

伝搬遅延時間を考慮したPID型レート制御 —ロバスト安定解析の応用—

大阪大学 久保 聖治, 潮 俊光, 山本 茂

PID Rate-Based Control with Propagation Delay —An Application of Robust Stability Analysis—

Seiji KUBO, Toshimitsu USHIO, and Shigeru YAMAMOTO, Osaka University

Abstract A rate-based control method and a window-flow control method are usually used for congestion control. This paper considers the rate-based control method. This paper proposes a PID-type congestion scheme with robustness of propagation delay in which allowed cell rates are adjusted according to the queue's lengths in switches. We derive conditions for the PID parameters such that the queue length converges to desired one. We also discuss robustness of the proposed scheme using a transfer function for variations of propagation delay. As example, we consider the ABR service class of ATM, and demonstrate the robustness of the proposed method.

Keywords: コンピュータネットワーク, レート制御, 輻輳制御, ロバスト制御, PID型制御

1 はじめに

通信ネットワークにおける輻輳制御法の1つとしてフロー制御がある。フロー制御には、フィードバック型の制御方式としてウィンドウフロー制御方式やレート制御方式がある¹⁾。本報告では、ATMにおけるABR(Available Bit Rate)サービスにみられるようなレート制御方式を考える。ATMにおけるABRサービスでは、ATMスイッチ内のバッファに滞留するセル数に応じて送信端末に輻輳情報を帯域管理用のRMセルによって伝えることができる。RMセル中のCIビットによって輻輳が発生している(CI=1)が発生していない(CI=0)かが伝えられる。このビットを用いたATMスイッチはバイナリスイッチと呼ばれている。バイナリスイッチを用いた輻輳制御方式は実装が容易であるものの安定性や公平性の面で問題があることが明らかにされている²⁾。一方、RMセルには16ビットからなるER(Explicit Rate)フィールドがあり、セル転送レートを明示的に指定することも可能である。ERフィールドを用いたATMスイッチはERスイッチと呼ばれる。ERスイッチは構成が複雑になるが、よりきめの細かい制御が可能となり、性能の向上が期待できる³⁾。

ERスイッチを用いた場合、パケット到着率をもとにレートを決定するERICA(Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance)¹⁾などがあるが、本報告ではバッ

ファ内セル滞留量に対して目標値を設定し、その目標値と現在のバッファ内セル滞留量との差をもとにセル転送レートを決定する。その制御はフィードバック構造をもつことになり、近年制御理論を応用した輻輳制御則の研究が注目されている⁴⁾。これまでに、伝搬遅延時間を考慮したスミス法に基づく制御則⁵⁾、円板定理を用いた制御則⁶⁾、PID型の制御則⁷⁾、パケットの伝搬遅延時間後のパケット滞留量の予測値を用いたPID型の制御則⁸⁾などの制御理論を用いた制御則が提案されている。

本報告では、伝搬遅延時間を考慮したPID型のレート制御を提案する。一般に、伝搬遅延時間はコネクション毎に異なる値をとるが、本制御則では、すべてのコネクションが同じ伝搬遅延時間であると仮定して制御則を求める。本制御則ではロバスト制御理論に基づいて制御パラメータを設定する。ロバスト制御理論は制御対象にパラメータ変動が生じても制御対象の安定性が失われないような制御器を構成するための理論である。コネクション毎の伝搬遅延時間のばらつきをパラメータ変動とみなし、ロバスト制御理論を適用する。これにより、コネクション毎に伝搬遅延時間が異なる場合でも、対象となるスイッチのバッファ内パケット滞留量を目標値に安定化できる。

本報告は、第2章において、スイッチのモデル化と制御則の導入を行い、それを伝達関数で表現する。第3章では、ロバスト安定性の観点から考えて、実際の伝搬遅

延時間と制御則で用いる伝搬遅延時間とが異なる場合でもロバスト制御を用いることによりシステムを安定化できる条件を導く。そして、第4章においては、コネクション毎の伝搬遅延時間が異なる場合においても、設計の際に制御器で用いる伝搬遅延時間の推定値を1つ定めることにより、安定化できる条件を導出する。第5章では、第3章、第4章で求めた条件にしたがってシミュレーションを行い、その妥当性を確認する。

2 スイッチのモデル化と制御側の導入

2.1 スイッチのモデル 図1のような最大コネクション数が N のスイッチの単一の出力ポートを考える。簡単のために本報告では、制御用パケットは優先権を持って一定の間隔で送られていると仮定し、その時間間隔を単位時間とおく。制御用パケットが送られたときのスイッチの状況に注目した離散時間モデルを考える^{9,10}。 i 番目のコネクションの packets 転送レートを $u_i(k) \in \mathbb{R}$ 、その総和を $U(k)$ 、スイッチの packets 送出レートを $B \in \mathbb{R}$ とする。ここでは、制御用 packets の伝搬遅延時間がすべてのコネクションで等しい場合を考え、その値を $\alpha \in \mathbb{R}$ とする。

ATM スイッチのバッファ内セル滞留量 $x(k)$ の挙動をモデル化する。 n を、 α 以上の整数での最小値、すなわち、ガウス記号を用いて $n = \lceil \alpha \rceil + 1$ とおく。ここで、図2のように制御用 packets に書きこまれる値 $a(k)$ がスイッチで決定され、この $a(k)$ の値に基づいて各コネクションの packets 転送レート $u_i(k)$ が変更される。この変更された転送レートが、スイッチに届くまでに伝搬遅延時間が存在する。この伝搬遅延時間を考慮すると、時刻 k から $k+1$ の間にスイッチ内のバッファに入ってくる各コネクションの packets 転送レートの総和は、時刻 k に対して、 n 時刻前の $U(k-n)$ と、 $n-1$ 時刻前の $U(k-(n-1)) = U(k-n+1)$ がそれぞれ $(n-\alpha)$ と $(\alpha-n+1)$ の割合で入ってくる。したがって次式が得られる。

$$x(k+1) = \phi(x(k) + (n-\alpha)U(k-n+1) + (\alpha-n+1)U(k-n) - B) \quad (1)$$

ただし、

$$\phi(x) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{if } x \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)において、右辺第1項は、時刻 k でのバッファ内セル滞留量 $x(k)$ を表し、第2項、第3項は、伝搬遅延時間を考慮した packets 転送レートの総和、第4項は単位時間に処理できるスイッチの packets 送出レートを表す。

なお、平衡状態近傍では式(1)は次式のようになる。

$$x(k+1) = x(k) + (n-\alpha)U(k-n+1) + (\alpha-n+1)U(k-n) - B \quad (3)$$

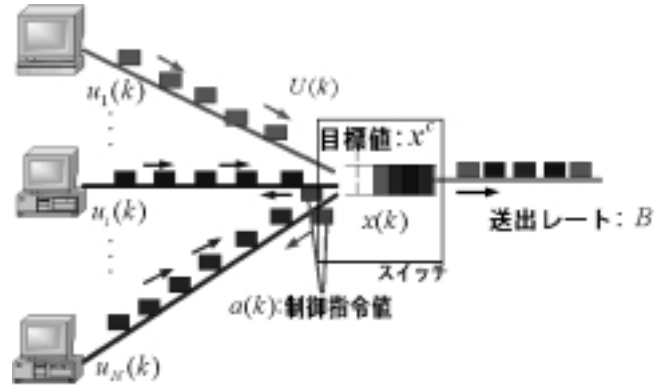


図1: スイッチのモデル

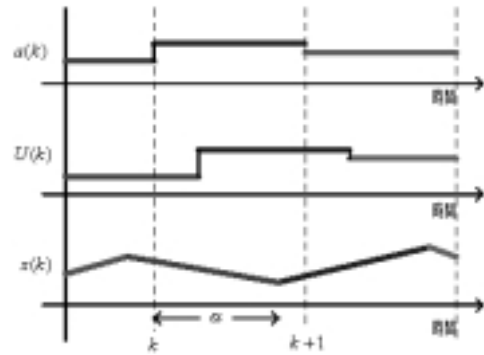


図2: $a(k)$, $U(k)$, $x(k)$ の挙動

コネクション i が要求する最小レートおよび最大レートを $u_{i,min}$, $u_{i,max}$ とおく。このとき、コネクション i における時刻 k での転送レートは $a(k)$ に従って以下のようになる。

$$u_i(k) = a(k)(u_{i,max} - u_{i,min}) + u_{i,min} \quad (4)$$

ここで、 $a(k)$ はスイッチ内の輻輳状態、すなわち $x(k)$ に応じて決定される値であり、制御入力となる。この $a(k)$ の値は、スイッチにおいて制御 packets に書きこまれる。そして、この値に基づいてコネクションにおいて packets 転送レートが変更される。

2.2 PID 型制御則 本報告ではPID制御則を用いて $a(k)$ を決定する⁷⁾。スイッチのバッファ内 packets 滞留量の目標値を x^c とおくと $e(k) \triangleq x^c - x(k)$ を0とするようなPID制御式は次のようになる。

$$a(k+1) = \Psi(a(k) + Ke(k) + L(e(k) - e(k-1))) \quad (5)$$

$$\Psi(x) \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & \text{if } 1 < x \end{cases} \quad (6)$$

ここで K と L は制御パラメータであり、 $\Psi(\cdot)$ は $0 \leq a(k) \leq 1$ となるように導入された飽和関数である．制御則 (5) では、制御用パケットの伝搬遅延時間が考慮されていないのに対し、本報告ではパケットの伝搬遅延時間のノミナル値を α' としたときの制御則を導く¹．特に、 α' は、スイッチ内で書き込まれた $a(k)$ の値にしたがって式 (4) によりパケット転送レートの $U(k)$ が変更され、その制御効果がスイッチ内のバッファに現れるまでの往復伝搬遅延時間の推定値を表している．そこで、時刻 k から伝搬遅延時間 α' 後のバッファ内パケット滞留量の変動を考慮して、バッファ内パケット滞留量 $x(k + \alpha')$ の時刻 k における予測値を $x_{p,\alpha'}(k)$ で表すとする．この予測値は次式で与えられる．

$$x_{p,\alpha'}(k) = x(k) + (\alpha' - n' + 1)(U(k - n') - B) + \sum_{i=1}^{n'-1} (U(k - i) - B) \quad (7)$$

ここで、第 2 項と第 3 項は、時刻 k から $k + \alpha'$ のうちに変動するバッファ内パケット滞留量の総和を表す．

この $e'(k) \triangleq x^c - x_{p,\alpha'}(k)$ を 0 とする PID 制御則は、

$$a(k+1) = \Psi(a(k) + Ke'(k) + L(e'(k) - e'(k-1))) \quad (8)$$

となる．なお、平衡状態近傍では以下の式になる．

$$a(k+1) = a(k) + Ke'(k) + L(e'(k) - e'(k-1)) \quad (9)$$

2.3 伝達関数表現 前節までに、スイッチ内のバッファ内パケット滞留量とパケット転送レートについてのモデル化を行ったが、本節では、そのモデルを伝達関数によって表現する．各信号の流れをブロック線図によって表現すると図 3 に示されるようなフィードバック構造を持つものが得られる．図中の各ブロックは以下のように時間遅延演算子 z^{-1} を用いて計算できる． $a(k)$ 、 $U(k)$ 、 $e'(k)$ の z 変換を $\hat{a}(z)$ 、 $\hat{U}(z)$ 、 $\hat{e}'(z)$ とおく．

- 制御指令値 $a(k)$ の決定 ($G_1(z)$ の部分): 式 (9) より、

$$z\hat{a}(z) = \hat{a}(z) + K\hat{e}'(z) + L(\hat{e}'(z) - z^{-1}\hat{e}'(z))$$

であるので、 $\hat{e}'(z)$ から $\hat{a}(z)$ への伝達関数は以下のようになる．

$$G_1(z) = (z-1)^{-1}(K+L-z^{-1}L) \quad (10)$$

¹ α は実際の伝搬遅延時間であり、 α' は制御則の設計のときに用いられた伝搬遅延時間の推定値である．現実には $\alpha = \alpha'$ とならないことがあり、 α と α' の差をここでは不確かさと呼ぶ．

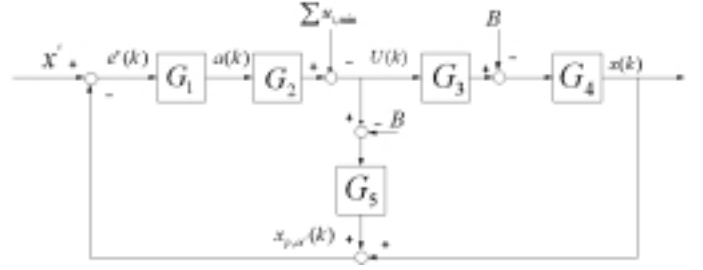


図 3: ブロック線図 1

- $U(k)$ の変更 ($G_2(z)$ の部分): 式 (4) より、

$$\hat{U}(z) = \sum_{i=1}^N (u_{i,max} - u_{i,min}) \hat{a}(z) + \sum_{i=1}^N u_{i,min}$$

したがって、

$$G_2(z) = \sum_{i=1}^N (u_{i,max} - u_{i,min}) \hat{a}(z) \triangleq E \quad (11)$$

- 遅延時間の考慮 ($G_3(z)$ の部分): 式 (3) の第 2 項と第 3 項は、

$$(n - \alpha)z^{-n+1}\hat{U}(z) + (\alpha - n + 1)z^{-n}\hat{U}(z)$$

とかけるので、

$$G_3(z) = (n - \alpha)z^{-n+1} + (\alpha - n + 1)z^{-n} \quad (12)$$

- バッファ内パケット滞留量 $x(k)$ の計算 ($G_4(z)$ の部分): 式 (3) と $G_3(z)$ より、

$$G_4(z) = (z-1)^{-1} \quad (13)$$

- 時刻 $k + \alpha'$ におけるバッファ量 $x_{p,\alpha'}(k)$ の推定 ($G_5(z)$ の部分): 式 (7) の第 2 項、第 3 項より、

$$G_5(z) = (\alpha' - n' + 1)z^{-n'} + \sum_{i=1}^{n'-1} z^{-i} \quad (14)$$

このブロック線図で表された目標値 x^c から出力 x までの伝達関数は以下のように求められ、

$$G(z) = \frac{G_1 G_2 G_3 G_4}{1 + G_1 G_2 G_5 + G_1 G_2 G_3 G_4} \quad (15)$$

この伝達関数により表現されるシステムが安定となるのは、分母多項式の全ての根の絶対値が 1 より小さいときである． $G(z)$ の分母多項式は以下の式となる．

$$F(z) = z^{n+3} - 2z^{n+2} + \{1 + (K+L)E\}z^{n+1} - LEz^n + (K+L)E(n-\alpha)z^2$$

$$\begin{aligned}
& + \{(K+L)E(\alpha-n+1) - LE(n-\alpha)\}z \\
& - LE(\alpha-n+1) \\
& + (K+L)E(\alpha'-n'+1)z^{n-n'+2} \\
& + \{(K+L)E(\alpha'-n'+1) \\
& \quad - LE(\alpha'-n')\}z^{n-n'+1} \\
& + LE(\alpha'-n'+1)z^{n-n'} \quad (16)
\end{aligned}$$

また, PID 制御則で用いる伝搬遅延時間のノミナル値と実際の伝搬遅延時間が等しいとき ($\alpha' = \alpha$) は, 分母多項式は以下ようになる.

$$F_0(z) = z^{n'}(z^3 - 2z^2 + (1+E(K+L))z - EL) \quad (17)$$

このとき, $F_0(z) = 0$ が n' 個の $z = 0$ を根にもつことに注意すれば, $f_0(z) = z^3 - 2z^2 + (1+E(K+L))z - EL$ として, 特性方程式の根を求めることなく安定判別ができる方法として知られている Jury の安定判別法¹¹⁾ を適用することにより, 平衡点が局所指数安定となるための必要十分条件は, $b_0 = -EL$, $b_1 = 1 + E(K+L)$, $b_2 = -2$, $b_3 = 1$ とおくと, 以下ようになる.

$$f_0(1) > 0 \quad (18)$$

$$(-1)^3 f_0(-1) > 0 \quad (19)$$

$$|b_0| < b_3 \quad (20)$$

$$\left| \det \begin{bmatrix} b_0 & b_3 \\ b_3 & b_0 \end{bmatrix} \right| > \left| \det \begin{bmatrix} b_0 & b_1 \\ b_3 & b_2 \end{bmatrix} \right| \quad (21)$$

これらを整理すると以下ようになる.

$$0 < K < -EL^2 + L \quad (22)$$

$$0 < L < \frac{1}{E} \quad (23)$$

この領域を図示すると, 図4となる. この図より, 安定領域は E の増加に伴い狭くなっていることがわかる. また, PID 制御側で用いる伝搬遅延時間のノミナル値と実際の伝搬遅延時間が等しいときは, 伝搬遅延時間の大きさによって安定領域は変化しないことも確認できる.

3 ロバスト安定解析

伝達関数 $G_3(z)$ の部分は, 伝搬遅延時間の不確かさを含んでいる. この不確かさを含む $G_3(z)$ の部分を図5のようにノミナルな部分 ($= G'_3(z)$) と不確かさを含む部分 ($= \Delta(z)$) に分けて考える. すなわち $G_3(z) = G'_3(z) + \Delta(z)$ である. ここで, $G'_3(z)$ と $\Delta(z)$ は以下のようにして与えられる.

$$G'_3(z) = (n' - \alpha')z^{-n'+1} + (\alpha' - n' + 1)z^{-n'} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
\Delta(z) &= (n - \alpha)z^{-n+1} + (\alpha - n + 1)z^{-n} \\
&\quad - (n' - \alpha')z^{-n'+1} - (\alpha' - n' + 1)z^{-n'} \quad (25)
\end{aligned}$$

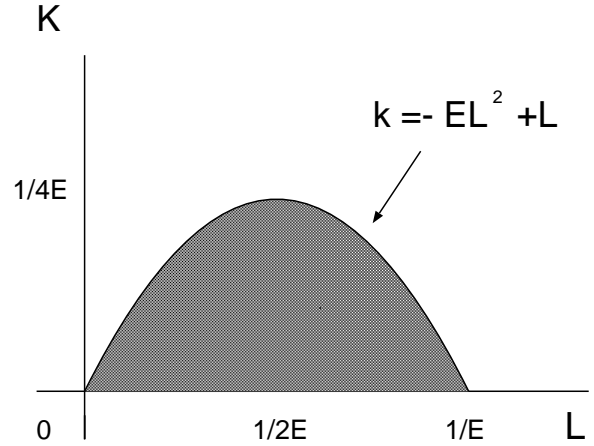


図 4: 安定領域

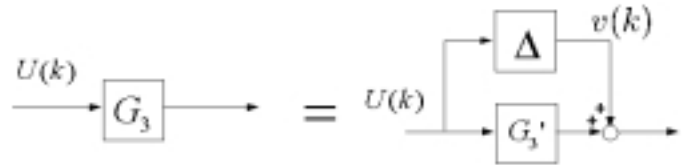


図 5: 加法的な不確かさを用いた表現

$\Delta(z)$ の入力 $U(k)$ であり出力 $v(k)$ とすると, $v(k)$ から $U(k)$ までの伝達関数 $G_0(z)$ は変動を含まなくなり,

$$\begin{aligned}
G_0(z) &= \frac{-G_1 G_2 G_4}{1 + G_1 G_2 G_5 + G_1 G_2 G'_3 G_4} \\
&= \frac{-E((K+L)z - L)}{z^3 - 2z^2 + (1+E(K+L))z - EL} \quad (26)
\end{aligned}$$

となる. この $\Delta(z)$ と $G_0(z)$ によって伝搬遅延時間の不確かさを含む場合の図3のシステムは図6のように $\Delta(z)$ と $G_0(z)$ が相互に結合したものとなる. 図6において $\Delta(z)$ と $G_0(z)$ を伝達する信号が増幅されなければ閉ループ系は安定となる. これはスモールゲイン定理として知られているものである.

以下ではスモールゲイン定理を用いて不確かさを含む

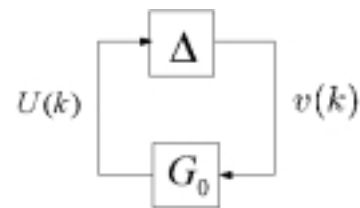


図 6: Δ と G_0 の相互結合

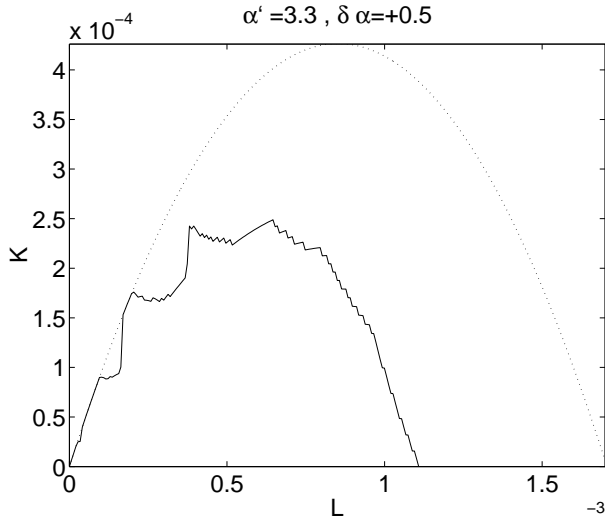


図 7: $\alpha' = 3.3, \alpha = 3.8$ の時の安定領域

システムが安定となるための十分条件を与える．不確かさを含むシステムが安定となるための十分条件は， $G_0(z)$ が安定でかつ，

$$|\Delta(e^{j\theta})| \leq \gamma \quad (0 \leq \theta < 2\pi) \quad (27)$$

$$|G_0(e^{j\theta})| < \gamma^{-1} \quad (0 \leq \theta < 2\pi) \quad (28)$$

をみたく定数 γ が存在することである．式 (17) の場合と同様に $G_0(z)$ の分母多項式が安定な極を持つ条件は，式 (22) (23) となる．

ノミナルな伝搬遅延時間 $\alpha' = 3.3$ として， $\alpha = 3.8$ としたときに図 3 において不確かさを含むシステムが安定となるパラメータ K, L の領域を十分条件を用いて計算すると図 7 のように表される．図 7 において，破線部分の内部は不確かさを含まないときの安定領域 (図 4 の安定領域) であり，実線部分の内部が不確かさを含む場合の安定領域を表している．

4 伝搬遅延時間がコネクション毎で異なる場合のロバスト安定解析

次に，コネクション毎の伝搬遅延時間が異なる場合の考察を行う．コネクション i の伝搬遅延時間を $\alpha_i, n_i = [\alpha_i] + 1 (i = 1, 2, \dots, N)$ とするとバッファ量は以下のようになる．

$$x(k+1) = \phi(x(k)) + \sum_{i=1}^N (n_i - \alpha_i) u_i(k - n_i + 1) + \sum_{i=1}^N (\alpha_i - n_i + 1) u_i(k - n_i) - B \quad (29)$$

ここで，PID 制御器の予測で用いるノミナル値は全てのコネクションで等しいとすると，伝達関数表現は図 8 のよう

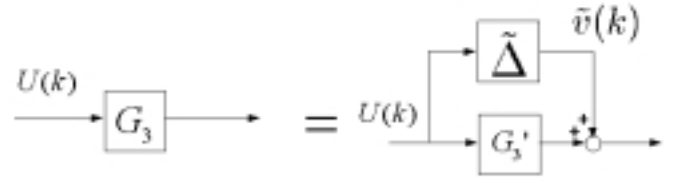


図 8: 加法的不確かさをういた表現 2

に， $G_3(z) = G_3' + \tilde{\Delta}(z)$ (図 5 の $\Delta(z)$ を $\tilde{\Delta}(z)$ で置き換えた形) となっている．ここで， $u_i(k - n_i + 1) = \frac{1}{N} U(k - n_i + 1)$ ， $u_i(k - n_i) = \frac{1}{N} U(k - n_i)$ となることに注意すれば， $\tilde{\Delta}(z)$ は以下のように与えられる．

$$\tilde{\Delta}(z) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \{ (n_i - \alpha_i) z^{-n_i + 1} + (\alpha_i - n_i + 1) z^{-n_i} \} - (n' + \alpha') z^{-n' + 1} - (\alpha' - n' + 1) z^{-n'} \quad (30)$$

ここで，コネクション毎の伝搬遅延時間が異なるシステムが安定となる十分条件は G_0 が安定でかつ，

$$|\tilde{\Delta}(e^{j\theta})| \leq \gamma \quad (0 \leq \theta < 2\pi) \quad (31)$$

$$|G_0(e^{j\theta})| < \gamma^{-1} \quad (0 \leq \theta < 2\pi) \quad (32)$$

をみたく定数 γ が存在することである．

この十分条件を用いて，ノミナル値を $\alpha' = 3.3$ として，変動を $3.3 \leq \alpha_i \leq 3.8$ としたときに，システムを安定化できる制御パラメータ K, L の範囲は以下のようになる．図 9 において，破線部分の内部は不確かさを含まないときの安定領域 (図 4 の安定領域) であり，実線部分の内部がコネクション毎に伝搬遅延時間が異なる場合の安定領域を表している．

5 シミュレーション

ここでは，レート制御が用いられている ATM における ABR サービスを考える，送受信するパケットは 53 バイトの固定長セルとし，単位時間毎 (0.280ms 毎) に送られている制御用の RM セルにより転送レートが変更されるとする．そのとき，スイッチ内のバッファ量を 30 K バイト (579cell) とし，バッファ内のパケット数の目標値 $x^c = 500$ (cell)，ATM のパケット送出レート $B = 353.7$ (cell/ms)，各コネクションが要求する最大レートおよび最小レートを $u_{i,max} = 353.7$ (cell/ms)， $u_{i,min} = 35.3$ (cell/ms) として，3 本のコネクションがあるものとする．ここで，図 10 から図 13 で示すシミュレーション結果は，縦軸をバッファ内のパケット数，横軸を RM セルが送られる単位時間としたときのバッファ内パケット数の時間変化を表している．

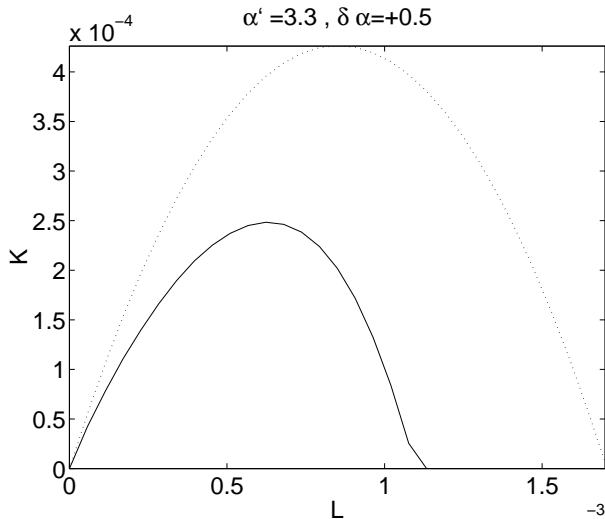


図 9: $\alpha' = 3.3, 3.3 \leq \alpha_i \leq 3.8$ の時の安定領域

図 7 で示した安定領域の特性を調べるために、 $\alpha' = 3.3$ (伝送距離が約 92km) に対して、 $\alpha = 3.8$ (伝送距離が約 106km) の場合におけるシミュレーション結果を図 10 に示す。この結果より、伝搬遅延時間がノミナル値と異なる場合でも式 (27)、式 (28) を満たすパラメータを用いることにより対象を安定化できることを確認できる。

図 11 は、図 7 で示した安定領域外のパラメータを用いた結果である。伝搬遅延時間は、図 10 と同様に $\alpha' = 3.3$ (伝送距離が約 92km) に対して、 $\alpha = 3.8$ (伝送距離が約 106km) の場合である。この結果から、安定領域外のパラメータを用いると振動的となり対象を安定化できていないことが確認できる。

また、ノミナル値からの変動が大きくなった場合にも式 (27)、式 (28) を満たすパラメータを用いることにより対象を安定化できる。図 12 は、ノミナル値がこれまでと同様に $\alpha' = 3.3$ (伝送距離が約 92km) に対して、伝搬遅延時間 $\alpha = 4.2$ (伝送距離が約 118km) の場合におけるシミュレーション結果である。

また、図 13 では、ノミナル値 α' に対して、3 本の接続の伝搬遅延時間 α_i がそれぞれ異なるときのシミュレーションを図 9 の安定領域を用いて行っている。このとき、ノミナル値 $\alpha' = 3.3$ (伝送距離が約 92km) に対して、それぞれの接続の伝搬遅延時間 α_i は、 $\alpha_1 = 3.3$ (伝送距離が約 92km)、 $\alpha_2 = 3.5$ (伝送距離が約 98km)、 $\alpha_3 = 3.8$ (伝送距離が約 106km) となっている。この結果から安定領域に入るような伝搬遅延時間のときは、接続毎の伝搬遅延時間が異なる場合でも安定化できることがわかる。

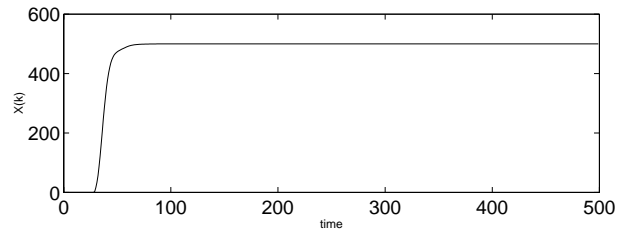


図 10: バッファ内のパケット数の時間変化。伝搬遅延時間がノミナル値と異なる場合 ($\alpha' = 3.3, \alpha = 3.8$)。図 7 の安定領域内のパラメータ $K = 0.00005, L = 0.0005$ を用いた場合

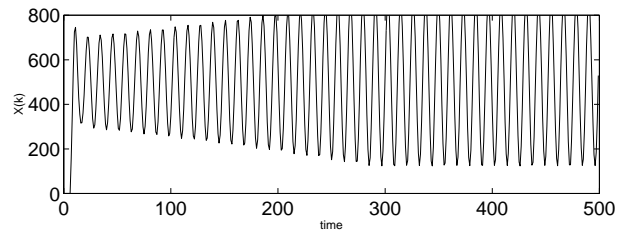


図 11: バッファ内のパケット数の時間変化。伝搬遅延時間がノミナル値と異なる場合 ($\alpha' = 3.3, \alpha = 3.8$)。図 7 の安定領域外のパラメータ $K = 0.0005, L = 0.0005$ を用いた場合

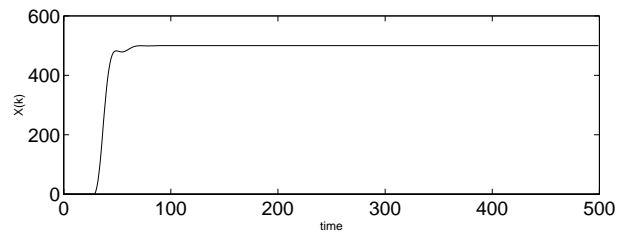


図 12: バッファ内のパケット数の時間変化。伝搬遅延時間とノミナル値との差が大きくなる場合 ($\alpha' = 3.3, \alpha = 4.2$)。安定領域内のパラメータ $K = 0.00005, L = 0.0005$ を用いた場合

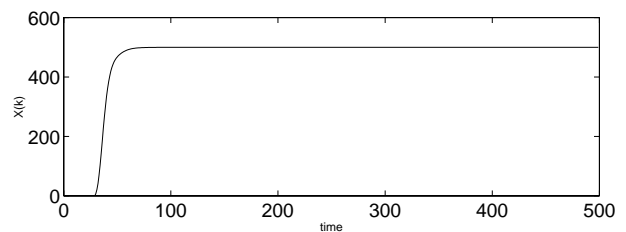


図 13: バッファ内のパケット数の時間変化。ノミナル値から各接続の伝搬遅延時間がばらつく場合 ($\alpha' = 3.3, \alpha_1 = 3.3, \alpha_2 = 3.5, \alpha_3 = 3.8$)。図 7 の安定領域内のパラメータ $K = 0.00005, L = 0.0005$ を用いた場合

6 おわりに

本報告では、最初に伝搬遅延時間を考慮したスイッチのモデル化を行った。次に離散時間 PID 型制御則を提案し、伝達関数表現を用いることにより、制御対象が安定となる制御パラメータの条件 (安定領域) をスモールゲイン定理を用いて求めた。これにより伝搬遅延時間に不確かさを含む場合でも安定化できることを示せた。この結果を用いることによりコネクション毎で伝搬遅延時間が異なるときにも、制御則の設計時には伝搬遅延時間が等しいと仮定して安定化制御則を求めることが可能となった。今後の検討課題としては、過渡状態を感度関数などを評価することにより解析していくことが挙げられる。

謝辞

貴重なご意見を頂いた、大阪大学 村田 正幸 教授、大崎 博之 助手に感謝します。

参考文献

- 1) W. Stallings, "High-speed Networks TCP/IP and ATM Design Principles," Prentice-Hall, 1998.
- 2) H. Ohsaki, M. Murata, and H. Miyahara, "Parameter tuning analysis of a rate-based congestion control algorithm for ATM networks," *Int. J. Commun. Systems*, vol. 11, pp. 103–128, March-April, 1998.
- 3) H. Ohsaki, M. Murata, and H. Miyahara, "Available bit rate congestion control in ATM Networks," *Proc. IEEE ICC'97*, pp. 182–186, June, 1997.
- 4) O. C. Imer, S. Compans, T. Basar, and R. Srikant, "Designing efficient explicit-rate switch algorithm with max-min fairness for ABR service class in ATM networks," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 38–56, 2001.
- 5) S. Mascolo, "Congestion control in high-speed communication networks using the Smith principle," *Automatica*, vol. 35, no. 12, pp. 1921–1935, 1999.
- 6) C. -F. Su, G. de Veciana, and J. Walrand, "Explicit rate flow control for ABR services in ATM networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 8, no. 3, pp. 350–361, 2000.
- 7) B. Li and K. Nahrstedt, "A control theoretical model for quality of service adaptations," *Proc. 6th International Workshop on Quality of Service*, pp. 145–153, May, 1998.
- 8) 久保聖治, 潮俊光, 村田正幸, 大崎博之 "伝搬遅延時間を考慮した ATM の PID 型輻輳制御," 第 45 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp.261-262, 2001.
- 9) C. E Rohrs and R. A. Berry, "A linear control approach to explicit rate feedback in ATM networks," *Proc. IEEE INFOCOM'97*, pp. 277–282, April 1997.
- 10) A. Kolarov and G. Ramamurthy, "A control theoretic approach to the design of closed-loop rate based flow control for high speed ATM networks," *Proc. IEEE INFOCOM'97*, pp. 293–301, April 1997.
- 11) C. L. Phillips and H. T. Nagel, Jr., "Digital Control System Analysis and Design," Prentice-Hall, 1984.