えられる。

4. おわりに

本稿では、エンド間で観測される遅延のみに基づいて送信レートを制御することで、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レート制御手

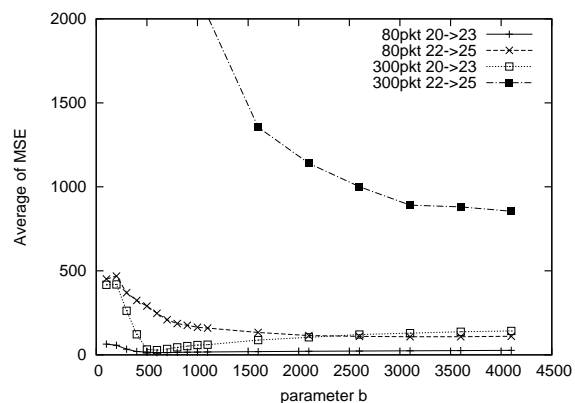


図 7 係数 b と平均二乗誤差の関係

法について、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、改良前と比較して送信レートを高く保てることを示したが、一方で、その性能は、係数 b に影響を受けることが明らかとなった。係数 b の最適値は、ネットワークのトポロジや、通信経路上のバッファ容量、ネットワークの負荷状態などに依存していると考えられ、今後は、係数 b の適応機構の検討や、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を行う。

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, 3rd quarter 2006.
- [2] Y. Mansour and B. Patt-Shamir, "Jitter control in QoS networks," *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," *IEEE/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] 脇みどり, 若宮直紀, 村田正幸, "アトラクタ振動モデルを応用したエンド間遅延を安定させる送信レート制御手法の提案と評価," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2011-51), pp. 35–40, July 2011.
- [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] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RFC3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," July 2003.