

コンピュータネットワークにおける 輻輳制御への制御理論の応用



研究ノート

潮 俊 光*

An application of control theory to congestion control
in computer networks

Key Words : control theory, congestion control, computer networks, rate control

1. はじめに

インターネットの普及に伴い、インターネット上を流れるパケット量が急速に増加している。インターネットのようなパケット交換ネットワークでは、スイッチ、ルータなどの、いわゆる中継ノードにおいて処理能力以上のパケットが集中した場合に、パケットが長時間そこで待たされ、パケットの棄却が起こることがある。パケットが予想以上に伝達遅延した場合や棄却された場合には、パケットの再送が行われ、益々ネットワーク上を流れるパケット量が増加することになる。このようなネットワークの混雑を輻輳とよぶ。輻輳を回避するためには、各ホストでのパケットの送信量を制御する必要がある。パケットの送信量の制御を一般にフロー制御とよび、特に輻輳を回避するためのフロー制御を輻輳制御という。

輻輳制御には大別してウィンドウ制御とレート制御がある。ウィンドウ制御とは、送信したパケットに対してその送達確認情報(ACK)が戻って来るまでの間に送信できるパケット量を制御する方法で、インターネットでの代表的プロトコルであるTCPはウィンドウ制御を採用している。レート制御とは、単位時間あたりに送信できるパケット量を制御する方法で、ATMスイッチで採用されている。

いずれの制御においても、ネットワーク内の輻輳情報を基に送信ホストでパケット量を制御しており、

制御理論の観点から見ると一種のフィードバック制御の構造になっている。そのため、最近、制御理論を輻輳制御に応用する研究が欧米を中心に活発に行われている^[3]。制御理論を応用する利点は、安定性が理論的に保証された制御則(プロトコル)を設計できる点にある。例えば、文献^[1,2]では、TCPの輻輳制御に制御理論を応用して、安定となる制御パラメータを求めている。ここでは、ATMに対するPID型レート制御則について述べる。

2. ATMスイッチ

2.1 ABRサービスクラス

ATMでは、データはセルと呼ばれる固定長のパケットによって送信される。ATMには様々なサービスのクラスが準備されており、その中のひとつであるABRサービスクラスではレート制御によって輻輳制御を行っている^[4]。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側に輻輳情報を伝える。輻輳情報は帯域管理用のRMセルによって送信端末に伝えられる。RMセルには16ビットからなるER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が可能である。ERフィールドを用いた制御法としては、セル到着率をもとにレートを決定するERICAなどがあるが、その安定性に対しては理論的研究は少ない。ここ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基にセル転送レートを決定する制御法について述べる。

2.2 対象モデル

図1に示すような最大接続数 N のスイッチの単一の出力ポートを考える。簡単のためにここでは、RMセル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。RMセルが送られたときのスイッチの状況に注目し



* Toshimitsu USHIO
1958年2月生
1985年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了
現在、大阪大学・大学院基礎工学研究科・システム人間系専攻、教授、
学術博士、システム制御理論
TEL 06-6850-6390
FAX 06-6850-6390
E-Mail ushio@sys.es.osaka-u.ac.jp

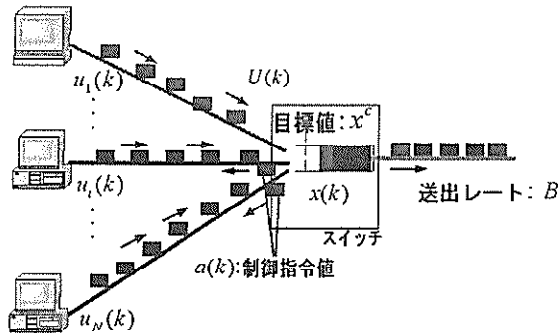


図1 ATMスイッチ

た離散時間モデルを考える。i番目のコネクシヨンのセル転送レートを $u_i(k) \in R$ 、その総和を $U(k)$ 、スイッチのセル送出レートを $B \in R$ 、RMセルの伝搬遅延時間を $\alpha \in R$ とすると、スイッチ中のバッファ内セル滞留量 $x(k)$ は次の差分方程式によって記述される。

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

ただし、

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

ここで、 n は、 α 以上の整数での最小値であり、ガウス記号を用いて $n = [\alpha] + 1$ となる。簡単のために、伝搬遅延時間がすべてのコネクシヨンで等しい場合について述べる。コネクシヨン 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、コネクシヨン i においては、時刻 k での転送レートを $a(k)$ に従って以下のように決定する。

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

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RMセルに書きこまれる。そして、この値に基づいてコネクシヨンにおいてセル転送レートが変更される。

3. PID型レート制御

ここでは文献^[5]で考察されたPID制御則を用いて $a(k)$ を決定することにする。スイッチのバッファ内セル滞留量の目標値を 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。

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

ただし、

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

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。この制御則では、RMセルの伝搬遅延時間が考慮されていないので、伝播遅延時間のために不安定化することがわかっている。そこで、伝播遅延時間を考慮した制御則を提案する。

RMセルによって指示されたセル転送レートでセルが到着するまでに α 時間かかる。時刻 $k + \alpha$ でのバッファ内セル滞留量 $x(k + \alpha)$ 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。

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

この $e'(k) \triangleq x^c - x_{p, \alpha}(k)$ を0とするPID制御則は以下のようになる。

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

この制御側を用いると、セルの滞留量の目標値が平衡点となる。それが安定となる条件はJuryの安定判別法より以下のようになる^[6]。

$$0 < K < -EL^2 + L \\ 0 < L < \frac{1}{E}$$

ただし、 E は次式で与えられる。

$$E \triangleq \left. \frac{\partial U}{\partial a} \right|_{(x, a) = \text{平衡点}}$$

このように、制御理論を用いると安定となる制御パラメータをシステムティックに求められる。これが制御理論を利用する最大の特徴である。

K - L 平面上に平衡点が安定となる領域を図示すると図2のようになる。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、伝

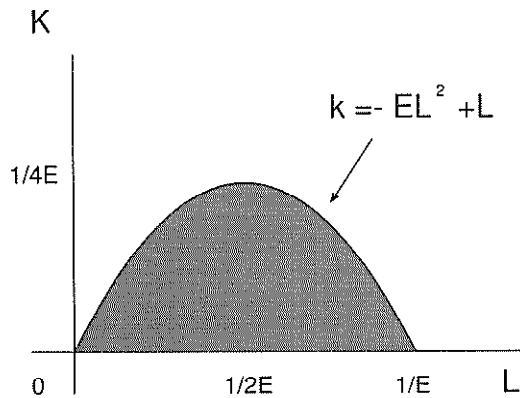


図2 安定領域

搬送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。

実際のスイッチでは、伝播遅延時間に変動がある場合や各コネクションごとに伝播遅延時間が多少異なる場合がある。ロバスト制御理論においてしばしば使われるスモールゲイン定理を応用することで、実際の伝播遅延時間と α との差 $\delta\alpha$ がある範囲内にある場合には、各コネクションの伝播遅延時間を正確にわからなくても $\delta\alpha$ さえわかれば安定になる制御パラメータを求めることができる。詳細は文献^[7,8]を参照されたい。

4. おわりに

インターネットには集中管理機構がないために、輻輳制御はかなり難しい問題となっている。制御理論を用いれば、伝播遅延に対してロバストな輻輳制御則を求めることができる。現在のところ、ここで紹介したように単一のスイッチを対象にした研究が主であり、ネットワークの中でこのような制御則がどこまでうまく機能するのかについては理論的にはほとんど手つかず状態である。制御理論においては、分散制御という手法が昔から研究されており、これを応用することが今後の研究課題となっている。

最後に、この研究を始めるに当たり、貴重なアドバイスを頂いた大阪大学村田正幸教授、大崎博之助手に感謝する。

参考文献

- [1] H.Ohsaki, M.Murata, T.Ushio, and H.Miyahara: Stability analysis of window-based flow control mechanism in TCP/IP networks, Proc. 1999 IEEE International Conference on Control Applications, Hawaii, USA, pp.1603-1606, 1999.
- [2] H.Ohsaki, M.Murata, T.Ushio, and H.Miyahara: A control theoretical approach to a window-based flow control mechanism with explicit congestion notification, Proc. 38th IEEE Conference on Decision and Control, Phenix, Arizona, pp.2715-2720, 1999.
- [3] O.C.Imer, et al.: Available bit rate congestion control in ATM networks, Control Systems Magazine, vol.21, no.1, pp.38-56, Feb.2001.
- [4] S.S.Sathaye: ATM form traffic management specification verion 4.0, ATM Forum Contribution 0056.000, April 1996.
- [5] 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.
- [6] 久保, 潮, 村田, 大崎: 伝播遅延時間を考慮したATMのPID型輻輳制御, 電子情報通信学会論文誌, vol.385-B, no.3, 2002.
- [7] 久保, 潮, 山本: 伝播遅延時間に関するロバスト性を考慮したPID型レート制御, 2001年SICE関西支部シンポジウム, pp.180-183, 2001.
- [8] 久保, 潮, 山本: 伝播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-, インターネットコンファレンス2001論文集, pp.49-55, 2001.

