通信ネットワークにおけるコネクション数変動を考慮したレート制御*

今井 悟史[†]・久保 聖治[‡]・山本 茂[†]・潮 俊光[†]

Rate Control in Communication Networks for Changes of the Number of Connections*

Satoshi IMAI[†], Seiji KUBO[‡], Shigeru YAMAMOTO[†] and Toshimitsu USHIO[†]

We propose a rate based flow control method in single-bottleneck communication networks in order to suppress a transient behavior of a queue length at a bottleneck node when a number of connections change. Although the existing feedback control algorithms easily guarantee stability of the queue length of the bottleneck node, it is difficult to suppress oscillations of the length caused by abrupt changes of the number of connections. The proposed method incorporated with feedback control adopts a bias adjustment and a feedforward compensation. The control input is applied in accordance with the detection of the change of connections. In addition, the feedforward control input is designed to optimally improve the transient responses of the queue length.

1. はじめに

通信ネットワークでは、大容量かつ高速なマルチメディア通信の要求が高まりつつある。また、そのような高速ネットワークでは、ユーザに良好な QoS を提供するために、リソースを管理する必要がある。そのリソース管理手法としてフロー制御が必要となる。フロー制御には、ウィンドウフロー制御とレート制御がある[1]。パケットを送出して、その ACK が戻るまでの時間（ウィンドウ）内に送信できるパケット数を制御する方法がウィンドウフロー制御で、単位時間あたりに送信するパケット数を制御する方法がレート制御である。現在、前者は TCP (Transmission Control Protocol) で、後者は ATM (Asynchronous Transfer Mode) で利用されている。レート制御は、ボトルネックノードからノード情報を送信端末にフィードバックさせ、送信端末のパケット送出レートを動的に変更することで、ネットワーク資

源を有効に利用することができる。本論文では、コネクション数の変動を考慮したときの過渡状態の振る舞いを改善するための、新たなレート制御則を提案する。

バッファ内の観測、転送レートの計算などの負担をノードに強いるという問題も、ハード性能の向上に伴って解決され、ERM (Explicit Rate Marking) を用いた制御法が多く提案されている [3–5]。また、伝搬遅延時間を考慮した PID 型コントローラ [6,7] によるフィードバック制御が提案されている。

本論文では、コネクション数の変動に対する制御問題を考察する。すなわち、複数のコネクションが一つのノードを共有する場合、コネクションが新たに確立されたり、切断されたりすると、バッファ内パケット量が大きく変動する。この変動によってパケット廃棄が生じ、輻輳状態に陥ったり、スループットが急激に低下するという問題がある。従来の制御法は、ノードのバッファ内パケット量を目標値に整定させることを主眼としており、コネクション数の動的な変動に対する補償は十分に得られていない。したがって、コネクション数の増減に対処しうる新たな制御法が必要である。本論文では、コネクションの確立/切断が自動的に行われ、コネクションの使用状況が監視できると想定し、その情報をフィードフォワード制御に利用することを考える。しかし、フィードフォワード制御のみでは、安定性を確保することが困難であるため、本論文では、文献 [6] のフィードバック制御に

* 原稿受付 2003 年 3 月 6 日

[†] 大阪大学 大学院基礎工学研究科 Graduate School of Engineering Science, Osaka University; 1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka city, Osaka 560-8531, JAPAN

[‡] 松下電器産業 (株) マルチメディア開発センター Multimedia Development Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd; 693-47 Kawazu, Iizuka City, Fukuoka 820-0067, JAPAN

Key Words: rate control, feedforward control.

バイアス入力を調整する機能を付加し、さらに、フィードフォワード制御入力を加えることにより、コネクション数の変動による過渡特性の改善方法を提案する。

2. 問題設定

2.1 ボトルネックノードモデル

本論文で対象とするボトルネックノードは、有限の大きさのバッファを有する。各ソースから送られてくるパケットは、一時的に蓄えられた後、出力ポートから一定の送出レート B で送出されるものとする。さらにボトルネックノードは単位時間ごとにリソース管理パケットをすべてのソースへ送出するものと仮定する。各ソース i は、時刻 $k \in \mathbf{Z}$ のリソース管理パケットの値 $a(k)$ に基づき、転送レート $u_i(k)$ を以下のように変更する。

$$u_i(k) = a(k)(u_i^{\max} - u_i^{\min}) + u_i^{\min} \quad (1)$$

ここで、 $a(k)$ は、0 から 1 の値をとり、 $a(k)=0$ のとき $u_i(k)$ は最小転送レート $u^{\min}$ 、 $a(k)=1$ のとき $u_i(k)$ は最大転送レート $u^{\max}$ となる。なお、 i 番目のコネクションにおいて、リソース管理パケットがノードから送出され、転送レートの変化がノードに到達するまでの時間（往復伝搬遅延時間） α_i は一定の値をとるものとする。なお本論文では簡単のため、すべてのコネクションで $\alpha_i = \alpha$ とし、 α は既知であるとして設計するが、それが未知であったとしても、有界な不確かさをもつ場合への拡張は容易である。

時刻 k で $N(k)$ 本のコネクションがデータ転送中であるとすると、バッファ内パケット量 x の単位時間での変化を表す離散時間モデルは

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi(x(k) + w(k) - B) \\ w(k) &= \sum_{i=1}^{N(k-[\alpha])} \langle \alpha \rangle u_i(k-[\alpha]) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{N(k-[\alpha]-1)} \langle \alpha \rangle u_i(k-[\alpha]-1) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ただし、 $[\alpha]$ は α を超えない最大の整数、 $\langle \alpha \rangle \triangleq \alpha - [\alpha]$ は α の小数部、 $\bar{\alpha} \triangleq 1 - \alpha$ と定義する。なお、 $\Phi(\cdot): \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}$ は飽和関数で

$$\Phi(x) = \begin{cases} x & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

である。

2.2 コネクション数変動に対する補償

本論文では、コネクション数の変動に対する次の制御問題を考察する。

【問題 1】 時刻 $k = k_{ce/dc}$ でコネクションが確立/切断され、コネクション数 N が、 N_- から N_+ に変動すると仮定する。さらに、コネクション数 N_- のときシス

テムは平衡状態であるとする。このとき、バッファ内パケット量 $x(k)$ の変動を抑える制御系を構成する。

一般に、コネクションの確立/切断はホスト間、ノード間で行われるが、データ転送開始、終了はソースが決定する。したがって、本論文では、コネクション数が増加する場合は、時刻 k_{ce} にコネクションが確立され、一定時間経過後の時刻 $k_{ts} (\geq k_{ce})$ からデータ転送が行われるとする。逆にコネクション数が減少する場合は、時刻 k_{te} でデータ転送が終了し、一定時間経過後の時刻 k_{dc} でコネクションが切断されるとする。

2.3 輻輳コントローラの構成

問題 1 の解の一つとして、本論文では、スケジューリング機能を有するフィードバック部とフィードフォワード部からなる 2 自由度構成の輻輳コントローラを提案する。すなわち、 $a(k)$ の値を

$$a(k) = \Psi(a_{FB}(k) + a_{FF}(k)) \quad (4)$$

とし、フィードバック入力 a_{FB} とフィードフォワード入力 a_{FF} に分けるものとする。なお、 $\Psi(\cdot): \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}$ は飽和関数で

$$\Psi(a) = \begin{cases} 1 & \text{if } a > 1 \\ a & \text{if } 0 \leq a \leq 1 \\ 0 & \text{if } a < 0 \end{cases} \quad (5)$$

である。

一般にフィードバック入力は安定性を補償できるものであればどのようなものを用いてもよいが、本論文では、予測に基づく PID 型制御則 [6] にバイアス調節機能を付加したものとする。すなわち、予測に基づく PID 型制御則による制御入力 a_{PID} とバイアス入力 a_{SB} によって、

$$a_{FB} = a_{PID} + a_{SB} \quad (6)$$

とする。これはコネクション数を一種のスケジューリングパラメータとみたゲインスケジューリング制御入力に相当し、フィードバック入力 a_{FF} の印加と同時に値が切り替わるものとする。一方、フィードフォワード入力 a_{FF} は有限時間の最適化問題の解として得られるものとする。以上をまとめると、 $a(k)$ は

$$a(k) = \Psi(a_{PID}(k) + a_{SB}(k) + a_{FF}(k)) \quad (7)$$

となる。ここで、 a_{SB} は常に印加され、 a_{FF} はコネクション数変動時に一時的に印加される。また、バイアス入力 a_{SB} の効果から、 a_{PID} の平衡値は常に 0 となる。対象とする制御系のブロック線図を Fig. 1 に示す。

本論文では問題 1 の特殊な場合として次の問題を考察するものとする。

【問題 2】 問題 1 の仮定のもとで、予測に基づく PID 型制御則 [6] によるフィードバックによって安定性を補償し、コネクション数の変動により生じるバッファ内パ

Fig. 1 Block diagram of N controlled virtual channel connections sharing an ATM switch with the proposed controller

ケット滞留量 $x(k)$ の変動を抑えるバイアス入力 a_{SB} とフィードフォワード入力 a_{FF} を求める。

3. フィードバック制御

フィードバック制御は、文献 [6] の予測に基づく PID 型制御則に新たに提案するバイアス調節機能を付加し、さらにコネクション数の変動に対しても安定性を保証するように設計する。

3.1 バイアス調節

コネクション数の変動に伴う a_{FB} の平衡点の変動を補償するバイアス調節機能を提案する。

a_{SB} は、コネクション数 N に従って

$$a^*(N) \triangleq \frac{B - \sum_{i=1}^N u_i^{\min}}{\sum_{i=1}^N (u_i^{\max} - u_i^{\min})} \quad (8)$$

によって $a_{SB} = a^*(N)$ に切り替わる。この a^* は、システムが平衡状態にあるとき、 $a_{PID} = 0$ になる a の値と一致するように選んでいる。さらに、 a_{SB} はフィードフォワード入力 a_{FF} を印加する時刻 k_0 に切り替わるとする。

$$a_{SB}(k) = \begin{cases} a^*(N_-) & \text{if } k < k_0 \\ a^*(N_+) & \text{if } k \geq k_0 \end{cases} \quad (9)$$

3.2 コネクション数の変動を加味した PID 制御

PID 制御則による制御入力 $a_{PID}(k)$ は、ノードのバッファ目標値 x^c 、伝搬遅延時間後のバッファ内パケット滞留量の予測値 $\tilde{x}_\alpha(k)$ との差 $e'(k) \triangleq x^c - \tilde{x}_\alpha(k)$ に基づいて、

$$a_{PID}(k+1) = a_{PID}(k) + K e'(k) + L(e'(k) - e'(k-1)) \quad (10)$$

とする。

予測値 $\tilde{x}_\alpha(k)$ は、コネクション数の変動を考慮し、以下のように求める。

$$\begin{aligned} \tilde{x}_\alpha(k) &= \Phi(x(k) + \tilde{w}(k) - \alpha B) \\ \tilde{w}(k) &= \sum_{l=1}^{[\alpha]} \sum_{i=1}^{\tilde{N}(k-l)} \tilde{u}_i(k-l) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{\tilde{N}(k-[\alpha]-1)} \langle \alpha \rangle \tilde{u}_i(k-[\alpha]-1) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $\tilde{N}$ は、コントローラが検知するコネクション数で、コネクションの確立/切断時に切り替わるとする。

$$\tilde{N}(k) = \begin{cases} N_- & \text{if } k < k_{ce/dc} \\ N_+ & \text{if } k \geq k_{ce/dc} \end{cases} \quad (12)$$

$\tilde{u}_i$ はパケット転送レートの予測値で、次で与えるものとする。

$$\tilde{u}_i(k) \triangleq (a_{PID}(k) + a_{SB}(k))(u_i^{\max} - u_i^{\min}) + u_i^{\min} \quad (13)$$

(10) 式の制御パラメータ K, L は、コネクション数 N の変動と伝播遅延時間のばらつきに対しても閉ループ系が安定となるように決める [7]。

4. フィードフォワード制御

本論文では、コネクション数変動によるバッファの過渡応答を最適に補償するフィードフォワード入力 a_{FF}

$$a_{FF}(k) = \begin{cases} 0 & \text{if } k < k_0 \\ f(k) & \text{if } k_0 \leq k < k_1 \\ 0 & \text{if } k \geq k_1 \end{cases} \quad (14)$$

の決定法を提案する。なお、データ転送開始/終了を検知した後、最適フィードフォワード入力の計算を始めることとなるので、最適化計算に要する時間を考慮し、 a_{FF} が印加される開始時刻を k_0 、その印加終了時刻を $k_1 (> k_0)$ としている。コネクション数が増加する場合は、データ転送開始時刻 k_{ts} 以降にそれを検知できるため、 $(k_{ce} \leq) k_{ts} \leq k_0$ となる。またコネクション数が減少する場合、コネクション切断時刻 k_{dc} 以降に検知できるため、 $(k_{te} \leq) k_{dc} \leq k_0$ となる。制御入力の印加時刻を Fig. 2, Fig. 3 に示す。

(14) 式の $f(k)$ は次式を最小にするように求める。

Fig. 2 Time schedule when the number of connections increases

Fig. 3 Time schedule when the number of connections decreases

$$\mathbf{J} = \sum_{i=k_0}^{k_2-1} (e(i)^2 + \omega_i a_{\text{FF}}(i)^2) \quad (15)$$

ただし、 e はモデルに基づく予測値で、 ω_i はフィードフォワード入力に対する重みである。なお、偏差 e を評価する時間を $k_0 \leq k < k_2$, ($k_1 < k_2$) としているのは、フィードフォワード入力 a_{FF} の印加を終えた時刻 k_1 以降も、その影響が e に現れるためである。

ここで、 a_{FF} を入力、 x を出力とする閉ループ系は以下のような時変システムとして表現できる。

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}(k)\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{b}a_{\text{FF}}(k) + \mathbf{d}(k) \quad (16)$$

$$x(k) = \mathbf{c}\hat{\mathbf{x}}(k) \quad (17)$$

ただし、

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ a_{\text{PID}}(k) \\ e'(k-1) \\ U(k-1) \\ \vdots \\ U(k-[\alpha]-1) \\ \tilde{U}(k-1) \\ \vdots \\ \tilde{U}(k-[\alpha]-1) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2[\alpha]+5}$$

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \boldsymbol{\Omega} & \mathbf{0} \\ -P & 1 & Q & \mathbf{0} & P\boldsymbol{\Upsilon} \\ -1 & 0 & 0 & \mathbf{0} & \boldsymbol{\Upsilon} \\ \mathbf{0} & \mathbf{e}_1(k) & \mathbf{0} & \mathbf{T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{e}}_1(k) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{T} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \mathbf{e}_1^T(k) & \mathbf{0} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}(k) = \begin{bmatrix} -B \\ P(x^c + \alpha B) \\ x^c + \alpha B \\ \mathbf{e}_1(k)a_{\text{SB}}(k) + \mathbf{U}_{\min}(k) \\ \tilde{\mathbf{e}}_1(k)a_{\text{SB}}(k) + \tilde{\mathbf{U}}_{\min}(k) \end{bmatrix}$$

$$P \triangleq K+L, \quad Q \triangleq -L$$

$$U(k) \triangleq \sum_{i=1}^{N(k)} u_i(k)$$

$$\tilde{U}(k) \triangleq \sum_{i=1}^{\tilde{N}(k)} u_i(k)$$

$$E(k) \triangleq \sum_{i=1}^{N(k)} (u_i^{\max} - u_i^{\min})$$

$$\tilde{E}(k) \triangleq \sum_{i=1}^{\tilde{N}(k)} (u_i^{\max} - u_i^{\min})$$

$$\mathbf{e}_1(k) \triangleq \begin{bmatrix} E(k) & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{[\alpha]+1}$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_1(k) \triangleq \begin{bmatrix} \tilde{E}(k) & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{[\alpha]+1}$$

$$\mathbf{T} \triangleq (\text{第1列が} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \text{である}$$

下三角 Toeplitz 行列) $\in \mathbb{R}^{([\alpha]+1) \times ([\alpha]+1)}$

$$\boldsymbol{\Omega} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \langle \alpha \rangle & \langle \alpha \rangle \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Upsilon} \triangleq \begin{bmatrix} -1 & \cdots & -1 & -\langle \alpha \rangle \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_{\min}(k) \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N(k)} u_i^{\min} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{[\alpha]+1}$$

$$\tilde{\mathbf{U}}_{\min}(k) \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{\tilde{N}(k)} u_i^{\min} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{[\alpha]+1}$$

(16), (17) 式を繰り返し用いることで次式を得る。

$$\begin{aligned} x(k_{ts/te} + l) &= \mathbf{c} \left(\prod_{i=k_{ts/te}}^{k_{ts/te}+l-1} \mathbf{A}(i) \right) \hat{\mathbf{x}}(k_{ts/te}) \\ &+ \sum_{i=k_{ts/te}}^{k_{ts/te}+l-1} \mathbf{c} \left(\prod_{j=i+1}^{k_{ts/te}+l-1} \mathbf{A}(j) \right) \mathbf{b}(i) a_{\text{FF}}(i) \\ &+ \sum_{i=k_{ts/te}}^{k_{ts/te}+l-1} \mathbf{c} \left(\prod_{j=i+1}^{k_{ts/te}+l-1} \mathbf{A}(j) \right) \mathbf{d}(i) \end{aligned}$$

(15) 式を最小にする入力 $f(k)$ を求めるために、偏差 $e(k) = x^c - \mathbf{c}\hat{\mathbf{x}}(k)$ をベクトル形式で表現する。

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{f} + \mathbf{g} \quad (18)$$

ただし、

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e(k_0) & \cdots & e(k_2-1) \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(k_0) & \cdots & f(k_1-1) \end{bmatrix}^T$$

($\boldsymbol{\Gamma}$ の p 行 q 列成分)

$$\triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } p \leq q \\ \mathbf{c} \left(\prod_{j=k_0+q}^{k_0+p-2} \mathbf{A}(j) \right) \mathbf{b}(k_2+q-1) & \text{if } p > q \end{cases}$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{g} \text{ の } p \text{ 行成分}) &\triangleq x^c - \mathbf{c} \left(\prod_{i=k_{ts/te}}^{k_0+p-2} \mathbf{A}(i) \right) \hat{\mathbf{x}}(k_{ts/te}) \\ &- \sum_{i=k_{ts/te}}^{k_0+p-2} \mathbf{c} \left(\prod_{j=i+1}^{k_0+p-2} \mathbf{A}(j) \right) \mathbf{d}(i) \end{aligned}$$

さらに評価関数 $\mathbf{J}$ を重み $\mathbf{W} = \text{diag}(\omega_{k_2}, \dots, \omega_{k_4-1})$ を用いて、ベクトル形式で表現すると次式となる。

$$\mathbf{J} = \mathbf{f}^T (\mathbf{W} + \boldsymbol{\Gamma}^T \boldsymbol{\Gamma}) \mathbf{f} + 2\mathbf{g}^T \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{f} + \mathbf{g}^T \mathbf{g} \quad (19)$$

上式を最小にする $\mathbf{f}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{f} = -(\mathbf{W} + \boldsymbol{\Gamma}^T \boldsymbol{\Gamma})^{-1} \boldsymbol{\Gamma}^T \mathbf{g} \quad (20)$$

5. シミュレーション

設計法の有効性を確認するため、シミュレーションを行った。例題として、ATMにおけるABRサービスを考える。ネットワークのパラメータは $u_i^{\max} = 353.7$ [cell/ms], $u_i^{\min} = 35.37$ [cell/ms], $B = 353.7$ [cell/ms] として、PID型制御則のパラメータには、コネクション数 N を大きく見積もったときの閉ループ系が安定となる値 ($K = 4.0 \times 10^{-5}$, $L = 7.0 \times 10^{-4}$) を用いた。伝送パケットは53バイトの固定長パケットとし、単位時間間隔を0.280 [ms], バッファ内のパケット滞留量の目標値を $x^c = 500$ cell (約25 Kバイト) とする。

5.1 コネクション数の増加

コネクション数が時刻 $k_{ce} = 1000$ で増加し ($N_- = 7$, $N_+ = 8$)、本提案手法 (バイアス補償機能, コネクション数の変動を加味したPID制御, フィードフォワード制御) を用いた場合のバッファ内パケット量の時間変化を Fig. 4 に示す。ただし, $\alpha_i = 3.5$, $i = 1, \dots, 8$ (伝送距離約97km) とする。提案手法を用いた場合を太線で、用いなかった場合 (PID制御のみ) を細線で表している。さらに、提案手法を用いた場合の制御指令値の変動を Fig. 5 に示す。なお, $k_{ts} = 1005$, $k_0 = 1010$, $k_1 = 1200$, $k_2 = 1300$ とした。Fig. 5 より, $a_{SB}(k)$, $a_{FF}(k)$ によって $a_{PID}(k)$ の変動を抑制しつつ、過渡特性を補償していることがわかる。

5.2 コネクションの減少

コネクション数が時刻 $k_{dc} = 1000$ で減少し ($N_- = 7$, $N_+ = 6$)、本提案手法 (バイアス補償機能, コネクション数の変動を加味したPID制御, フィードフォワード制御) を用いた場合のバッファ内パケット量の時間変化を Fig. 6 に示す。ただし, $\alpha_i = 3.5$, $i = 1, \dots, 7$ (伝送距離約97km) とする。提案手法を用いた場合を太線で、用いなかった場合 (PID制御のみ) を細線で表している。さらに、提案手法を用いた場合の制御指令値の変動を Fig. 7 に示す。なお, $k_{te} = 995$, $k_0 = 1005$, $k_1 = 1200$, $k_2 = 1300$ とした。Fig. 7 より, $a_{SB}(k)$ と $a_{FF}(k)$ とによって $a_{PID}(k)$ の変動を抑制しつつ、過渡特性を補償していることがわかる。さらに、伝搬遅延時間がばらつく場合 ($\alpha_1 = 4.8$ (伝送距離約133km), $\alpha_2 = 4.0$ (伝送距離約110km), $\alpha_3 = 3.8$ (伝送距離約105km), $\alpha_4 = 3.6$ (伝送距離約100km), $\alpha_5 = 3.5$ (伝送距離約97km), $\alpha_6 = 3.1$ (伝送距離約86km), $\alpha_7 = 2.9$ (伝送距離約80km)) のバッファ内パケット量の時間変化を Fig. 8 に示す。Fig. 8 では、伝搬遅延時間がばらつかない場合の Fig. 6 と比べ、多少の振動がみられるものの本提案手法の有効性が確認できる。なお、コネクション数が増加する場合についても同様のことを確認している。

Fig. 4 Behaviors of the queue length ($k_{ce} = 1000$, $N_- = 7$, $N_+ = 8$)

Fig. 5 Behaviors of a_{PID} , a_{SB} , and a_{FF} when a connection is established ($k_{ce} = 1000$, $N_- = 7$, $N_+ = 8$)

Fig. 6 Behaviors of the queue length ($k_{dc} = 1000$, $N_- = 7$, $N_+ = 6$)

参考文献

- [1] 宮原, 尾家: コンピュータネットワーク, 共立出版 (1999)
- [2] O. C. Imer, S. Compans, T. Başar and R. Srikant: Available bit rate congestion control in ATM networks; *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 21, No. 1, pp. 38–56 (2001)
- [3] S. Tarbouriech, C. T. Abdallah and M. Ariola: Bounded control of multiple-delay systems with applications to ATM networks; *Proc. 40th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2315–2320 (2001)
- [4] S. Jagannathan and J. Talluri: Predictive congestion control of ATM networks: multiple sources/single buffer scenario; *Automatica*, Vol. 38, No. 5, pp. 815–820 (2002)
- [5] P. -F. Quet, B. Ataslar, A. Iftar, H. Ozbay, S. Kalyanaraman and T. Kang: Rate-based flow controllers for communication networks in the presence of uncertain time-varying multiple time-delays; *Automatica*, Vol. 38, No. 6, pp. 917–928 (2002)
- [6] 久保, 潮, 村田, 大崎: 伝搬遅延時間を考慮した ATM の PID 型ふくそう制御; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-B, No. 3, pp. 371–380 (2002)
- [7] 久保, 潮, 山本: ロバスト安定解析に基づく PID 型レート制御; 第 46 回 システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 89–90 (2002)
- [8] 今井, 久保, 山本, 潮: ATM のレート制御によるフィードフォワード制御による過渡特性の改善; 第 46 回 システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp. 91–92 (2002)

Fig. 7 Behaviors of a_{PID} , a_{SB} and a_{FF} when a connection is disconnected ($k_{dc} = 1000$, $N_- = 7$, $N_+ = 6$)

Fig. 8 Behaviors of the queue length under a time-delay uncertainty ($k_{dc} = 1000$, $N_- = 7$, $N_+ = 6$)

6. おわりに

本論文では、コネクション数の変動によって生じる過渡応答を、バイアス補償とフィードフォワード制御によって改善する方法を提案した。併用するフィードバックコントローラは文献 [6] で提案されたものであったが、提案手法はそれに限らず一般の動的フィードバックコントローラを用いる場合にも適用できる。

本論文では、システムが平衡状態にあるときにコネクション数の変動が生じるものと仮定しており、この仮定が成り立たない場合、たとえば、変動が頻繁に生じる場合は、さらなる考察が必要である。また、提案手法をノードにオンライン実装する際には、計算時間や計算資源に制限が加わることになるので、それらを考慮にいれた改良が必要となる。また、ネットワーク化した場合を考えることも今後の課題として挙げられる。