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.

IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC の動的制御パラメータ設定機構

本田　泰之† 　本田　治†† 　大崎　博之† 　今瀬　真† 　石塚　美加††† 　村山　純一†††

† 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
†† 大阪大学 大学院基礎工学研究科
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
††† 日本電信電話株式会社 NTT 情報流通プラットフォーム研究所
〒 180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11
E-mail: †{yasu-hnd,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp, ††o-honda@ics.es.osaka-u.ac.jp,
†††{ishizuka.mika,murayama.junichi}@lab.ntt.co.jp

あらまし　我々は、文献 [1] において、IP-VPN の顧客間の公平性を実現する、IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC (Inter- and Intra-VPN Fairness Control) を提案した。I2VFC が、さまざまなネットワーク環境において、IP-VPN の顧客間の公平性を実現するためには、I2VFC の制御パラメータを動的に設定する必要がある。本稿では、まず、I2VFC の動的制御パラメータ設定機構の設計目標を議論する。その後、「基準 VPN フロー」という仮想的な VPN フローの概念を導入することにより、各 PE ルータが自律的に制御パラメータを設定する、動的制御パラメータ設定機構 DCPC (Dynamic Control Parameter Configuration) を提案する。いくつかのシミュレーション実験により、動的制御パラメータ設定機構 DCPC を用いることにより、どの程度の VPN 間公平性が、どの程度のタイムスケールで実現できるかを定量的に明らかにする。その結果、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC を用いることにより、さまざまなネットワーク環境下において、I2VFC は高い精度で公平性を実現できること、また、VPN フローのラウンドトリップ時間の数百倍程度のタイムスケールで、I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できることを示す。
キーワード　IP-VPN (IP-based Virtual Private Network)、I2VFC (Inter- and Intra-VPN Fairness Control)、公平性、動的制御パラメータ設定機構

On Dynamic Control Parameter Configuration Mechanism for Inter- and Intra-VPN Fairness Control Mechanism

Yasuyuki HONDA†, Osamu HONDA††, Hiroyuki OHSAKI†, Makoto IMASE†, Mika ISHIZUKA†††, and Junichi MURAYAMA†††

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka 565-0871, Japan
†† Gradauate School of Engineering Science, Osaka University
††† NTT Information Sharing Platform Laboratories, NTT Corporation, 3-9-11 Midori-cho, Musashino-shi, Tokyo, 180-8585 Japan
E-mail: †{yasu-hnd,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp, ††o-honda@ics.es.osaka-u.ac.jp,
†††{ishizuka.mika,murayama.junichi}@lab.ntt.co.jp

Abstract　In [1], we have proposed an IP-VPN fairness control mechanism called I2VFC (Inter-and Intra-VPN Fairness Control) that realizes fairness among IP-VPN customers. In order for I2VFC to realize fairness among IP-VPN customers in various network configurations, it is necessary to dynamically configure control parameters of I2VFC. In this paper, we first discuss design goals of dynamic control parameter configuration mechanisms of I2VFC. We then propose a dynamic control parameter configuration mechanism called DCPC (Dynamic Control Parameter Configuration) that autonomously configures I2VFC control parameters by introducing the concept of a virtual VPN flow called "nominal VPN flow." Through several simulation experiments, we quantitatively investigate by using our dynamic control parameter configuration mechanism DCPC how accurately and on what timescale inter-VPN fairness can be realized. Consequently, we show that by using our dynamic control parameter configuration mechanism DCPC, I2VFC can realize fairness in high accuracy under several network configurations . We also show that control parameters of I2VFC can follow network change on the time scale of about 100 times of VPN flow round-trip times.

Key words　IP-VPN (IP-based Virtual Private Network), I2VFC (Inter- and Intra-VPN Fairness Control), Fairness, Dynamic Control Parameter Configuration Mechanism

1 はじめに

近年、IP ネットワークを利用して仮想的な私設網を実現する、IP-VPN (IP-based Virtual Private Network) [2–4] が注目を浴びている。IP-VPN を用いることにより、従来の専用線に比べてはるかに安価に、仮想的な私設網を IP ネットワーク上に構築することができる。

既存の IP-VPN は、IP-VPN の顧客間の公平性が保証されないという問題がある。これは、IP ネットワークがベストエフォート型のネットワークであるため、その上に構築される IP-VPN もベストエフォート型のネットワークとなるからである。我々はこれまで、文献 [1] において、L3-PPVPN のフレームワーク [5] 上で、公平な IP-VPN サービスを実現する、IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC (Inter- and Intra-VPN Fairness Control) を提案した。

I2VFC は、IP-VPN サービスを提供するプロバイダのエッジルータ (PE ルータ) 間で動作する、AIMD 型のウインドウフロー制御である。さまざまなネットワーク環境において、IP-VPN の顧客間の公平性を実現するためには、I2VFC の制御パラメータを、ネットワークの状況に応じて動的に設定する必要がある。そこで本稿では、まず、動的制御パラメータ設定機構に必要となる、以下の 3 種類の設計目標について議論する。

(1) I2VFC の制御パラメータが自動的に設定されること

(2) I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できること

(3) PE ルータ数および VPN フロー数に関してスケーラビリティを持つこと

本稿では、これらの設計目標を実現するため、「基準 VPN フロー」という仮想的な VPN フローの概念を導入することにより、各 PE ルータが自律的に制御パラメータを設定する、動的制御パラメータ設定機構 DCPC (Dynamic Control Parameter Configuration) を提案する。提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC では、各 VPN フローのスループットと、基準 VPN フローのスループットとの比が一定になるように、I2VFC の制御パラメータを定期的に更新する。提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC は、各 PE ルータが自律的に動作する分散型のアルゴリズムであるため、PE ルータ数および PE ルータに収容される VPN フロー数に関して高いスケーラビリティを持つ。

いくつかのシミュレーション実験により、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC の有効性を定量的に評価する。具体的には、動的制御パラメータ設定機構 DCPC により、I2VFC がどの程度の公平性を、どの程度のタイムスケールで実現できるかを明らかにする。その結果、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC を用いることにより、さまざまなネットワーク環境下において、I2VFC は高い精度で公平性を実現できること、また、VPN フローのラウンドトリップ時間の数百倍程度のタイムスケールで、I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2 章では、IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC の概要を紹介する。3 章では、本稿で提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC の設計目標およびそのアルゴリズムを説明する。4 章では、シミュレーション実験により、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC の有効性を定量的に評価する。最後に、5 章において、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

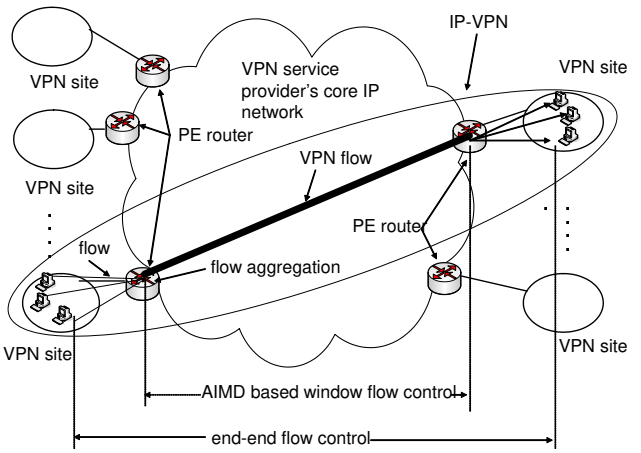

図 1: IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC の概要

Fig. 1 Overview of I2VFC (Inter- and Intra-VPN Fairness Control)

2 IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC

本章では、IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC [1] の概要を説明する。アルゴリズムの詳細については、文献 [1] を参照されたい。

図 1 に、I2VFC の概要を示す。I2VFC の核となるのは、IP-VPN のサービスプロバイダの PE ルータ上で動作する、AIMD (Additive Increase and Multiplicative Decrease) 型のウィンドウフロー制御 [6] である。具体的には、コアネットワークへの入側 PE ルータにおいて、VPN に収容されている複数のフローを、単一の VPN フローとして集約し、VPN ごとの論理キューに格納する。さらに、入側 PE ルータとコアネットワークからの出側 PE ルータ間で、各 VPN ごとに管理パケットを定期的に交換することにより、ネットワークのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率を測定する。入側 PE ルータは、これらの情報をもとに、各 VPN フローごとに AIMD 型のウインドウフロー制御を行い、入側 PE ルータからコアネットワークへ送出するパケット数を調整する。

I2VFC は、VPN の顧客間の任意の公平性 (VPN 間公平性) を実現することができる。すなわち、VPN フローのスループットの比を、サービスプロバイダが設定する任意の比に制御することが可能である。VPN フロー i のスループットの重みを r_i、そのスループットを T_i とする。I2VFC は、すべての $i, j (i \neq j)$ に対して、

$$\frac{T_i}{r_i} = \frac{T_j}{r_j} \tag{1}$$

を実現することができる。

VPN 間公平性を実現するため、I2VFC は、ウィンドウフロー制御の制御パラメータ (線形増加量 a および乗算減少量 b) を、測定したラウンドトリップ時間およびパケット棄却率と、設定された VPN フローのスループットの重み r をもとに適切に決定する必要がある。i 番目の VPN フローに対する、線形増加量 a および乗算減少量 b を、それぞれ a_i および b_i のように表記する。また、i 番目の VPN フローのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率を、それぞれ R_i および p_i とする。この時、VPN フロー間のスループットの比 η は近似的に次式で与えられる [1]。

$$\eta = \frac{T_i}{T_j} \tag{2}$$

$$\simeq \sqrt{\frac{a_i b_j (2-b_i)}{a_j b_i (2-b_j)\gamma^2 \delta}} \quad (3)$$

ここで、$R_i/R_j = \gamma$ および $p_i/p_j = \delta$ である。I2VFC では、式 (3) の値が、サービスプロバイダが設定した比率 r_i/r_j となるように、各 VPN フローの線形増加量 a および乗算減少量 b を決定する必要がある。I2VFC の制御パラメータが、$\eta = r_i/r_j$ を満たすように適切に設定された場合、I2VFC は非常に高い精度で VPN 間公平性を実現することができる [1, 7]。

一方、I2VFC は、VPN 間公平性だけでなく、同じ VPN 内に収容されている複数のフロー間の公平性 (VPN 内公平性) をも実現する。VPN 内公平性は、エンド–エンド間で動作する、TCP の輻輳制御機構を利用することによって実現する。つまり、I2VFC 自体は、VPN 内公平性を実現するための積極的な制御は行わない。同じ VPN 内に収容されているフローは、ラウンドトリップ時間およびパケット棄却率がすべて等しくなると考えられるため、TCP の輻輳制御機構によって十分な VPN 内公平性を実現することが可能である [1, 7]。

TCP の輻輳制御機構によって VPN 内公平性を実現するため、VPN フローごとに行われる AIMD 型のウィンドウフロー制御が、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構と干渉しないことが必要となる。このため、I2VFC では、AIMD 型のウィンドウフロー制御のタイムスケールを、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御のタイムスケールより大きくすることで、制御の干渉を回避している。

3 動的制御パラメータ設定機構

本章では、まず、I2VFC の動的制御パラメータ設定機構の設計目標を述べる。その後、我々が提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC (Dynamic Control Parameter Configuration) の特徴およびアルゴリズムを説明する。

3.1 設計目標

(1) I2VFC の制御パラメータが自動的に設定されること (制御パラメータの自動設定)

動的制御パラメータ設定機構の第一の設計目標は、I2VFC の制御パラメータがすべて自動的に設定されることである。2 章で述べたように、I2VFC では、VPN 間公平性を実現するために、入側 PE ルータにおいて測定したラウンドトリップ時間およびパケット棄却率と、サービスプロバイダによって事前に設定された VPN フローの重み r をもとに、ウインドウサイズの線形増加量 a および乗算減少量 b を自動的に設定することが求められる。

IP-VPN はベストエフォート型のネットワークであるため、バックグラウンドトラヒックの変動や、ネットワークのルーティングの影響などによって、入側 PE ルータと出側 PE ルータ間のラウンドトリップ時間やパケット棄却率は時間とともに変化する。このため、I2VFC の動的制御パラメータ設定手法は、このようなネットワークの変化を自動的に検出し、ネットワーク管理者等の介在を必要とすることなく、I2VFC の制御パラメータ (線形増加量 a および乗算減少量 b) を適切に変更することが望ましい。

(2) I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できること (ネットワーク変化への追従)

第二の設計目標は、I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できることである。ここで問題となるのは、どの程度のタイムスケールで、I2VFC の制御パラメータを変更すれば良いかである。2 章で述べたように、I2VFC は、VPN 内公平性を実現するために、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構を利用しているが、これはラウンドトリップ時間程度のタイムスケールで動作する。一方、VPN 間公平性を実現するために、PE ルータ間で AIMD 型のウィンドウフロー制御を行っているが、これはラウンドトリップ時間よりも大きなタイムスケールで動作する。

I2VFC の動的パラメータ設定機構が、こられのタイムスケールと同程度か、それよりも小さなタイムスケールで、I2VFC の制御パラメータを変更した場合、I2VFC の制御が不安定になるなどの問題が発生すると考えられる。このため、動的制御パラメータ設定機構は、AIMD 型のウィンドウフロー制御のタイムスケールよりも、大きなタイムスケールで制御パラメータを変更することが必要となる。

ただし、制御パラメータの変更を行うタイムスケールが大きすぎる場合、ネットワークの変化に迅速に追従できず、一時的にせよ VPN の顧客間の公平性が大きく劣化してしまうことが考えられる。従って、定常状態における VPN 間公平性だけでなく、過渡状態における VPN 間公平性も重要な指標となると考えられる。I2VFC の動的制御パラメータ設定機構は、これらのトレードオフを考慮して、制御パラメータ変更のタイムスケールを決定する必要がある。

(3) PE ルータ数および VPN フロー数に関してスケーラビリティを持つこと (スケーラビリティの実現)

第三の設計目標は、PE ルータ数および PE ルータに収容される VPN フロー数に関して、I2VFC の動的制御パラメータ設定機構が高いスケーラビリティを持つことである。現在、IP-VPN サービスは、企業や団体といった組織単位での利用が一般的であり、IP-VPN のサービスプロバイダが管理する VPN 数はそれほど多くはない。

しかし、今後は社会の変化などにより、個人単位で IP-VPN サービスを利用することも想定される。この時、IP-VPN のサービスプロバイダが管理すべき PE ルータ数や VPN フロー数が膨大な数になることが予想される。このため、I2VFC の動的制御パラメータ設定機構が、PE ルータ数および VPN フロー数に対してスケーラビリティを持つことは重要であると考えられる。

3.2 動的制御パラメータ設定機構 DCPC の概要

2 章で述べたように、I2VFC が VPN 間公平性を実現するためには、I2VFC の制御パラメータ (線形増加量 a および乗算減少量 b) が、すべての VPN フローの組に対して、式 (3) の $\eta = r_i/r_j$ を満たすように設定されなければならない。しかし、式 (3) からも分かるように、たとえサービスプロバイダによって設定された VPN スループットの重み r が既知であったとしても、すべての VPN フローに対して、適切な線形増加量 a および乗算減少量 b を計算することは容易ではない。

第一の設計目標 (制御パラメータの自動設定) を実現するためには、式 (3) の計算に必要となる、各 VPN フローのラウンドトリップ時間 R およびパケット棄却率 p を何らかの方法で推定する必要がある。I2VFC では、VPN フローごとに、管理パケット送出ごとのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率を計測している [1] が、これはラウンドトリップ時間程度の非常に小さなタイムスケールにおける計測値であり、この値をそのまま用いることはできない。また、I2VFC が計測しているのは、PE ルータ間の VPN フローのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率のみであり、他の PE ルータに収容されている VPN フローのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率を知るためには、PE ルータ間で何らかのシグナリングを行う必要がある。

例えば、式 (3) をそのまま利用することにより、ネットワー

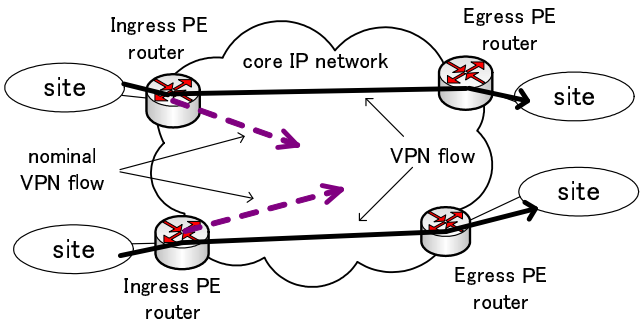

図 2: 動的パラメータ設定機構 DCPC の概要
Fig. 2　Overview of dynamic control parameter configuration mechanism

クの状況に応じて、I2VFC の制御パラメータを動的に設定するという、集中型のアルゴリズムが考えられる。集中型のアルゴリズムでは、まず、ネットワークの状態を管理する VPN 管理サーバが、すべての PE ルータから、すべての VPN フローの状態 (現在のラウンドトリップ時間およびパケット棄却率) をリアルタイムに収集する。VPN 管理サーバは、これらの情報をもとに、式 (3) の $\eta = r_i/r_j$ を満たすような線形増加量 a および乗算減少量 b を計算し、これらを定期的に各 PE ルータに通知する。

ただし、このような集中型のアルゴリズムでは、PE ルータ数もしくは VPN フロー数が多い場合に、VPN 管理サーバがすべての VPN フローの状態を収集し、すべての VPN フローに対して制御パラメータを通知するためのオーバヘッドが無視できなくなる。このため、第三の設計目標 (スケーラビリティの実現) を満たすことが困難である。

そこで本稿では、「基準 VPN フロー」という、仮想的な VPN フローの概念を導入することにより、各 PE ルータが自律的に適切な制御パラメータを計算する、動的制御パラメータ設定機構 DCPC (Dynamic Control Parameter Configuration) を提案する。図 2 に、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC の概要を示す。

動的制御パラメータ設定機構 DCPC は、I2VFC の制御パラメータを決定するために、「基準 VPN フロー」と呼ばれる仮想的な VPN フローの概念を用いる。基準 VPN フローは、実際には存在しない仮想的な VPN フローであるが、その VPN フローの制御パラメータ (線形増加量 a^* および乗算減少量 b^*) や、ラウンドトリップ時間 R^* およびパケット棄却率 p^* などは、すべての PE ルータにとって既知とする。具体的には、基準 VPN フローのこれらのパラメータ $(a^*, b^*, R^*, p^*, r^*)$ は、サービスプロバイダによって、各 PE ルータに共通の値が設定される。

動的制御パラメータ設定機構 DCPC の基本的なアイディアは、ある PE ルータに収容されている VPN フローと、基準 VPN フローのスループットの比だけを考慮して、I2VFC の制御パラメータを定期的に変更するというものである。基準 VPN フローという概念を導入したことにより、入側 PE ルータは、収容されている VPN フローのラウンドトリップ時間 R、パケット棄却率 p、スループットの重み r だけをもとに、制御パラメータ (線形増加量 a および乗算減少量 b) を決定することができる。このため、各入側 PE ルータは、分散かつ自律的に動作することが可能であり、第一の設計目標 (制御パラメータの自動設定) および第三の設計目標 (スケーラビリティの実現) を満たすことができる。

なお、第二の設計目標 (ネットワーク変化への追従) を実現するためには、基準 VPN のパラメータを適切な値に設定するとともに、各 VPN フローの制御パラメータ (線形増加量 a および乗算減少量 b) も適切に選択しなければならない。これは、AIMD 型のウィンドウフロー制御における線形増加量 a および乗算減少量 b は、フィードバック制御におけるゲインに相当するため、これらの大小によって系の過渡特性が決定されるためである。式 (3) から分かるように、各 VPN フローの線形増加量 a および乗算減少量 b は、基準 VPN フローのパラメータに大きく依存する。また、式 (3) の $\eta = r_i/r_j$ を満たす線形増加量 a および乗算減少量 b の組み合わせは無数に存在するが、どのような組み合わせを用いるかによって過渡特性が変化する。

そこで、我々が提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC では、各 VPN フローの AIMD 型ウィンドウフロー制御が、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御よりも大きなタイムスケールで動作するように制御パラメータを決定する。また同時に、各 VPN フローの AIMD 型ウィンドウフロー制御が、ネットワークの状況の変動よりも、より小さなタイムスケールで動作するように制御パラメータを決定することにより、第二の設計目標 (ネットワーク変化への追従) を実現する。

3.3　動的制御パラメータ設定機構 DCPC のアルゴリズム

動的制御パラメータ設定機構 DCPC のアルゴリズムは、各入側 PE ルータにおいて自律的に動作する、分散型のアルゴリズムであり、以下の 2 種類の処理によって構成されている。

（1） 各 VPN フローのラウンドトリップ時間 R およびパケット棄却率 p を推定

入側 PE ルータは、収容されている各 VPN フローそれぞれに対して、ラウンドトリップ時間 R およびパケット棄却率 p を推定する。I2VFC では、VPN フローごとに、管理パケット送出ごとのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率を計測している。入側 PE ルータは、管理パケットの送出によって計測されたラウンドトリップ時間およびパケット棄却率の χ ラウンドトリップ時間ごとの平均値を求める。n 回目に求めたラウンドトリップ時間およびパケット棄却率の平均値 をそれぞれ R_n および p_n とする。DCPC では、これらの値から移動指数平均を用いて、ラウンドトリップ時間 R およびパケット棄却率 p を推定する。

$$R \leftarrow w_R\, R_n + (1 - w_R) R \tag{4}$$

$$p \leftarrow w_p\, p_n + (1 - w_p) p \tag{5}$$

ここで、w_R および w_p は、ラウンドトリップ時間およびパケット棄却率の移動指数平均の重みである。

3.1 節で述べたように、動的制御パラメータ設定機構は、ラウンドトリップ時間よりも大きなタイムスケールで制御を行う必要がある。このため、ラウンドトリップ時間程度の非常に小さなタイムスケールにおける計測値をそのまま用いるのではなく、移動指数平均によって平滑化した値を用いる。

（2） 定期的に各 VPN フローのウインドウサイズの線形増加量 a および乗算現象量 b を更新

入側 PE ルータは、一定時間 T ごとに、収容されている各 VPN フローそれぞれに対して、ウインドウサイズの線形増加量 a および乗算現象量 b を更新する。具体的には、PE ルータにおいて推定した、各 VPN フローのラウンドトリップ時間 R とパケット棄却率 p をもとに、基準 VPN フローとのスループットの比が r/r^* となるように、線形増加量 a および乗算現象量 b を決定する。式 (3) より、次式を満たす線形増加量 a および乗算現象量 b を数値的に求める。

$$\frac{r}{r^*} = \sqrt{\frac{ab^*(2-b)}{a^*b(2-b^*)\gamma^2\delta}} \tag{6}$$

ここで、$R/R^* = \gamma$、$p/p^* = \delta$ である。

3.2 節で述べたように、式 (6) を満たす線形増加量 a および乗算減少量 b の組み合わせは無数に存在するが、どのような値を選択するかによって過渡特性が変化する。そこで提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC では、まず、エンド–エンド間で動作する TCP の輻輳制御機構との干渉を避けるために $a < 1$ かつ $b < 0.5$ とする。また、AIMD 型ウィンドウフロー制御のタイムスケールが、ラウンドトリップ時間の 100 ~ 1000 倍程度となるような線形増加量 a および乗算減少量 b をそれぞれ a_0 および b_0 とすれば、$a > a_0$ かつ $b > b_0$ となるような、線形増加量 a および乗算減少量 b を選択する。動的制御パラメータ設定機構 DCPC は、式 (6) および $a_0 < a < 1$ かつ $b_0 < b < 0.5$ を満たす全ての a、b の組み合わせから、a の平均値 $\overline{a}$ を求める。そして、求めた平均値 $\overline{a}$ と、$\overline{a}$ の対となる $\overline{b}$ を選択する。

4 シミュレーション

本章では、シミュレーション実験により、提案する動的パラメータ設定機構 DCPC が、設計目標である、(1) I2VFC の制御パラメータが自動的に設定されること、(2) I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できること、をどの程度満たしているかを評価する。具体的には、動的制御パラメータ設定機構 DCPC により、I2VFC がどの程度の公平性を、どの程度のタイムスケールで実現できるかを明らかにする。

VPN 間公平性の評価指標として、次式で定義される重みつき公平性指標 (Weighted Fairness Index) F を用いる [8, 9]。

$$F = \frac{(\sum_i^N \frac{T_i}{r_i})^2}{N\sum_i^N (\frac{T_i}{r_i})^2} \tag{7}$$

ここで、T_i は i 番目の VPN フローのスループット、r_i は i 番目の VPN フローに対する重み、N はネットワーク中の VPN フロー数である。重み付き公平性指標 F は、0 から 1 の値をとり、VPN 間公平性が完全に満たされたとき 1 となり、VPN 間公平性が低下するにつれ 0 に近い値を取る。シミュレーション結果より、10 [s] ごとの重みつき公平性指標 F の値を計算し、VPN 間公平性の時間的変動に着目した評価を行う。

なお、本シミュレーションでは、VPN 内公平性については評価しない。これは、線形増加量および乗算減少量を $a < 1$ および $b < 0.5$ とすることで、VPN 内公平性が実現できるためである [7]。提案する動的パラメータ設定機構 DCPC は、$a < 1$ および $b < 0.5$ となる制御パラメータのみを選択するため、VPN 内公平性は実現されていると考えることができる。

シミュレーションで用いた、ネットワークのトポロジを図 3 に示す。シミュレーションでは、図 3 において「 bottleneck link 1 」および「bottleneck link 2 」と表記されたリンクの帯域を 10 [Mbit/s] とし、その他のリンクの帯域は、すべて 10 [Gbit/s] とした。

送信側ホストから受信側ホストに向けて、TCP を用いて連続的にパケットの転送を行った。VPN フロー 1 および VPN フロー 2 は、ボトルネックリンク 1 を共有し、VPN フロー 2 および VPN フロー 3 は、ボトルネックリンク 2 を共有している。また、すべてのルータのバッファサイズは 50 [packet] とした。すべての VPN フローのスループットの重みは $r = 3$ とした。このため、すべての VPN フローのスループットが等しい時に公平となる。

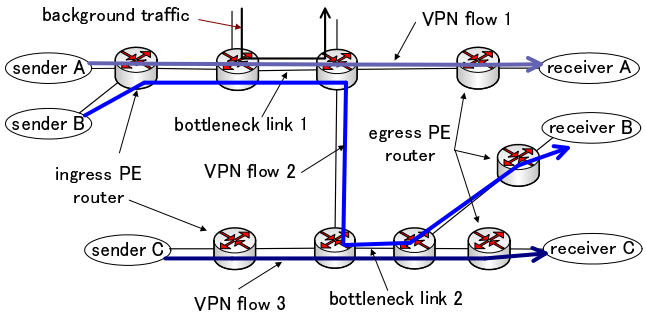

図 3: シミュレーションで用いたネットワークトポロジ
Fig. 3 Network topology used in simulation

各 VPN フローのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率を変化させるため、$t = 300[s]$ において、ボトルネックリンク 1 上にバックグラウンドトラヒック (UDP トラヒック) を発生させた。UDP トラヒックの平均到着レートはボトルネックリンク帯域の 20%、パケット長はすべて等しく 1,500 [byte]、パケット到着間隔を指数分布とした。シミュレーション時間は 900 秒とし、5 回のシミュレーションの平均値を計算した。以降の結果では、信頼区間はすべて 1% 以下であったため省略している。なお、シミュレーションには、OPNET Modeler 9.1A [10] を用いた。

線形増加量 a と乗算減少量 b の下限値 a_0 および b_0 は、それぞれ $a_0 = 0.1$ および $b_0 = 0.01$ と設定した。基準 VPN フローのパラメータは、$a^* = 0.5$、$b^* = 0.1$、$R^* = 0.2$ [s]、$p^* = 0.008$、$r^* = 1$ とした。また、a と b の初期値をそれぞれ $a = 0.2$、$b = 0.2$、$T = 1000R$、$\chi = 100$ とした。

この時のシミュレーション結果を、図 4 から図 7 に示す。図 4 は、重みつき公平性指標 F の時間的変化をプロットしたものであり、図 5 は、VPN フローのスループットの時間的変化をプロットしたものである。図 5 には、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC によって、制御パラメータが更新された時点を点 (■ 、△ 、◆) で示している。さらに、図 6 と図 7 は、VPN フローのラウンドトリップ時間およびパケット棄却率の時間的変化である。

図 4 および 図 5 より、シミュレーション開始直後は、制御パラメータが適切な値に設定されていないため、重みつき公平性指標 F が小さな値を示していることが分かる。しかし、$t = 135$ [s] において、各 VPN フローの制御パラメータが適切に設定されると、約 40 [s] (VPN フロー 2 のラウンドトリップ時間の 250 倍) 程度で、VPN 間公平性が実現されていることが分かる。

また、$t = 300$ [s] でバックグランドトラヒックの転送が開始されると、図 6 および図 7 に示されるようにラウンドトリップ時間とパケット棄却率が変化する。この時、制御パラメータが適切な値に設定されていないため、重みつき公平性指標 F が小さな値を示していることが分かる。しかし、$t = 389$ [s] において、各 VPN フローの制御パラメータが設定されると、約 70 [s] (VPN フロー 2 のラウンドトリップ時間の 480 倍) 程度で、再び VPN 間公平性が実現されていることが分かる。

以上の考察より、提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC を用いることにより、さまざまなネットワーク環境下において、I2VFC は高い精度で公平性を実現できること、また、VPN フローのラウンドトリップ時間の数百倍程度のタイムスケールで、I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できることが分かった。

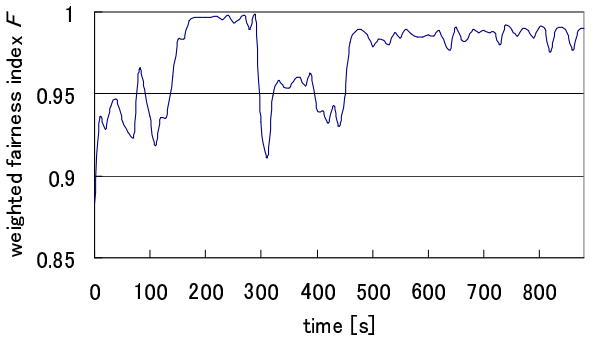

図 4: 重みつき公平性指標 F の時間的変化
Fig. 4　Evolution of weighted fairness index F

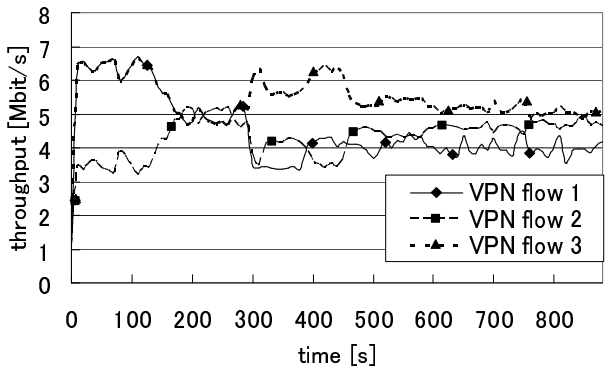

図 5: スループットの時間的変化
Fig. 5　Evolution of VPN throughput

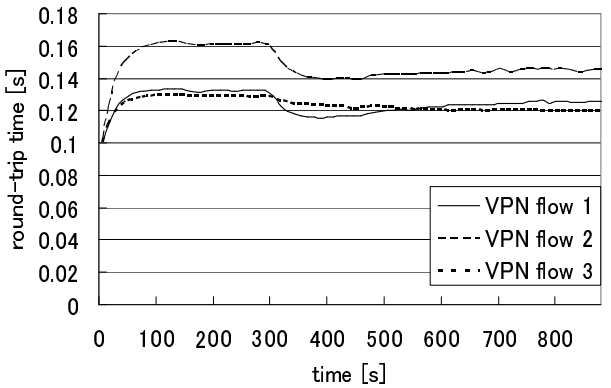

図 6: ラウンドトリップ時間の時間的変化
Fig. 6　Evolution of roundtrip time

5　まとめと今後の課題

本稿では、公平性制御機構 I2VFC の制御パラメータを、ネットワークの変動に応じて動的に設定する、動的制御パラメータ設定機構 DCPC (Dynamic Control Parameter Configuration) を提案した。提案する動的制御パラメータ設定機構 DCPC では、基準 VPN フローという仮想的な VPN フローの概念を導入することにより、各 PE ルータが自律的に制御パラメータを設定することが可能である。シミュレーション実験により、提案する動

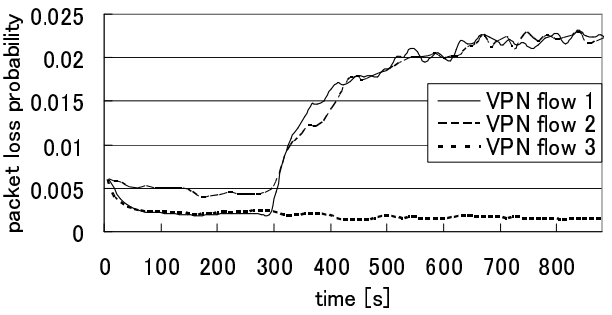

図 7: パケット棄却率の時間的変化
Fig. 7　Evolution of packet loss probability

的制御パラメータ設定機構 DCPC を用いることにより、さまざまなネットワーク環境下において、I2VFC は高い精度で公平性を実現できること、また、VPN フローのラウンドトリップ時間の数百倍程度のタイムスケールで、I2VFC の制御パラメータがネットワークの変化に追従できることを示した。

今後の課題として、動的制御パラメータ設定機構 DCPC の性能を最適化するための、DCPC の制御パラメータ (a_0、b_0、T、χ および基準 VPN フローのパラメータ) チューニングが挙げられる。特に、a_0 および b_0 の値は、I2VFC の過渡特性を決定する重要なパラメータであるため、これらについてのさらなる検討が必要である。

謝　　辞

本研究の一部は、平成 16 年度科学技術振興調整費「サイバーソサエティを実現する仮想網技術」の援助による。

文　　献

[1] 本田 治, 大崎 博之, 今瀬 真, 村山 純一, 松田 和浩, “AIMD 型のウィンドウフロー制御を利用した IP-VPN 公平 性制御機構,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2004-8), pp. 43–48, May 2004.

[2] B. Gleeson et al., “A framework for IP based virtual private networks,” *Request for Comments (RFC) 2764*, Feb. 2000.

[3] M. Carugi and J. D. Clercq, “Virtual private network services: Scenarios, requirements and architectural constructs from a standardization perspective,” *IEEE Communication Magazine*, June 2004.

[4] A. Nagarajan, “Generic requirements for provider provisioned VPN,” *Internet Draft* <draft-ietf-ppvpn-generic-reqts-02.txt>, Jan. 2003.

[5] R. Callon, M. Suzuki, J. D. Clercq, B. Gleeson, A. G. Malis, K. Muthukrishnan, E. C. Rosen, C. Sargor, and J. J. Yu, “A framework for layer 3 provider provisioned virtual private networks,” *Internet Draft* <draft-ietf-ppvpn-framework-08.txt>, Mar. 2003.

[6] D.-M. Chiu and R. Jain, “Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks,” *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 17, pp. 1–14, 1989.

[7] 本田 泰之, 本田 治, 大崎 博之, 今瀬 真, 石塚 美加, 村山 純一, “IP-VPN 公平性制御機構 I2VFC の性能評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2004-122), pp. 85–90, Nov. 2004.

[8] R. Pletka, A. Kind, M. Waldvogel, and S. Mannal, “Closed-loop congestion control for mixed responsive and non-responsive traffic,” in *Proceedings of IEEE GLOBECOM 2003*, Dec. 2003.

[9] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. New York: Wiley-Interscience, Apr. 1991.

[10] Opnet Technologies, Inc., “OPNET.” http://www.opnet.com/.