社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

# 広域ネットワーク向けアクティブキュー管理機構 SPRED の提案

山本　英之† 　大崎　博之† 　今瀬　眞†

† 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: †{hideymmt,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　アクティブキュー管理機構は、ルータに到着するパケットを積極的に廃棄することにより、ルータのバッファ内パケット数を管理するルータの輻輳制御機構である。アクティブキュー管理機構を用いることにより、ルータのバッファにおける平均遅延時間を減少させ、スループットを向上させることができると期待されている。代表的なアクティブキュー管理機構として RED (Random Early Detection) が提案されているが、伝搬遅延が大きな広域ネットワークにおいて、性能が低下することが報告されている。そこで本稿では、広域ネットワーク向けアクティブキュー管理機構 SPRED (Smith Predictor for Random Early Detection) を提案する。提案する SPRED の特徴は、制御理論における遅延補償器 (スミス予測器) を用いることにより、伝搬遅延が大きなネットワークにおいて、高い定常特性と過渡特性を実現するという点にある。本稿では、解析およびシミュレーション実験により、提案する SPRED の有効性を明らかにする。
キーワード　アクティブキュー管理機構、広域ネットワーク、RED (Random Early Detection)、制御理論、スミス予測器

# SPRED: Active Queue Management Mechanism for Wide-Area Networks

Hideyuki YAMAMOTO†, Hiroyuki OHSAKI†, and Makoto IMASE†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan
E-mail: †{hideymmt,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract**　An AQM mechanism is a congestion control mechanism at a router for controlling the number of packets in the router's buffer by actively discarding an arriving packet. An AQM mechanism can shorter the average delay in the router's buffer, and can also achieve high throughput. RED (Random Early Detection) is a representative AQM mechanism, which probabilistically discards an arriving packet. However, it is reported that the performance of RED degrades in a wide-area network with a large propagation delay. In this paper, we therefore propose an AQM mechanism called *SPRED (Smith Predictor for Random Early Detection)* for wide-area networks. The notable feature of SPRED is realizing high steady-state and transient-state performance by using a delay compensator called *Smith Predictor* for compensating a large feedback delay. In this paper, we show the effectiveness of SPRED by both analysis and simulation experiments.
**Key words**　Active Queue Management Mechanism, Wide-Area Network, RED (Random Early Detection), Control Theory, Smith Predictor

## 1　はじめに

アクティブキュー管理機構は、エンド–エンド間で動作する TCP (Transmission Control Protocol) を補助する、ルータにおける輻輳制御機構である [1]。アクティブキュー管理機構は、バッファが一杯になる前に、ルータに到着するパケットを積極的に棄却することにより、ルータのバッファ内パケット数 (キュー長) を制御する。これにより、従来の DropTail ルータと比較して、良好な性能を実現することができると期待されている。例えば、アクティブキュー管理機構を用いることにより、ルータの平均キュー長を低く抑え、バッファオーバーフローによる、スループットの低下を低く抑えることが可能となる。

これまで、さまざまなアクティブキュー管理機構が提案されている [2–5]。例えば、RED (Random Early Detection) [2] は、最

も代表的なアクティブキュー管理機構であり、ルータに到着するパケットを確率的に棄却することで、ルータのキュー長を制御する。しかし、(1) 良好な性能を達成するためには、RED のパラメータの設定を注意深く行う必要がある、(2) 定常状態における RED ルータの平均キュー長が TCP コネクション数に依存してしまう、などのさまざまな問題が指摘されている [4, 6]。

また、近年のネットワークの広域化・大規模化に伴い、伝搬遅延の大きなネットワークにおける、RED の限界も指摘されている [7]。伝搬遅延の大きなネットワークでは、RED がルータのキュー長の変動に追従できなくなる。そのため、ルータのキュー長の変動が不安定になり、バッファのオーバーフローやアンダーフローが発生してしまう。

これまでに、アクティブキュー管理機構以外の分野において、伝搬遅延の大きなネットワークにおける制御手法がいくつか提案されている。文献 [8] では、ATM (Asynchronous Transfer Mode) 網におけるレート制御方式に、制御理論における遅延補償器 (スミス予測器) を適用する手法を提案している。遅延補償器とは、伝搬遅延の大きな環境においても、制御対象の数学的モデルを利用することにより、制御遅延の影響を打ち消すことのできる (制御遅延を 0 とみなすことができる) 手法である [9]。文献 [8] で提案されているレート制御では、ボトルネックとなる ATM 交換器の、バッファ内パケット数が一定となるように制御を行う。この際、交換器から送信側ホストまでの、伝搬遅延によるフィードバック情報の遅れの影響を打ち消すために、スミス予測器を用いている。

一方、文献 [10] では、広域グリッドコンピューティングにおける、遅延補償器を用いた動的資源管理方式を提案している。広域グリッドコンピューティングでは、利用可能資源量が時間とともに変動し、かつネットワークの伝搬遅延が無視できないという問題がある。文献 [10] で提案されている動的資源管理方式は、遅延補償器を用いることにより、伝搬遅延の大きな広域グリッドコンピューティングにおける効率的な動的資源管理を実現している。

伝搬遅延の大きなネットワークにおける制御に、制御理論における遅延補償器を用いることは有効であると考えられる。しかし、文献 [8] および文献 [10] で提案されているような制御手法を実現するためには、すべての送信側ホストの制御アルゴリズムを変更しなければならない。

本稿では、広域ネットワークにおいても高い性能を実現する、アクティブキュー管理機構 SPRED (Smith Predictor for Random Early Detection) を提案する。本稿で提案する SPRED は、代表的なアクティブキュー管理機構 RED にスミス予測器を追加したものである。SPRED の特徴は、古典制御理論における遅延補償器 (スミス予測器) [11] を用いることにより、伝搬遅延が大きなネットワークにおいて、高い定常特性と過渡特性を実現するという点にある。また、SPRED を導入するためには、単一のルータのみを変更すればよく、エンドホストや他のルータを変更する必要がないというのも特徴である。

SPRED のスミス予測器が用いる制御対象の数学的モデルとして、文献 [12] で導出されている、TCP コネクションおよびルータのバッファの流体近似モデルを用いる。具体的には、文献 [12] で提案されているモデル化手法を用いて、TCP の輻輳制御機構およびルータのバッファを連続時間システムとしてモデル化する。さらに、得られた個々のモデルを相互に接続することで、SPRED ルータから見た、TCP コネクションおよびルータのバッファをモデル化する。さらに、解析およびシミュレーションにより、SPRED ルータの特性を明らかにする。その結果、広域ネットワークにおいて、SPRED が良好な定常特性および過渡特性を実現することを示す。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章において、本稿で提案するアクティブキュー管理機構 SPRED の概要と動作アルゴリズムを説明する。3 章では、解析およびシミュレーションにより、SPRED の性能を評価する。最後に、4 章において、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 アクティブキュー管理機構 SPRED

提案する SPRED は、フィードバック遅延の影響を打ち消すため、古典制御理論における遅延補償器 (スミス予測器) を利用する。具体的には、代表的なアクティブキュー管理機構 RED に、スミス予測器を適用している。スミス予測器が用いる制御対象 (アクティブキュー管理機構から見た、TCP コネクションとルータのバッファ) のモデルとして、文献 [12] で導出されている、TCP コネクションおよびルータのバッファの流体近似モデルを用いる。SPRED は、スミス予測器によってフィードバック遅延後のキュー長を予測することにより、伝搬遅延の大きいネットワークにおいても、良好な定常特性と過渡特性を実現する。

遅延補償器とは、フィードバック制御において、制御遅延を含むシステムの特性を改善するための手法である [9]。制御対象に遅延が含まれている場合、フィードバック遅延が大きくなり、制御対象の変動に追従した制御が困難となる。その結果、システムが不安定になってしまうなど、性能が大きく劣化する。遅延補償器を用いることにより、制御対象に含まれる遅延の影響を打ち消すことが可能となり、高い定常特性と過渡特性が期待できる。

スミス予測器とは、古典制御理論における代表的な遅延補償器である [11]。図 1 に、スミス予測器のブロック図を示す。スミス予測器は、制御遅延を含まない制御対象の数学的モデル $G(s)$ から、将来の出力を予測し、フィードバック遅延 $e^{-s\tau}$ の影響を打ち消すというものである。スミス予測器が良好に動作するためには、制御対象の正確な数学的モデル $G(s)$ を得ること、また、制御対象に含まれる遅延 $\tau$ を正確に見積もることが重要となる。

以下、提案するアクティブキュー管理機構 SPRED のアルゴリ

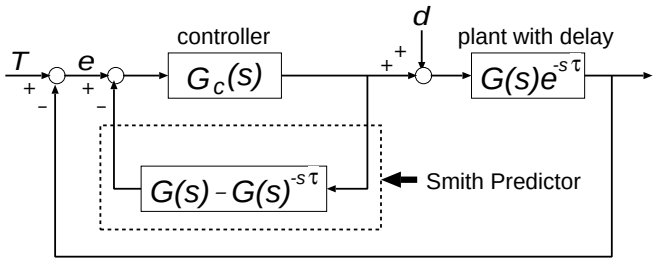


図 1　スミス予測器のブロック図

Fig. 1　Block diagram of Smith Predictor

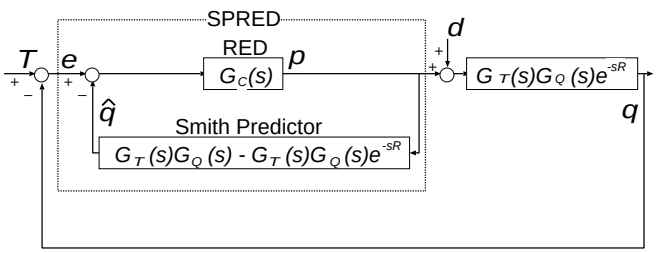


図 2　アクティブキュー管理機構 SPRED のブロック図

Fig. 2　Block diagram of SPRED (Smith Predictor for Random Early Detection)

ズムを説明する。SPRED のブロック図を、図 2 に示す。SPRED のアルゴリズムは、基本的には RED と同じである。ただし、パケットマーキング確率 $p$ の計算に、ルータの現在キュー長 $q$ をそのまま用いるのではなく、スミス予測器によって予測した現在キュー長 $\hat{q}$ をもとに補正した値を用いる。

SPRED は、ルータにパケットが到着するごとに以下の処理を実行する。

（ 1 ） 制御対象 (TCP コネクションおよびルータのバッファ) の数学的モデル $G_T(S)$ および $G_Q(S)$ を用いて、キュー長の予測値 $\hat{q}$ を計算する。

（ 2 ） ルータの現在キュー長 $q$ を、キュー長の予測値 $\hat{q}$ によって補正し、RED と同様のアルゴリズムにより、平均キュー長 $\bar{q}$ およびパケットマーキング確率 $p$ を計算する。

（ 3 ） パケットマーキング確率 $p$ を用いて、RED と同様のアルゴリズムにより、ルータに到着したパケットを確率的に廃棄する。

SPRED では、文献 [12] で導出されている、TCP の輻輳制御機構のモデルおよびルータのバッファのモデルを用いる。

まず、文献 [12] では、TCP の送信側ホストからの転送レートの変動が、以下のようにモデル化されている。

$$\dot{y} = \frac{x(t)}{y(t)R^2} - \frac{2}{3}y(t)\{y(t-R) - x(t)\} \tag{1}$$

ここで、$x(t)$ は送信側ホストへの ACK パケットの到着レート、$y(t)$ は送信側ホストからのパケット送信レート、$R$ は TCP コネクションのラウンドトリップ時間である。

また、ルータのキュー長の変動が、次式のようにモデル化されている。

$$\dot{q} = \begin{cases} x(t) - c & \text{if } q(t) > 0 \\ (x(t) - c)^+ & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

ここで、$(x)^+ \equiv \max(x, 0)$ である。また、$x(t)$ はルータへのパケット到着レート、$c$ はルータの処理能力である。

これらを組み合せることにより、アクティブキュー管理機構から見た、制御対象 (ルータのバッファおよび TCP コネクション) の流体近似モデルが、次式のように得られる。

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{N} x_i(t) - c & \text{if } q(t) > 0 \\ \left(\displaystyle\sum_{i=1}^{N} x_i(t) - c\right)^+ & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

$$\dot{y}_i(t) = \frac{x_i(t)}{y_i(t)R_i^2} - \frac{2}{3}y_i(t)\{y_i(t-R_i) - x_i(t)\} \tag{4}$$

$N$ はアクティブな TCP コネクション数、$R_i$ は $i$ 番目の TCP コネクションのラウンドトリップ時間である。SPRED では、$N$ 本の TCP コネクションの確率的な挙動が等しいと考え、制御対象の流体近似モデルとして次式を用いる。

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} Nx(t) - c & \text{if } q(t) > 0 \\ (Nx(t) - c)^+ & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

$$\dot{y}(t) = \frac{x(t)}{y(t)\overline{R}^2} - \frac{2}{3}y(t)\{y(t-\overline{R}) - x(t)\} \tag{6}$$

ここで、$\overline{R}$ は TCP コネクションの平均ラウンドトリップ時間である。ここで、式 (5) がルータのバッファ $G_Q(s)$、式 (6) が TCP コネクション $G_T(s)$ のモデルにそれぞれ相当する。

最後に、ルータにおいて、アクティブな TCP コネクション数 $N$ および TCP コネクションの平均ラウンドトリップ時間 $\overline{R}$ をどのように推測するかを議論する。SPRED におけるスミス予測器が良好に動作するためには、アクティブな TCP コネクション数 $N$ および平均ラウンドトリップ時間 $\overline{R}$ を正確に推測する必要がある。アクティブな TCP コネクション数は、文献 [13, 14] などで提案されている手法を用いることにより、すべての TCP フローを識別することなく推測が可能である。一方、TCP コネクションの平均ラウンドトリップ時間を正確に推測することは一般に容易ではないが、ルータにおいて SYN パケットおよび SYN ACK パケットを識別することにより、ラウンドトリップ時間の推測が可能であると考えられる。

## 3　性 能 評 価

本章では、解析およびシミュレーションにより、提案するアクティブキュー管理機構 SPRED の有効性を明らかにする。

解析およびシミュレーションに用いたネットワークのトポロジを図 3 に示す。伝搬遅延の等しい複数の TCP コネクションが単一の RED ルータまたは SPRED ルータを共有している。なお、図 3 において、TCP の送受信ホストおよびルータ間のリンクの帯域は、ルータ間のリンクの帯域と比較して十分に大きい。このため、ルータ間のリンクがボトルネックとなる。

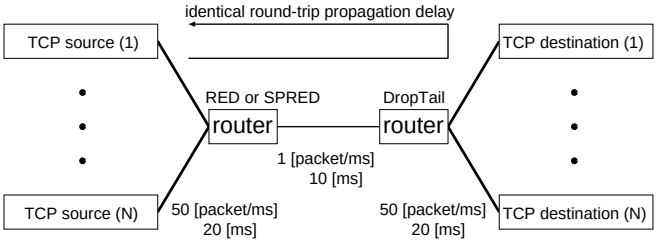


図 3　解析およびシミュレーションに用いたネットワークのトポロジ

Fig. 3　Network topology used in analysis and simulation

表 1　解析およびシミュレーションで用いたパラメータ設定

Table 1　Parameter configuration used in analysis and simulation

| | | |
|---|---|---|
| ボトルネックリンクの帯域 | 10 | [Mbit/s] |
| ボトルネックリンクの伝搬遅延 | 100 | [ms] |
| ルータのバッファサイズ | 600 | [packet] |
| パケット長 | 1000 | [byte] |
| TCP コネクション数 | 50 | |
| RED ルータの最小しきい値 | 100 | [packet] |
| RED ルータの最大しきい値 | 300 | [packet] |
| RED ルータの最大パケット廃棄率 | 0.1 | |
| RED ルータの指数加重移動平均 | 0.04 | |

図 3 における、ボトルネックリンクの伝搬遅延や TCP コネクション数を変化させて解析およびシミュレーションを行った。解析では、2 章で説明した制御対象の数学的モデル (式 (5)、(6)) に加えて、文献 [12] の RED の数学的モデルを用いた。式 (5) および (6) のパラメータ (TCP コネクション $N$、ルータの処理能力 $c$、TCP コネクションの平均ラウンドトリップ時間 $\overline{R}$) にさまざまな値を与えて、数値シミュレーションを実行した。なお、解析には MATLAB/Simulink [15]、シミュレーションには ns-2 (version 2.28) [16] を修正して使用した。解析およびシミュレーションで用いたパラメータ設定を、表 1 に示す。以降の解析およびシミュレーションでは、特に断りのない限り、表 1 のパラメータを用いる。

RED および SPRED の性能指標として、ルータの平均キュー長およびルータのキュー長の標準偏差を用いる。平均キュー長によりルータの定常特性を、キュー長の標準偏差によりキュー長の変動を明らかにする。100 秒間の数値シミュレーションおよびシミュレーションを行い、上記の性能指標を測定した。

### 3.1　伝搬遅延の影響

まず、ネットワークの伝搬遅延が、SPRED ルータの平均キュー長およびキュー長の標準偏差に与える影響に着目する。これにより、SPRED が広域ネットワークにおいても、ルータのキュー長を安定化できることを示す。

図 4 に、TCP のラウンドトリップ時間 $R$ を 1–500 [ms] と変化させた時の、RED ルータおよび SPRED ルータの平均キュー長を示す。また、図 5 に、RED ルータおよび SPRED ルータのキュー長の標準偏差を示す。

図 4 より、TCP コネクションのラウンドトリップ時間が大きい状況では、SPRED ルータの平均キュー長が、RED ルータの平均キュー長よりも大きくなっていることが分かる。例えば、ラウンドトリップ時間が 300 [ms] 以上の時、RED ルータの平均キュー長は、最小しきい値 $min_{th}$ を下回っている。これは、TCP コネクションのラウンドトリップ時間が大きい状況では、RED の動作が不安定となっているためと考えられる。一方、SPRED は、TCP コネクションのラウンドトリップ時間が大きい状況でも、平均キュー長が $min_{th}$ を上回っており、より安定して動作していると考えられる。このことは、キュー長の標準偏差 (図 5) からも分かる。

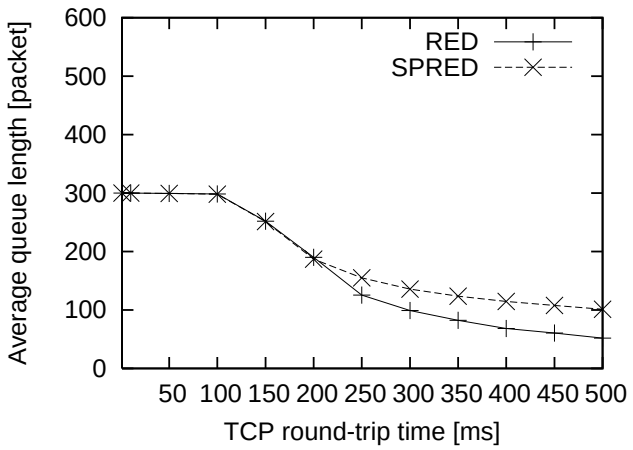


図 4　RED および SPRED ルータの平均キュー長 ($R$ = 1–500 [ms])

Fig. 4　Average queue length of RED and SPRED routers for $R$ = 1–500 [ms]

図 5 より、特にラウンドトリップ時間が大きい時に、RED ルータのキュー長の標準偏差が、SPRED ルータのキュー長の標準偏差よりも、大幅に大きくなっていることが分かる。これは、ラウンドトリップ時間が大きい時に、RED ルータのキュー長が大きく変動しており、バッファのオーバーフローやアンダーフローが発生していることを意味している。一方、SPRED ルータのキュー長の標準偏差は、ラウンドトリップ時間が 500 [ms] の場合でも、たかだか 50 [packet] 以下であり、RED ルータと比較してキュー長が安定していることが分かる。

### 3.2　TCP コネクション数の影響

次に、TCP コネクション数 $N$ が、SPRED ルータの平均キュー長およびキュー長の標準偏差に与える影響に着目する。これにより、SPRED は TCP コネクション数にかかわらず、RED よりもルータのキュー長を安定化できることを示す。

図 6 に、TCP コネクション数を 1–50 と変化させた時の、RED ルータおよび SPRED ルータの平均キュー長を示す。また、図 7 に、RED ルータおよび SPRED ルータのキュー長の標準偏差を示す。

図 6 より、TCP コネクション数が小さい時に、RED ルータおよび SPRED ルータの平均キュー長が、最小しきい値 $min_{th}$ を下回っていることが分かる。ただし、平均キュー長が $min_{th}$

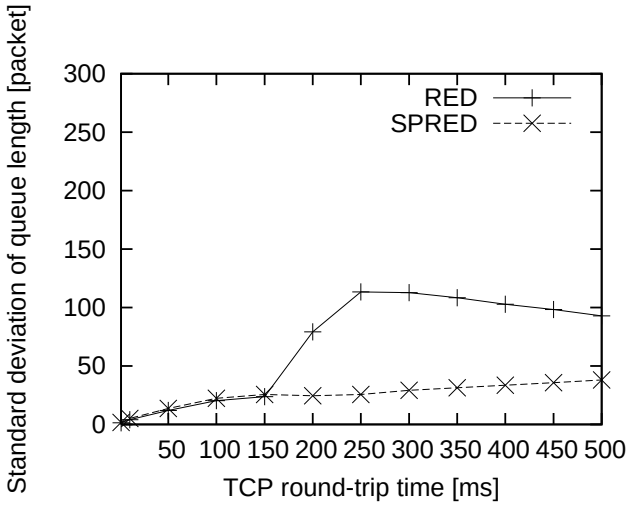


図 5　RED および SPRED ルータのキュー長の標準偏差 ($R$ = 1–500 [ms])

Fig. 5　Standard deviation of queue length of RED and SPRED routers for $R$ = 1–500 [ms]

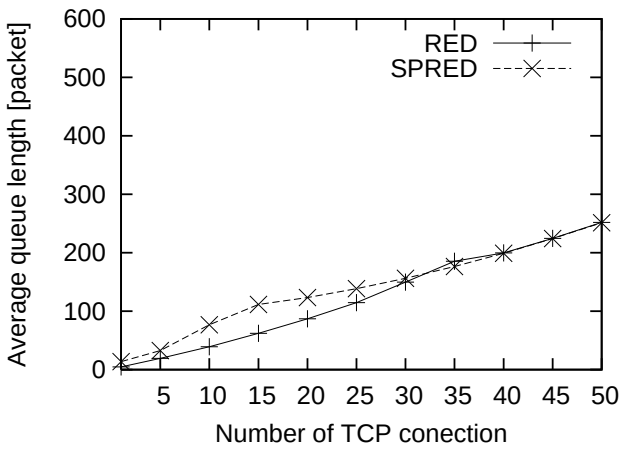


図 6　RED および SPRED ルータの平均キュー長 ($N$ = 1–50)

Fig. 6　Average queue length of RED and SPRED routers for $N$ = 1–50

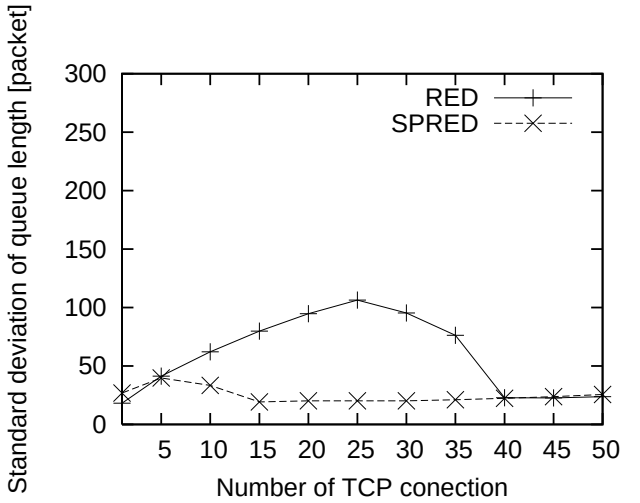


図 7　RED および SPRED ルータのキュー長の標準偏差 ($N$ = 1–50

Fig. 7　Standard deviation of queue length of RED and SPRED routers for $N$ = 1–50

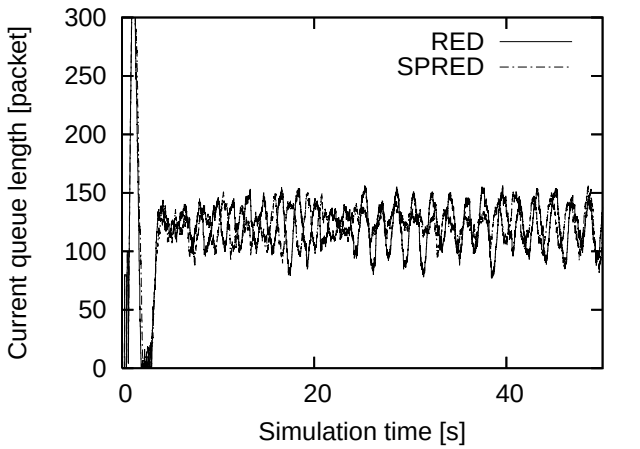


図 8　RED および SPRED ルータのキュー長の時間的変動 ($\tau = 100$ [ms])

Fig. 8　Evolution of queue length of RED and SPRED routers for $\tau = 100$ [ms]

を下回るのは、RED では $N < 25$ の時であり、SPRED では $N < 10$ の時である。これは、3.1 節の結果と同様に、RED が、SPRED よりも動作が不安定であるためと考えられる。

さらに、キュー長の標準偏差 (図 7) に着目すると、SPRED と RED の性能に大きな差が見られる。この図より、SPRED ルータのキュー長の標準偏差は、RED ルータのキュー長の標準偏差よりも大幅に小さいことが分かる。つまり、RED と比較して、SPRED の動作がより安定していることを意味している。

最後に、シミュレーション結果を示す。図 8 は、表 1 のパラメータを用いた時の、RED ルータおよび SPRED ルータのキュー長の時間的変動を示している。また、図 9 は、図 8 のシミュレーション結果のうち、20–40 [s] を拡大したものである。図 9 より、SPRED ルータが RED ルータよりも安定して動作していることが分かる。

さらに、ボトルネックリンクの伝搬遅延を 300 [ms] および 500 [ms] とした時の、RED ルータおよび SPRED ルータのキュー長の時間的変動を、それぞれ図 10 および図 11 に示す。これらの図より、伝搬遅延が大きくなるにつれ、RED ルータのキュー長がより不安定になることが分かる。一方、SPRED ルータのキュー長は、RED ルータのキュー長よりも変動が小さいことが分かる。特に、図 11 では、バッファオーバーフローの発生により、RED ルータの利用率が低下しているが、SPRED ルータはバッファオーバーフローを回避できていることが分かる。

以上の結果から、特に伝搬遅延が大きなネットワークにおいて、SPRED が有効であることが分かる。

## 4　まとめと今後の課題

本稿では、広域ネットワークにおいても高い性能を実現する、アクティブキュー管理機構 SPRED (Smith Predictor for Random Early Detection) を提案した。SPRED の特徴は、古典制御理論におけるスミス予測器を用いることにより、伝搬遅延が大きなネットワークにおいて、高い定常特性と過渡特性を実現すると

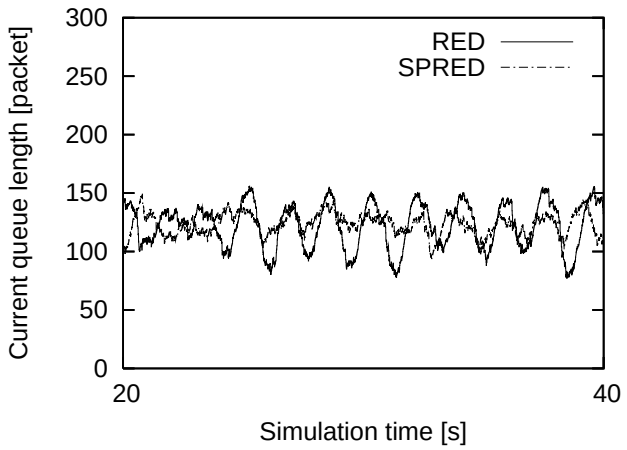


図 9　RED および SPRED ルータのキュー長の時間的変動 (20–40 [s] を拡大、$\tau = 100$ [ms])

Fig. 9　Evolution of queue length of RED and SPRED routers for $\tau = 100$ [ms]

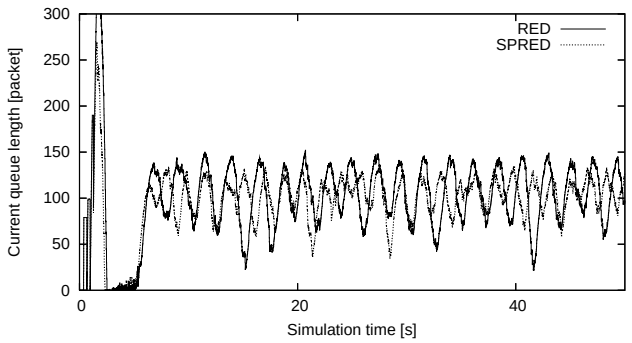


図 10　RED および SPRED ルータのキュー長の時間的変動 ($\tau = 300$ [ms])

Fig. 10　Evolution of queue length of RED and SPRED routers for $\tau = 300$ [ms]

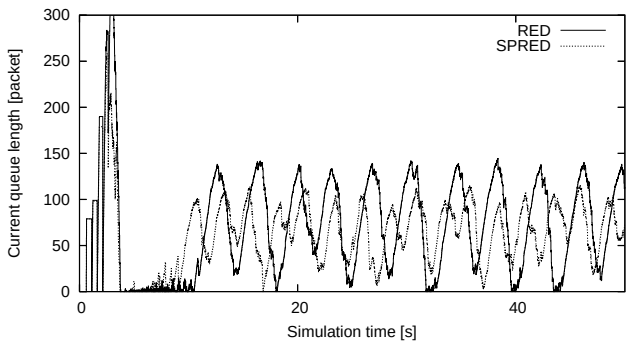


図 11　RED および SPRED ルータのキュー長の時間的変動 ($\tau = 500$ [ms])

Fig. 11　Evolution of queue length of RED and SPRED routers for $\tau = 500$ [ms]

いう点である。本稿では、解析およびシミュレーションにより SPRED の性能を評価した。その結果、特にネットワークの伝搬遅延が大きい状況において、SPRED はルータのキュー長を安定化できることを示した。

今後の課題として、より一般的なネットワーク環境下における、SPRED の性能評価を行う予定である。特に、各 TCP コネクション数の伝搬遅延が異なる場合の SPRED の性能評価を行う予定である。また、SPRED をさまざまなネットワーク環境に対応させることが挙げられる。具体的には、バースト的な TCP トラヒックへの対応、TCP Reno 以外のトランスポート層通信プロトコルが混在した環境への対応が考えられる。さらに、システム同定による、制御対象の数学的モデルのパラメータチューニングを行う予定である。

## 謝　　辞

本研究を実施するにあたり、有意義な議論をしていただいた、大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸氏、多田知正氏に感謝いたします。

## 文　　献

[1] M. Allman, V. Paxson, and W. R. Stevens, “TCP congestion control,” Apr. 1999.

[2] S. Floyd and V. Jacobson, “Random early detection gateways for congestion avoidance,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, pp. 397–413, Aug. 1993.

[3] S. Floyd, “Recommendations on using the gentle variant of RED,” May 2000. available at `http://www.aciri.org/floyd/red/gentle.html`.

[4] J. Aweya, M. Ouellette, and D. Y. Montuno, “A control theoretic approach to active queue management,” *Computer Networks*, vol. 36, pp. 203–235, 2001.

[5] S. Athuraliya, S. H. Low, V. H. Li, and Q. Yin, “REM: Active queue management,” *IEEE Network*, pp. 48–53, May/June 2001.

[6] D. Lin and R. Morris, “Dynamics of random early detection,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM ’97*, pp. 127–137, Oct. 1997.

[7] S. H. Low, F. Paganini, J. Wang, and J. C. Doyle, “Linear stability of TCP/RED and a scalable control,” *Computer Networks*, vol. 43, pp. 633–647, Dec. 2003.

[8] S. Mascolo, “Congestion control in high-speed communication networks using Smith principle,” *Automatica*, vol. 35, pp. 1921–1935, May 1999.

[9] W. S. Levine, ed., *The Control Handbook*. CRC Press, 1996.

[10] H. Ohsaki, S. Watanabe, and M. Imase, “On dynamic resource management mechanism using control theoretic approach for wide-area Grid computing,” in *Proceedings of IEEE Conference on Control Applications (CCA 2005)*, Aug. 2005.

[11] O. J. M. Smith, “Closer control of loops with dead time,” *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, pp. 217–219, May 1957.

[12] H. Ohsaki, J. Ujiie, and M. Imase, “On scalable modeling of TCP congestion control mechanism for large-scale IP networks,” in *Proceedings of the 2005 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2005)*, pp. 361–369, Feb. 2005.

[13] T. J. Ott, T. V. Lakshman, and L. Wong, “SRED: Stabilized RED,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM ’99*, pp. 1346–1355, Mar. 1999.

[14] D. Katabi, M. Handley, and C. Rohrs, “Congestion control for high bandwidth-delay product networks,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2002.*, pp. 89–102, 2002.

[15] “MATLAB/Simulink.” `http://www.mathworks.com/`.

[16] “The network simulator — ns-2.”