

ベイズ性能推定法の VP 容量制御への適用方法

齋藤 洋 塩田茂雄 川村宜伯
NTT マルチメディアネットワーク研究所

(受理 1996 年 8 月 1 日 ; 再受理 1997 年 3 月 3 日)

和文概要 通信網では多様な制御が行われている。これらの制御を実現する上で、しばしば性能の推定が必要になる。網が実際に使用されている、いわゆる網運用時に好適な性能の推定法としてベイズ推定に基づく性能推定が考えられる。本稿では、その具体的適用方法を、ATM 網における VP 制御を例に述べた。実際の網運用時には、詳細なトラフィック測定を常時行うことはできない。その反面、網運用以前に得られている性能推定対象システムに関する情報やトラフィック条件に関する情報があり、また性能の測定も行われている。これらを利用して当該システムの性能を推定するには、ベイズ推定の枠組みが有効である。ATM 網の VP 制御を例に、以下の様な具体的適用方法を検討した。(1) 網運用以前の情報から、ベイズ推定のためのモデルの構成とその初期値の決定を行うこと。(2) ベイズ推定に必要な各確率変数の分散を、シミュレーション等により、決定すること。数値例により、本提案に基づく制御が良好に動作することを示した。

1. はじめに

通信網のトラフィック設計や管理、制御において、性能や品質を推定することは極めて重要である。例えば、次の網資源(交換機のプロセッサ容量や伝送システム容量、あるいはバッファ量、回線数等)の更改時期までに、性能や品質(以下、性能と記述)が所定の水準にあるかどうか、所定の水準を満たさないようであればどの程度の量の網資源が必要か(この評価がトラフィック設計とよばれる)判断する必要がある。また、網資源と接続中の呼数が与えられた時、接続要求している呼を受け入れるかどうかの制御(受け付け制御)を網が行う必要がある。この時の判断基準は「この呼を受け入れた場合、接続中を含め各呼の性能が所定水準を満足できると推定されるか否か」である。もし、満足できるなら、この呼は受け入れられ、そうでなければこの呼の接続は拒否される。このように、トラフィック設計等の中心課題は性能推定であるケースが多くある。これらの性能推定に対して、既存のシミュレーションや待ち行列理論は、有効な手段として機能して来た。これらの方法の利点はトラフィック量等の各トラフィック条件に対応して、性能の推定値が得られることにある。従って、例えば、20%トラフィックが増大した時の性能はどうなるかに答えることができる。一方、これらの方法はモデル化誤差が避けられない。例えば、性能推定の前提としてポアソン到着等を仮定する必要がある。また、システムの挙動を完全にシミュレーションや待ち行列理論に持ち込むことはできない。

さて、今日の通信技術の発展、特に ATM (Asynchronous Transfer Mode) [1] の導入は、新たな性能推定方法を要求している。その主な理由は以下の様なものである。まず、ATM では、セルと呼ばれる固定長ブロックによる情報転送が行われるが、このセルの到着過程がポアソン到着などのよく知られた過程とはかなり異なる上、上位アプリケーションや情報の内容により違ったものになること。次に、受け付け制御等の高度なトラフィック制御 [2, 3] が行われ、その際、かなり高精度の性能推定が必要なこと。それにもかかわらず、トラフィックに関する詳細な統計的特性を常時測定することは通信システムの処理能力上期待できないこと。そこで、本稿では上記動向を鑑み、実際に通信網を運用する際に適用可能な性能推定

を考える。まず、その出発点として、通信網運用者が持っている情報は何かを考え、それらを有効に利用する方法としてベイズ推定を用いることを検討し、それに基づき ATM の VP 容量制御に対する適用法を具体的に示す。

2. 性能推定のための情報

運用時にある通信網 (または、その一部) の性能を推定しようとする時、どのような情報が実際に使えるのであろうか。通信網運用者の有する情報は大きく、運用前から持ち得る情報と運用時に得た情報に分けられる。運用前から持ち得る情報とは、例えば、交換機の性能公称値や人工的なトラヒック条件下でのプロトタイプシステムの性能特性である。また、実験システムにおけるトラヒック特性の測定値等も考えられる。実際に研究されている ATM の多重化性能等 [3, 4] は、「特定トラヒック源が多重されたら、この程度の性能が見込める」ということを与えている点で、多くの場合、この分類に属する情報である。

次に、運用時に得られるトラヒックに関する情報としては、トラヒックそのものに関する情報と性能情報がある。一定時間内に到着するセル数や呼数などの情報が前者に相当し、資源の平均使用率や呼損率、セル損失率などが後者に相当する。これらの情報のうち、極く基本的なものは、各装置の製造業者非依存に共通に得られるように (標準化)、どのメーカーのものを使っても、これらの情報に基づく設計や制御、管理が可能となるよう努力がなされている。しかしながら、前述の様に、例えばトラヒック特性を同定したり、トラヒックモデルのパラメータを全て特定できるだけの情報が得られる状況にはない。

また一方で、トラヒック設計等とは別に、性能監視用に性能測定が行われていることは注目に値する。従来これらの測定結果は実現性能が著しく悪い場合に、特別に手立てを講ずるためのトリガとなることはあっても、これらがトラヒック設計や制御にフィードバックされることは、ほとんどなかった。その原因の 1 つは、トラヒック設計等がトラヒックモデルを構築し、それを用いて性能推定を行い、設計値を算出する、という枠組みであるためである。仮に性能の推定値と実際の測定値に乖離が生じて、新たなトラヒックモデルを構築し直すだけの情報がなければ、そのままの枠組みを維持させざるを得ないのである。本稿では、トラヒックモデルの構築や同定を行うには不十分な情報しか得られないが、事前情報や性能測定は得られているという現状を踏まえ、ベイズ推定に基づく性能推定を以下の節で述べる。

3. ベイズ型性能推定

上述の様に、運用中の通信網の性能推定のための情報としては、その通信網に関する実際の測定を行わずとも得られる事前情報と、実際に測定して得られる情報の 2 つがある。統計的推定法の枠組みで見れば、こうした 2 種類の情報に基づく推定問題は、ベイズ推定問題にほかならない [16]。運用前に得られている事前情報がベイズ推定の事前情報にあたり、性能推定は、ベイズ推定の推定対象に対する測定値である。トラヒックに関する情報はベイズ推定の変数に対応する。

さて、これまで、ベイズ統計を性能推定に用いる研究は幾つか行われてきた [6, 7, 8, 9, 10, 11, 29]。しかしながら、これらの研究はベイズ統計手法を例えばセルの到着過程やサービス分布のモデル化に用いたものである。従って、そのモデル化後、待ち行列理論的解析が必要であるばかりでなく、事前情報の利用や性能測定値による性能推定結果の補正効果は期待できない。本稿では、既存の性能推定の枠組みの一部にベイズ統計手法を導入するのではなく、ベイズ推定によって通信網の実際の運用時に用いることのできる性能推定の枠組み全体の構築が具体的に出来ることを狙いとする。

4. 定式化

本節でベイズ推定問題を定式化する [5]。 \mathbf{x} をトラヒック条件を表わすベクトルとする。条件 \mathbf{x} の時の、性能推定対象の真の性能を $a(\mathbf{x})$ とする。これに対して、事前情報として得

られている性能, すなわち事前 (性能) 推定値, を $m(\mathbf{x})$ と書く. 今, 時刻 t で, トラヒック条件 \mathbf{x}_t で性能の測定値 $b_t(\mathbf{x}_t)$ を得る. 測定誤差を e_t とすると, $b_t(\mathbf{x}_t) = a(\mathbf{x}) + e_t$ である. $\mathbf{b}_n = (b_1(\mathbf{x}_1), \dots, b_n(\mathbf{x}_n))'$, $\mathbf{e}_n = (e_1, \dots, e_n)'$ とおく. ここで ' は転置を表わす. 各トラヒック条件 \mathbf{x} に対して, 性能推定値を得るため, 真の性能と事前情報との間に, k 個の未知係数 $c(1), \dots, c(k)$ を有する以下の関係式があるものとする.

$$a(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^k c(j) f_j(m(\mathbf{x}), \mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで f_j は前もって決められた関数である. これから次式を得る.

$$b_t(\mathbf{x}_t) = \sum_{j=1}^k c(j) f_j(m(\mathbf{x}_t), \mathbf{x}_t) + e_t \quad (2)$$

$$\mathbf{c} = (c(1), \dots, c(k))', \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(m(\mathbf{x}), \mathbf{x}), \dots, f_k(m(\mathbf{x}), \mathbf{x})), \quad F_n = \begin{pmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}_1) \\ \vdots \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}_n) \end{pmatrix} \quad \text{とおくと,}$$

$$\mathbf{b}_n = F_n \mathbf{c} + \mathbf{e}_n \quad (3)$$

となる. 従って, 係数ベクトル \mathbf{c} を得ることが性能推定の問題となる. ベイズ推定は多様な統計的仮定の上で検討されているが, 本稿では最もよく検討されている正規分布上へのベイズ推定の定式化を用いることにする. 測定誤差 e_n は, 平均 $\mathbf{0}$, 分散 V_n の多次元正規分布に従うとし, 係数ベクトル \mathbf{c} は平均 $\bar{\mathbf{c}}$, 分散 Ψ_0 の多次元正規分布に従うとする. (すなわち事前情報は, 測定に対する自然共役事前分布をなすとしている. 自然共役をとることでベイズ統計量がうまく計算できることが知られている [16].) さて, 測定値 $b_1(\mathbf{x}_1), \dots, b_t(\mathbf{x}_t)$ から推定された真の性能 $a(\mathbf{x})$ 及び係数ベクトル \mathbf{c} の推定値を各々 $\hat{a}_t(\mathbf{x}), \hat{\mathbf{c}}_t = (\hat{c}_t(1), \dots, \hat{c}_t(k))$ とする. この時,

$$\hat{a}_t(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^k \hat{c}_t(j) f_j(m(\mathbf{x}), \mathbf{x}) \quad (4)$$

が成立している. 特に, $\hat{a}_0(\mathbf{x})$ は事前情報のみに基づいた性能推定値である. すなわち, $\hat{a}_0(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x})$ である (図 1). 今, $f_1(m(\mathbf{x}), \mathbf{x}) = m(\mathbf{x})$ とすると, $\hat{\mathbf{c}}_0 = \bar{\mathbf{c}} = (1, 0, \dots, 0)'$ である.

4.1 ベイズ推定

ベイズ推定法 [16] により, \mathbf{b}_n が得られた時の \mathbf{c} に対する事後分布は, 平均 $\hat{\mathbf{c}}_n$ 分散 Ψ_n をもつ多次元正規分布となる. ここで, $\hat{\mathbf{c}}_n, \Psi_n, \hat{a}_n(\mathbf{x})$ は以下の様に与えられる.

$$\hat{a}_n(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \hat{\mathbf{c}}_n, \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{c}}_n = \Psi_n (\Psi_0^{-1} \bar{\mathbf{c}} + F_n' V_n^{-1} \mathbf{b}_n), \quad (6)$$

$$\Psi_n = (\Psi_0^{-1} + F_n' V_n^{-1} F_n)^{-1}. \quad (7)$$

以下の様に, $\hat{\mathbf{c}}_n, \Psi_n, \hat{a}_n(\mathbf{x})$ を再帰的に表現することもでき, これらは実時間的な推定には好適である. 各 $t = 1, \dots, n$ に対し,

$$\hat{a}_t(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \hat{\mathbf{c}}_t, \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{c}}_t = \hat{\mathbf{c}}_{t-1} + \Psi_t \mathbf{f}(\mathbf{x}_t)' v_t^{-1} (b(\mathbf{x}_t) - \mathbf{f}(\mathbf{x}_t)' \hat{\mathbf{c}}_{t-1}) \quad (9)$$

$$\Psi_t = (\Psi_{t-1}^{-1} + \mathbf{f}(\mathbf{x}_t)' v_t^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}_t))^{-1}. \quad (10)$$

但し, $V_n = \text{diag}(v_1, \dots, v_n)$ である.

式 (9), (10) はカルマンフィルタと同じである. いわゆる状態ベクトルが \mathbf{c} , 測定値は $b_t(\mathbf{x}_t)$, 観測方程式は式 (2) である.

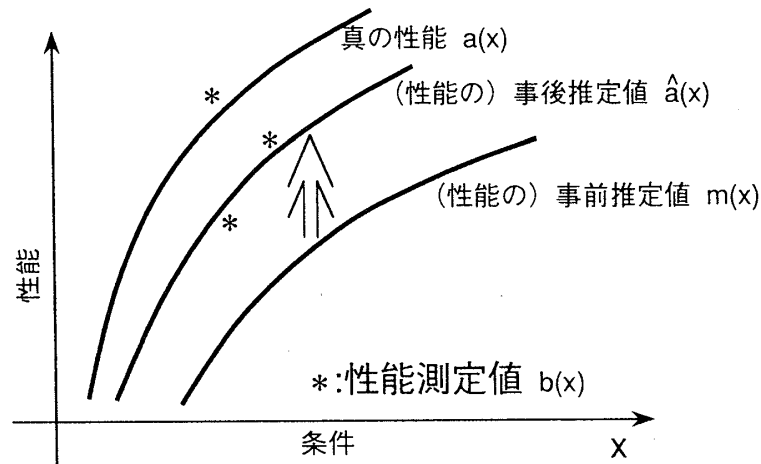


図 1. ベイズ性能推定

4.2 係数ベクトルが変化する場合

実際の特徴が正規分布等の仮定からはずれている場合、別の仮定に基づくベイズ推定も可能である。より現実的な方法としては、推定対象が変動を有するとして、前記推定方法を適用する。これにより、推定結果が測定値と乖離していても測定値の増大に伴い、推定の補正が行なわれにくくなる現象を防げることが知られている。推定対象であるベクトルは、徐々に変化するとし、時刻 t における真の値を c_t とする。各時刻で加わる変動成分 g_t が、平均 0 、分散 W_t の多次元正規分布に従うとする。すなわち、

$$c_{t+1} = c_t + g_t \quad (11)$$

である。式 (8), (9) および次式により逐次推定が可能となる。

$$\Psi_t = ((\Psi_{t-1} + W_{t-1})^{-1} + f(x_t)'v_t^{-1}f(x_t))^{-1} \quad (12)$$

5. VP 容量制御への応用

前節までに、通信網の運用時の性能推定問題は、ベイズ推定の定式化にふさわしく、例えば式 (8), (9), (12) のような形で性能推定可能であることを述べた。これにより、受け付け制御 [15] や固定 VC (Virtual Channel [28]) 用トラヒック管理 [5] に応用が可能となる。しかしながら、実際に応用するには、どのようにして関数 $f_1(x), \dots, f_k(x)$ を選ぶか、事前情報に基づく初期推定量の推定分散 Ψ_0 はどうとるのか、といったことが課題となる。これは、様々な統計手法と同じである。

本稿では、これらの課題を VP 容量制御に応用した場合について、解決方法を述べる。ここで VP (Virtual Path) とは、ATM に導入される論理的パスのことである。通常 VCH (VC ハンドラと呼ばれる ATM の VC (電話網の回線に相当) を交換する交換機) 間に設定される (図 2)。VP は、その論理性故、多様な制御が高速かつ容易に実現可能であり、多くの研究が行われている [12, 13, 14]。本稿では、セルに関するトラヒック情報、性能情報を測定値として得て、セル損失率という性能尺度が、VP 容量が変化した時にどう変化するかを推定し、所定水準の性能となる VP 容量に常になるよう容量を制御することを考える。ATM では、多様な ATM レイヤサービスが、固定 VC や選択接続 VC に対して提供される。どの ATM レイヤサービスが、どのような受付制御か、固定 VC か選択接続 VC か、等により、品質劣化は呼損率という形で生じたり、セル損失率という形で生じたりする。本稿で検討するセル損失率推定に基づく VP 容量制御は、現在多くのユーザによって使用されてい

る「VC の帯域割り当てを行わない固定 VC が收容される VP」に、主として使用されるものである。VC の帯域割り当てを行わないため、各 VC、すなわちセルと呼ばれる固定長パケットの発生源は、何の制限もなく任意の流量を生成し、VP に流すことができる。これらのセルを收容し、転送する VP は、流入セル流量が過大となる場合は、「セルのあふれ」が生じ、溢れたセルはセル損失となる。これが「VC の帯域割り当てを行わない固定 VC が收容される VP」の品質劣化である。そこで、VP 容量を調整し、セル損失率をある目標値以下にしよう、というものである。特に、セル損失率目標値は小さな値であり、セル損失率測定値が十分な精度で測定されるようでは、通常品質劣化が過大であったり、品質劣化継続時間が長大である、という特性があることに注意する。

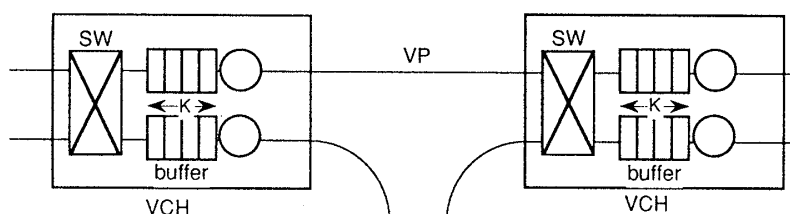


図 2. ネットワークと VP

待ち行列モデルの言葉で、VP 容量制御を述べる。今、バッファサイズ K 、単位時間あたりのサービス能力 B_{VP} のシングルサーバキューを考える。ここで、サーバは VP であって、サービスはセルの転送、客はセル、VP 容量はサーバのサービス能力に対応する。客 (セル) は、ある確率過程に従って到着し、先着順にサービスされる。この時のサーバのサービス能力 B_{VP} を、トラヒックや性能の測定結果に応じて変化させ (すなわち、VP 容量を制御し)、常にこのシングルサーバキューにおける性能を所定水準としたい。測定データは到着セル数、セルが到着時点でバッファ内にある定められた閾値 L 以上セルがある頻度、セル損失率の 3 種類とする。(これらは実際に ATM 網で測定されている。) 性能尺度としては、セル損失率を考える。推定対象は、一般の L に対し、セル到着時点でシステム内に L 以上セルが存在する確率とし、特に $L = K + 1$ の場合として、セル損失率を含むものとする。

$\mathbf{x} = (\ln \rho, L)$ (ρ は 1 セル転送時間で規格化した加わるセル量) とし、 $a(\mathbf{x}) = \ln \Pr(Q \geq L)$ (Q はシステム内セル数) に取ると、VP 容量制御の問題は、セル損失率推定値 $\hat{a}(\mathbf{x} = (\ln \rho, K + 1))$ を得て、この値が性能目標値となる ρ を求め、目標の負荷 y^* (セル/秒) (例えば現状の 20% 増) に対して $\rho = y^*/B_{VP}$ となる B_{VP} (セル/秒) によって VP 容量を決める。すなわち、目標負荷で丁度性能が性能目標値になるように VP 容量を決める。以下で、実際にどのように関数 f_i を選ぶか、初期分散をどうとるか等を具体的に述べる。

5.1 関数の決定

本節では、関数 $f_1(m(\mathbf{x}), \mathbf{x}), \dots, f_k(m(\mathbf{x}), \mathbf{x})$ を決める方法について述べる。特に応用上非常に小さいセル損失率目標値を有するシステムに対して適用可能な方法であることが重要である。この場合、各測定時間中に測定されるセル損はほぼ常に 0 である。従って、セル損の測定値のみにより駆動される性能推定器は、安定性や精度上の問題が生ずる [15]。ここではバッファ内のセル数が閾値以上である頻度の測定値を活かすことでこの点を解決する。各関数の選択もそれに照らして行う。まず、VP 容量制御はシングルサーバキューのサービス能力の決定問題であること、多くのシングルサーバキューでは以下の漸近特性を有すること、を利用する。

$$\Pr(Q \geq L) \sim A\gamma^{-L} \quad (L \rightarrow \infty) \quad (13)$$

ここで、 A, γ は定数である [21, 22, 23, 24]。上記漸近特性は多くの時点で成立し、本稿では、セル到着時点に対する性質として利用する。さて、 A, γ は ρ に依存した定数となる [25]。 ρ

が多くの通信システムにおいて測定可能な量であり、これらを ρ の関数として表現することは本応用上重要である。 $\ln A, \ln \gamma$ を $\ln \rho = 0$ のまわりに展開することを考える。

$$\ln A = \sum_{i=0}^{\infty} c_i^{(1)} (\ln \rho)^i \quad (14)$$

$$\ln \gamma = \sum_{i=0}^{\infty} c_i^{(2)} (\ln \rho)^i \quad (15)$$

上式のそれぞれ最初の $I_1 + 1$ および最初の $I_2 + 1$ 項を用いて、式(1)に相当するものを構成する。

$$\ln \Pr(Q \geq L) \approx \sum_{i=0}^{I_1} c_i^{(1)} (\ln \rho)^i + L \sum_{i=0}^{I_2} c_i^{(2)} (\ln \rho)^i \quad (16)$$

すなわち、 $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (1, \ln \rho, (\ln \rho)^2, \dots, L, L \ln \rho, L(\ln \rho)^2, \dots)$ 及び $\mathbf{c} = (c_1^{(1)}, c_2^{(1)}, \dots, c_1^{(2)}, c_2^{(2)}, \dots)$ である。またセル損失率は $\Pr(Q \geq L = K + 1)$ であるので、一般に $\Pr(Q \geq L)$ が推定できればその一部としてセル損失率の推定が可能である。以下では、 $I_1 = I_2 = 1$ の場合を考察する。すなわち、

$$\ln \Pr(Q \geq L) = c_0^{(1)} + c_1^{(1)} (\ln \rho) + L c_0^{(2)} + L c_1^{(2)} (\ln \rho). \quad (17)$$

5.2 事前情報に基づく推定

本稿では、事前情報として、(1) 性能を推定しようとしている対象システムはシングルサーバキューで表現できる、(2) キュー内の処理は先着順である、のみが得られているとしよう。トラヒック特性に関する情報等は特に無いとする。その際に、本システムの $\Pr(Q \geq L)$ の推定値として $M/M/1$ キューのそれを用いることは自然である。 $M/M/1$ では $\Pr(Q \geq L) = \rho^L$ であるから、性能推定対象 $\ln \Pr(Q \geq L)$ の事前推定量 $m(\mathbf{x}) = L \ln \rho$ となる。すなわち、係数ベクトルの初期値 $\hat{\mathbf{c}}_0$ は $(0, 0, 0, 1)$ である。

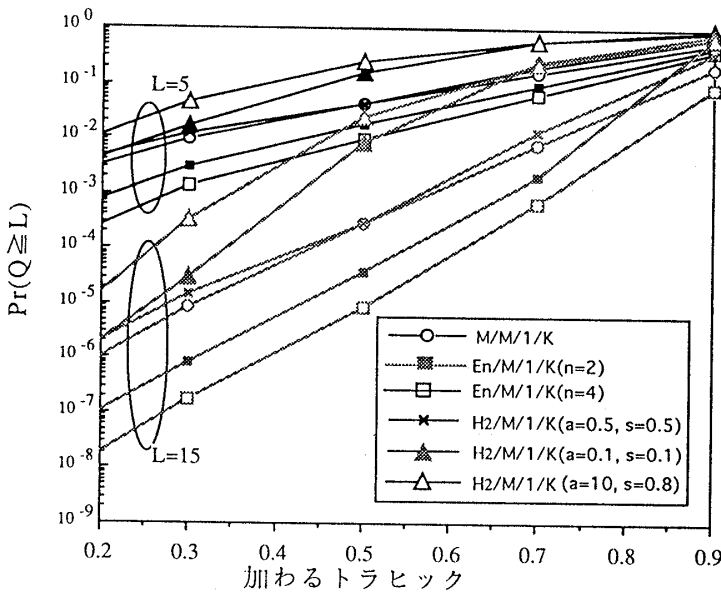
5.3 事前情報による推定の精度

事前情報により性能の推定値の精度は、事前情報の内容や情報の多寡、構成した推定量の適切さ等で異なってくる。この推定値の精度は推定値の初期分散 Ψ_0 として、その後の性能測定による推定値の修正量に影響を与える。すなわち、事前情報による推定精度(推定分散)が、性能測定の測定精度(測定分散)に比し高い(小さい)ならば、性能測定値が性能推定値と異なっても、性能測定値による性能推定値の修正量は小さなものととどまる。その逆であれば、性能測定値により大きく近づく修正がされることとなる。このため、初期分散 Ψ_0 を適切に与える必要があるが、真値が分からないため、実際上は初期分散の決定作業は難しく、経験的、発見的、試行錯誤的方法による。初期分散自体高精度である方が良いのは当然であるが、それを決定するのに過剰に複雑な方法を用いるのは実際的でない。

本稿では、事前情報で得られなかった情報(例えば、トラヒック特性)が性能推定値に及ぼす影響の大きさで、初期推定値の分散の目安とする。具体的には、想定し得る到着過程でバースト的なケースとそうでないケースについて、 $\ln \Pr(Q \geq L)$ を評価して、そのばらつきによって初期推定の分散 Ψ_0 とする。本例では、 $H_2/M/1$ や $E_k/M/1$ に対して $\ln \Pr(Q \geq L)$ を得て(図3)、これから Ψ_0 を得る。より具体的には、 Ψ_0 が対角行列の場合、 $\ln \Pr(Q \geq L)$ の事前推定の分散 $Var_0(\mathbf{x})$ は

$$Var_0(\mathbf{x}) = (\Psi_0)_{11} + (\Psi_0)_{22} (\ln \rho)^2 + (\Psi_0)_{33} L^2 + (\Psi_0)_{44} (L \ln \rho)^2 \quad (18)$$

であることから、4つの $\mathbf{x} = (\ln \rho, L)$ に対する Var_0 の測定値($H_2/M/1$ 等から得たもの)を得て、 $(\Psi_0)_{ii}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) を解くことで Ψ_0 を得る。(非対角行列への拡張は容易である。) 図4に、 $Var_0(\mathbf{x})$ の測定値を示した。 $\rho = 0.4, 0.7$, $L = 5, 15$ に対する Var_0 から、 $\Psi_0 = \text{diag}(0.212, 6.892, 0.027, 0.037)$ となる。



K:バッファサイズ 128,
T:セル到着間隔 H2
 $\Pr\{T>x\} = s \exp(-ax) + (1-s) \exp(-bx)$
パラメータは (ρ, a, s) により決まる.

図 3. $\Pr(Q \geq L)$ V.S. 加わるトラヒック

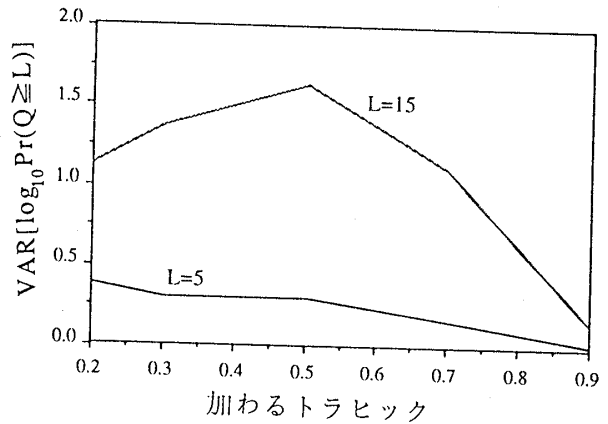


図 4. $\text{Var}[\log_{10}\{\Pr(Q \geq L)\}]$

5.4 測定分散

性能測定の測定分散 V_t の決定法について、述べる。基本的には2つの方法がある。1つは、例えば事前情報に基づいて、構成したモデル(本稿の場合、 $M/M/1$)に対して、 $\ln \Pr(Q \geq L)$ の測定分散をシミュレーション等により求める方法である。もう1つは適応カルマンフィルタ等 [26] の分散推定機構を内部に含んだ推定方法を用いるやり方である。

第1の方法では、 V_t の値が事前情報に基づいて構成したモデルに依存してしまう反面、性能測定データ数が少なくとも V_t は予め与えておくことができるといった利点がある。本稿では第1の方法を用いる。測定間隔はVP容量制御に際し用いられるものと同じにする。測定方法は、セル到着毎にバッファ内セル数が閾値超か否かをチェックし、 10^5 回チェックを行った時点で、その頻度の対数をとって行う。図5に結果を示す。(図中の条件「パターン2」は次節で述べる。) 参考のため事前情報に基づき他のモデルが使われた場合を示した。差は1桁程度である。

5.5 係数ベクトル変動分散

本稿では、導入した関数 f_1, \dots, f_k が表わしきれない要因等を、係数ベクトル c の変動(分散 W_t)を導入することで、精度の向上を図っている。しかしながら、やみくもに分散 W_t を大きくすると、事前情報や性能測定がほとんど反映されない推定値となる。

本稿では、トラヒック特性や処理や規律が完全に分かっている時に、係数ベクトル c がどのような範囲の値をとるか、を評価し、その範囲の大きさと同等の値で分散 W_t の値とする。図6-9に、セル到着過程がポアソンの時とマルコフ変調ポアソン過程(MMPP)の時の係数ベクトルの値を示す。(VP容量は150 Mbps, バッファサイズは128のケースを例示している。) MMPPは2状態で図中は両状態とも100セル転送時間の平均を有する場合を例示した。パターン1とは、状態1での平均到着率が 1.2ρ と 0.8ρ , パターン2とは 1.4ρ と 0.6ρ , パターン3とは 1.6ρ と 0.4ρ である。図6-9の結果から分かるように、係数ベクトル c の絶対値は概ね1桁の数となる。その他の多くの数値例の結果も同様であり、分散 W_t は係数ベクトルの値の範囲であるので、 $W_t = I$ (I は単位行列) とした。

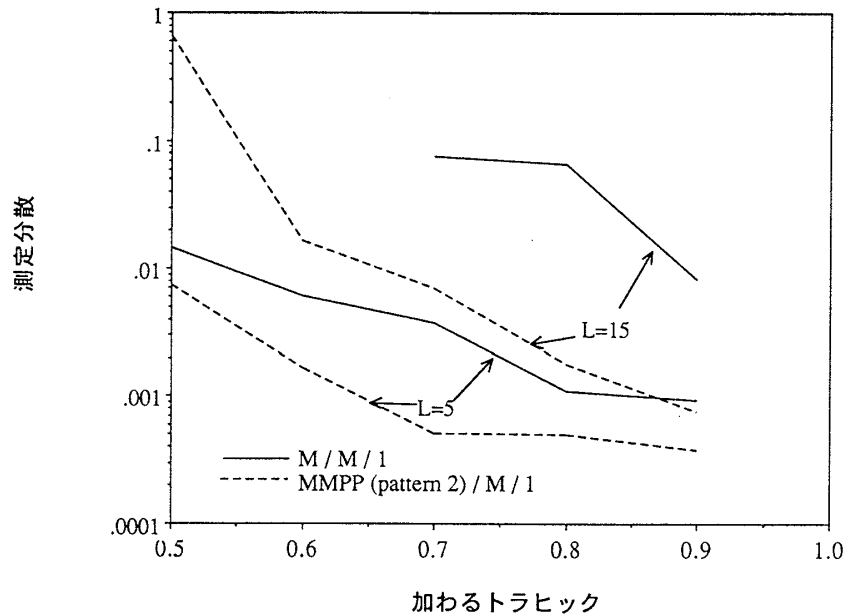


図 5. $\log(\Pr(Q \geq L))$ の測定分散

5.6 VP 容量決定法

前節までの方法によって、係数ベクトル c の推定、すなわち、性能 $a(x)$ の推定の準備が整った。節 5 において簡単に述べたが、性能推定値 $\hat{a}(x)$ に基づき VP 容量を定めることができる。VP 容量制御は時々刻々と得られる性能測定結果に基づき得られるこの VP 容量をシステム上で実現すればよい。また、ここでは比較的短時間で性能測定を行い制御をする例を示すが、長周期の測定、制御（この場合は、VP 容量設計という方が適切な言い回しである）に対しても同じように本手法は適用可能である。以下で、 $CLR_{objective}$ は VP のセル損失率目標値である。さて、セル損失率は、バッファサイズ K のシステムにおいて $\Pr(Q \geq K+1) = e^{a(\ln \rho, K+1)}$ と同じであることに注意する。従って、目標負荷 y^* に対して、

$$\ln(CLR_{objective}) = \hat{a}(\ln(y^*/B_{VP}), K+1) \quad (19)$$

すなわち

$$\ln(CLR_{objective}) = \sum_{i=0}^{I_1+1} \hat{c}_i^{(1)} (\ln(y^*/B_{VP}))^i + (K+1) \sum_{i=0}^{I_2+1} \hat{c}_i^{(2)} (\ln(y^*/B_{VP}))^i \quad (20)$$

となる B_{VP} を求めればよい。今 $I_1 = I_2 = 1$ では、これは陽に書き下せて

$$B_{VP} = y^* \exp \left\{ \frac{-\ln(CLR_{objective}) + \hat{c}_0^{(1)} + \hat{c}_0^{(2)}}{\hat{c}_1^{(1)} + \hat{c}_1^{(2)}(K+1)} \right\} \quad (21)$$

5.7 数値例

前節までで、VP 容量制御は可能となった。実際には測定誤差等の正規分布等の仮定が、性能推定及び最終的には VP 容量制御結果にどのような影響を与えたか、検証するため数値例を示す。また、関数 f_i を決める出発点として、式 (13) の漸近特性を使用したことも結果に影響していると思われる。図 10, 11 に VP 容量制御の結果を示す。VP には 128 のバッファがあり、20 のセル生成源からのセルが加わる。各セル生成源はオン期間とオフ期間を有する。オン期間中では、セルは 10 Mbps で生成され加わる。平均セルレイトは 2 Mbps、オ

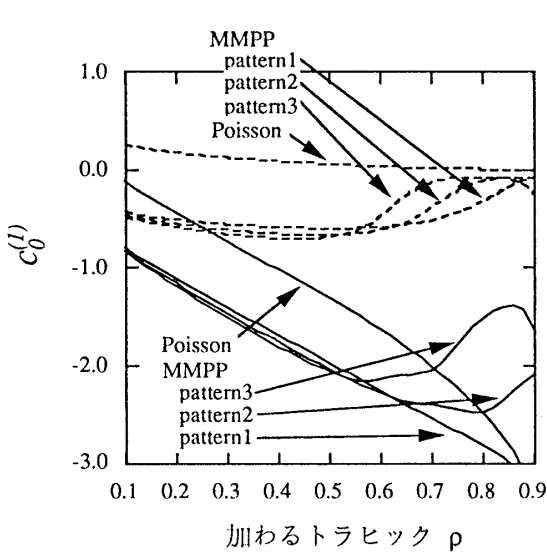


図 6. 係数 $C_0^{(1)}$ の推定

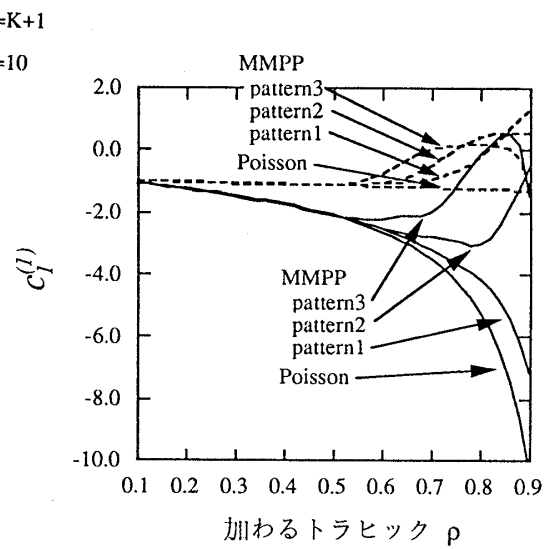


図 7. 係数 $C_1^{(1)}$ の推定

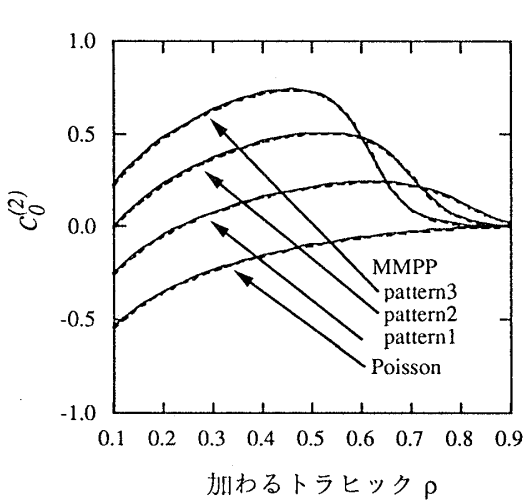


図 8. 係数 $C_0^{(2)}$ の推定

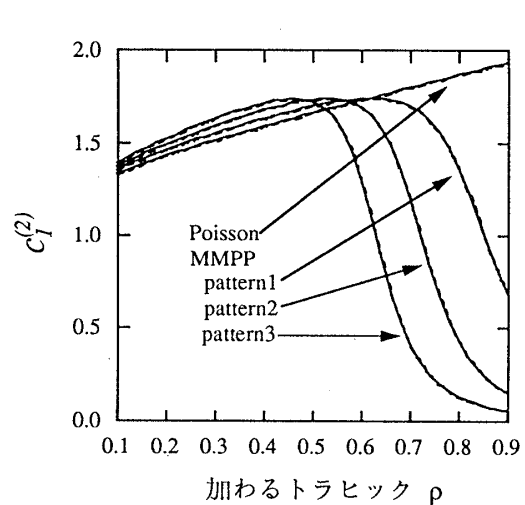


図 9. 係数 $C_1^{(2)}$ の推定

ン期間長とオフ期間長は共に指数分布である。オン期間長が平均 1 msec の場合 (図 10) と平均 5 msec の場合 (図 11) を例示する。本数値例の条件は、各分散等を決める際に用いたものとは異なる。こうしたケースが現実的であり、これらに対応可能かどうか本数値例で例示する。セル損失率目標値は 10^{-8} に設定した。このような極めて小さいセル損失率目標値に対して良好に動作するかどうか本数値例のポイントである。本数値例では、目標負荷として現状の負荷を与える。すなわち、設定された VP 容量のもとで、セル損失率はセル損失率目標値以下である必要がある。(現実には、目標負荷は現状負荷に対して、ある程度大きめにとるが本数値例では比較の容易さからこのような条件とした。) さらに、真の VP 容量を解析的方法により求めた。(実際には、2 状態 MMPP へ一度近似した後、 $MMPP/D/1/K$ を解析的に解くことで求めた。) VP 容量制御によって設定された VP 容量の値がこの値に近い程、正確に容量制御されている、性能推定されている、と言える。(この真の VP 容量は、現実には得られない。本数値例では、制御性能の確認のため、真の VP 容量が得られる、実際にありそうな人工的なセル生成源のモデルを使用している。)

VP 容量の初期値は、事前情報に基づく性能推定モデル ($M/M/1$) から 50 Mbps と決定し

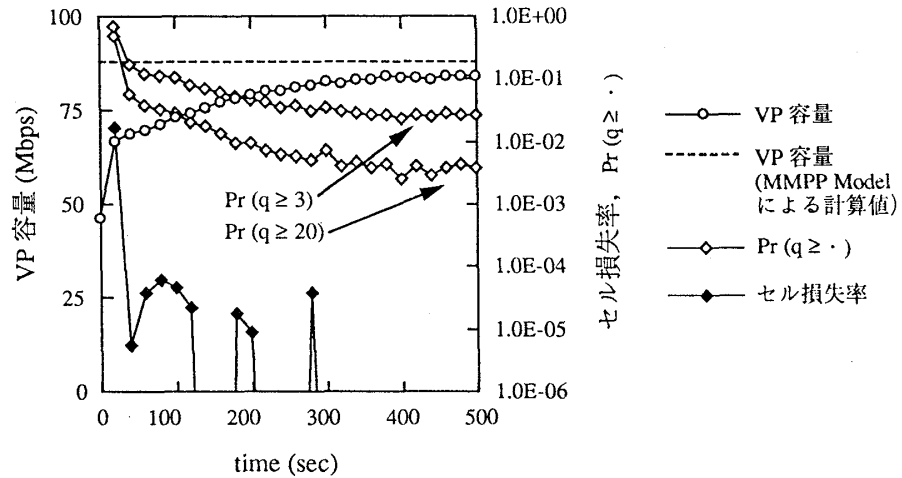


図 10. VP 容量: 平均オン期間長 = 1 msec

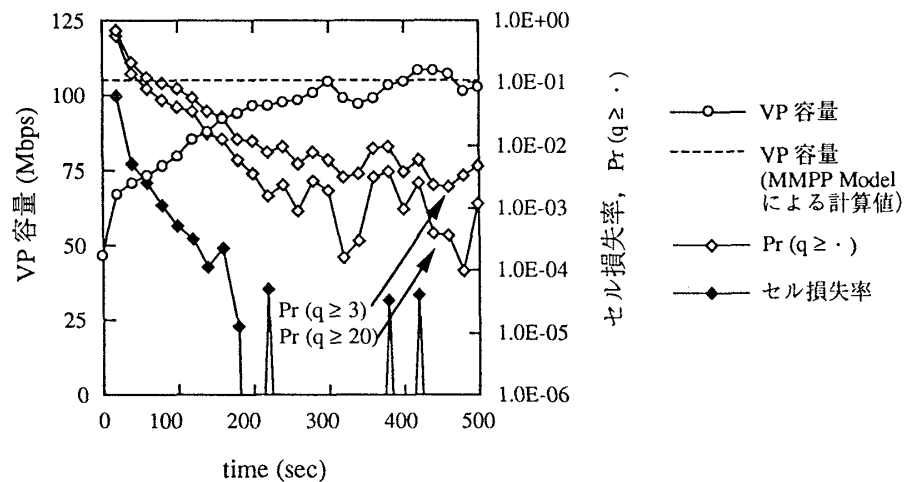


図 11. VP 容量: 平均オン期間長 = 5 msec

た。その後、性能測定結果から、性能推定を行い、容量制御を行った結果、容量制御を行った結果、速やかに目標 VP に収束している。また図中には、測定されたセル損失率やバッファ内セル数が閾値を超える頻度を描いた。これから分かるように、セル損失率測定値は、0 の場合が多く、この測定値のみに基づく制御は困難である。これに対し、閾値を小さめにとることで閾値を超える頻度は、適度な測定を生ずる。その結果、制御結果が安定する。これは、他の制御への応用時にも観測される [15]。

本数値例では、VP 容量制御は 20 秒周期であるとした。制御周期が短い場合、システムには多くの負荷がかかる。例えば式 (17) で与えられる漸近展開等の前提が実際に満足されれば、制御精度は基本的に性能推定精度と同等である。従って、測定周期と係数推定周期が変わらなければ、容量制御周期を拡大しても問題ない。ただし、推定時に生ずる誤差を次周期以降の測定により補正するが、制御周期のみが長くなっている場合は、この補正結果が直ちには、制御結果に反映されないという意味で、制御周期は短い方が有利である。

6. まとめ

本稿では、ベイズ推定による性能推定法を、網の運用時に適した性能推定法として述べ、VP 容量制御に対し具体的適用方法を示した。まず、性能についての情報は、運用以前に得

られる情報と運用後に得られる情報のあること、運用後に得られる情報は性能測定結果とトラヒック情報があることを述べた。こうした情報の形態は、ベイズ推定の枠組みに好適であることを指摘し、実際にベイズ推定によって性能推定を行う方法を、VP 容量制御を例に示した。まず、事前情報をもとに適切な関数 f_1, \dots, f_k を選択する。本例では、漸近特性をもとに関数を選択した。事前情報により、これらの関数に対する係数 c_1, \dots, c_k の初期値を定めた。本例では、 $M/M/1$ に基づき決定したが、対象システムやトラヒック特性についての情報がある場合にはそれらを反映した初期値を設定できる。多くの性能評価に関する研究は、この初期値の精度向上に用いることができる。(実際、性能測定による補正をしない、あるいは初期値の精度が非常に高い、とした性能推定が従来の性能評価研究と言えるかも知れない。) 初期推定量の分散は、事前情報で十分に得られなかったトラヒック特性等を振らせて、その結果生ずる推定量のバラツキの大ききさで定めることとした。測定分散については、事前情報による推定に使用したモデル上でシミュレーションを行うことにより決めることとした。さらに、係数の変動に関する分散は、既知のいくつかのモデルについて係数の値を計算し、その値のとり得る範囲の大ききさから定めた。このようにして定められた手順によって、セル損失率のベイズ推定を行い、目標負荷に対して適切な VP 容量を与えることができることを数値例によって示した。

上述のように、ベイズ推定による性能推定は、他の統計的手法と同様、パラメータやモデルの選定に試行錯誤と多くの経験が必要である。しかしながら、網運用時に有効な方法として、十分使用に耐えるところまできている。さらに、本手法によって、網運用時に別の業務と考えられていた性能監視とトラヒック設計、制御が、相互に情報を利用し、統合化される点でも重要である。今後は、例えば、本稿に記した漸近特性に基づくベイズ性能推定法が、その漸近特性と合致しない自己相似トラヒックに適用した場合、どのように補正されるか等の研究が必要である。

参考文献

- [1] 青木, 青山, 濃沼監修, 広帯域 ISDN と ATM 技術, 電子情報通信学会 (1995).
- [2] ITU-T Recommendation I.371, "Traffic control and congestion control in B-ISDN," Geneva (1992).
- [3] H. Saito, "Teletraffic Technologies in ATM Networks," Artech House, Boston (1994).
- [4] 川島, 町原, 高橋, 斎藤, 通信トラヒック理論の基礎とマルチメディア通信網, 電子情報通信学会 (1995).
- [5] H. Saito, "Bayesian performance estimation driven by performance monitoring and its application," *IEICE Trans.*, E79-B (1), pp. 1-7 (1996).
- [6] J. Filipiak, "Real Time Network Management," North-Holland, New York (1991).
- [7] R. Warfield, S. Chan, A. Konheim and A. Guillaume, "Real-time traffic estimation in ATM networks," *ITC14*, pp. 907-916 (1994).
- [8] D. Thiruvaiyaru and I. V. Basawa, "Empirical Bayes estimation for queueing systems and networks," *Queueing Systems*, 11, pp. 179-202 (1992).
- [9] C. Armero, "Bayesian inference in Markovian queues," *Queueing Systems*, 15, pp. 419-426 (1994).
- [10] C. Armero and M. J. Bayarri, "Bayesian prediction in M/M/1 queues," *Queueing Systems*, 15, pp. 401-417 (1994).
- [11] Z. Dziong, O. Montanuy and L. G. Mason, "Adaptive bandwidth management in ATM networks," *International Journal of Communication Systems*, 7 (4), pp. 295-306 (1994).
- [12] S. Ohta and K. Sato, "Dynamic bandwidth control of the virtual path in an Asynchronous Transfer Mode network", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 40, No. 7, pp. 1239-1247 (1992).
- [13] S. Shioda, "Evaluating the performance of virtual path bandwidth control in ATM

- networks," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E77-B, No. 10, pp. 1175–1187 (1994).
- [14] H. Saito, S. Nakagawa, Y. Kato and S. Ohta, "Innovation of circuit / path operations in ATM networks – self-sizing network –, " *NTT Review* (1996).
- [15] H. Saito, "Adaptive CACs using Bayesian performance estimation," *ICCCN95*, Las Vegas (1995).
- [16] G. E. P. Box and G. C. Tiao, "Bayesian Inference in Statistical Analysis," Addison-Wesley Publishing, Reading (1973).
- [17] H. Saito and K. Shiimoto, "Dynamic call admission control in ATM networks," *IEEE J. Selected Areas in Communications*, 9 (7), pp. 982–989 (1991).
- [18] ITC14, Session D34, "Adaptive Connection Admission Control in ATM Networks," (1994).
- [19] H. Saito, "Hybrid connection admission control in ATM networks," *ICC92*, Chicago (1992).
- [20] ATM Forum User Network Interface Specification Version 3.1 (1994).
- [21] J. Abate, G. L. Choudhury, W. Whitt, "Asymptotic for steady-state tail probabilities in structured Markov queueing models," *Commun. Statist. -Stochastic Models*, 10(1), pp. 99–143 (1994).
- [22] M. Neuts, "The caudal characteristic curve of queues," *Adv. Appl. Prob.*, 18, pp. 221–254 (1986).
- [23] C. Chang, "Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks," *IEEE Trans. Auto. Cont.*, 39 (5), pp. 913–931 (1995).
- [24] A. Baiocchi, "Analysis of the loss probability of the MAP/G/1/K queue, part I: asymptotic theory," *Commun. Statist. -Stochastic Models*, 10(4), pp. 867–893 (1994).
- [25] G. L. Choudhury and W. Whitt, "Heavy-traffic asymptotic expansions for the asymptotic decay rates in the BMAP/G/1 queue," *Commun. Statist. -Stochastic Models*, (1995).
- [26] B. D. O. Anderson and J. B. Moore, "Optimal filtering," Prentice Hall, New Jersey (1979).
- [27] A. Kuczura, "The interrupted Poisson process as an overflow process," *Bell Syst. Tech. J.*, 52, pp. 437–448 (1973).
- [28] CCITT recommendation I.311, "B-ISDN general network aspects," Geneva (1991).
- [29] Y. Liu and P. J. Moylan, "An approach to estimating the traffic of a dynamic packet-switched network," *GLOBECOM'97*, pp. 2242–2246 (1995).

齋藤 洋

〒180 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

NTT マルチメディアネットワーク研究所

e-mail: saito@hashi.tnl.ntt.jp

ABSTRACT

PROPOSAL OF A BAYESIAN PERFORMANCE ESTIMATION METHOD
AND ITS APPLICATION

Hiroshi Saito Shigeo Shioda Yoshinori Kawamura
NTT Multimedia Networks Laboratories

We have developed an adaptive performance estimation method called Bayesian performance estimation. This method combines conventional performance evaluation with Bayesian analysis. It is to be used for estimating the performance of networks under operation. It uses a priori information such as the performance derived by conventional methods. It does not need detailed traffic measurement, which is not usually performed in networks, but uses the data from a performance monitor, which is generally used. After learning the a priori estimate, the estimator updates the performance estimate through Bayesian estimation using the monitored performance.

The proposed Bayesian performance estimation method is applied to VP bandwidth control in ATM networks. We show to apply this method, that is, how to determine the functions and variances in the method. Numerical examples of VP bandwidth control demonstrate the effectiveness of the method.