

AR(1) + IPP モデルによる画像セルトラヒックの近似

正 員 恩田 和幸[†] 正 員 中川 健治^{††}

Approximation of Video Cell Traffic by AR(1) + IPP Model

Kazuyuki ONDA[†] and Kenji NAKAGAWA^{††}, Members

あらまし ATM システムのネットワーク設計, トラヒック制御のためには, パーストセルトラヒックのモデル化が必要である。従来のセルトラヒックモデルとして代表的なものに, MMPP モデル, AR(1) モデル等がある。MMPP モデルは, ポアソン過程に基づくため, 待ち行列理論による性能指標の厳密解析が可能であるが, 反面セルトラヒックの自己相関を直接的に表現できない。また, 厳密解析のためには, 多くの計算を必要とする。一方, AR(1) モデルは, 表現形式が簡単な上, セルトラヒックの自己相関を直接表現できる点においてモデルとしての優位性があるが, セルトラヒックの急変動に十分対応できないという欠点をもつ。そこで, 本論文では, AR(1) モデルの優位性を生かし, そしてセルトラヒックの急変動にも対応可能な AR(1) + IPP モデルを提案する。本論文では, ATM ネットワークにおいて重要な画像セルトラヒックを取り上げ, これに提案モデルを適用し, 近似解析法を用いてセル廃棄率特性の解析を行う。そして, セル廃棄率特性の近似能力および計算時間に関して, 従来モデルとの比較評価を行い, 提案モデルの有効性を明らかにしている。

キーワード MMPP モデル, AR(1) モデル, AR(1) + IPP モデル, セル廃棄率, セル廃棄率の近似解析

1. ま え が き

広帯域統合サービスディジタル通信網(Broadband Integrated Service Digital Network: B-ISDN) を実現する手段として, 非同期転送モード(Asynchronous Transfer Mode: ATM)が注目されている。セルの非同期多重, 大容量光ファイバ通信路の使用, そして簡素化された通信プロトコル等により, ATM は高速, 高効率な情報伝送を実現する。

しかし一方で, 高いパースト性をもつセルトラヒックがセルの廃棄を引き起こし, 伝送品質を劣化させることが予測される。そのため ATM におけるネットワーク設計やトラヒック制御は, セルトラヒックのパースト性を十分考慮して行わなければならない。

パーストセルトラヒックモデルが満たすべき条件として, 次のようなものが挙げられる。

- ・パースト性を十分表現できること
- ・セル廃棄率等の性能指標をよく近似し, その計算が容易であること

現在までにさまざまなパーストセルトラヒックモデルおよびそのモデルを用いたセル廃棄率の解析法が提案されている。

その中でも特に代表的なものは, Heffes ら⁽³⁾ によって研究されたマルコフ変調ポアソン過程 (Markov Modulated Poisson Process) である。MMPP は, ポアソン過程に基づく確率過程であり, 待ち行列理論による性能指標 (セル廃棄率, 遅延時間等) の厳密解析が可能である。文献(3)では, 特に音声セルトラヒックに 2 状態の MMPP モデルを適用し, その有効性を示している。更に文献(6)では, 画像セルトラヒックに対して 4 状態の MMPP モデルを適用し, セル廃棄率特性が解析されている。MMPP モデルは, 代表的なパースト性指標であるセルトラヒックの自己相関を直接的には表現していない。また, 性能指標の厳密解析のためには多くの計算を必要とする。

一方, パーストセルトラヒックの高い自己相関に着目したモデルとして, AR(1) モデルが提案されている⁽⁵⁾。このモデルは, 表現形式が非常に簡単な上, セルトラヒックの自己相関を直接表現できる点においてセルトラヒックモデルとしての優位性がある。しかし, AR(1) モデルは, その性質上, 画像セルトラヒックのシーンチェンジ部分のような到着セル数の急変動には十分対応できないと考えられる。

[†] NTT アドバンステクノロジー株式会社, 武蔵野市
NTT Advanced Technology Corporation, Musashino-shi, 180 Japan

^{††} 長岡技術科学大学工学部, 長岡市
Faculty of Engineering, Nagaoka University of Technology,
Nagaoka-shi, 940-21 Japan

そこで、本論文では、AR(1)モデルに基づく改良モデルAR(1)+IPPモデルを提案する。提案モデルによるセル廃棄率の解析には、筆者が提案する文献(15)の近似解析法を用いる。

本論文では、バーストセルトラヒックとして、高いバースト性を持ち、高い伝送品質が要求されるという点で、ATMネットワークにおいて重要な意味をもつ画像セルトラヒックを取り上げ、これに提案モデルを適用し、セル廃棄率特性の近似能力、計算時間に関して従来のMMPPモデル、AR(1)モデルとの比較評価を行い、提案モデルの有効性を示す。

2.では、画像セルトラヒックについて記述する。3.では、本論文で取り上げる従来のセルトラヒックモデルについて記述する。4.では、本論文で提案するAR(1)+IPPモデルについて記述する。5.では、具体的な数値例を示す。

2. 画像セルトラヒック

画像情報の符号化方式として、フレーム単位(1/30[s])での差分符号化が用いられる場合、画面切換え(シーンチェンジ)に際して膨大な情報が発生する⁽⁶⁾。そのため、単一画像端末からの情報量の時間推移は、情報量が緩やかに推移する通常部分と、急激に変化するシーンチェンジ部分とからなる。本論文では、通常部分とシーンチェンジ部分の各々のセルトラヒックを文献(13)に従って表現する。以下で各セルトラヒックにつきその要点を記述する。

2.1 通常部分のセルトラヒック

到着セル数のとり得る範囲をパラメータAに基づき、有限個(N+1個)のレベル(0, A, ..., NA)に分解する。そして、各レベルを一つの状態とし、1フレームを時間単位として、パラメータα, βに従って状態間を確率的に推移するマルコフ過程 $Q_N(\alpha, \beta)$ によって通常部分を表現する⁽⁶⁾(図1)。

$Q_N(\alpha, \beta)$ 過程の無限小生成行列は次式で表される。

$$Q_N(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} -N\alpha & N\alpha & & & 0 \\ \beta & -(N-1)\alpha - \beta & (N-1)\alpha & & \\ & 2\beta & -(N-1)\alpha - 2\beta & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & N\beta - N\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 シーンチェンジ部分のセルトラヒック

シーンチェンジ部分のセルトラヒックは、継続期間

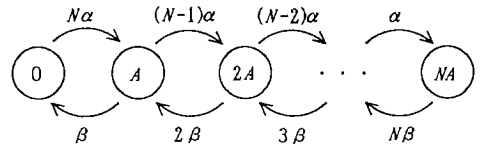


図1 $Q_N(\alpha, \beta)$ 過程の状態推移
Fig.1 $Q_N(\alpha, \beta)$ process.

が極めて短く、セルが極めて高い到着率に従ってポアソン到着する状態と、セルが全く到着しない状態を確率的に推移する断続化ポアソン過程(Interrupted Poisson Process: IPP)によって表現する⁽⁶⁾。

2.3 n画像端末からのセルトラヒック

単一画像端末からのセルトラヒックを $Q_N(\alpha, \beta)$ +IPPによって表し、これをn本独立多重することで、n画像端末からのセルトラヒックを表現する。本論文では、以降n画像端末からのセルトラヒックの独立多重を $\{Q_N(\alpha, \beta)+IPP\}(n)$ と表し、これを画像セルトラヒックと呼び、この画像セルトラヒックの時間区間 $[t-1, t)$ の到着セル数を $X(t)$ によって表す。画像セルトラヒック $\{Q_N(\alpha, \beta)+IPP\}(n)$ は、性能指標の解析上取扱いが困難である。そこで、これを他の何らかのモデルによって近似し、性能指標の解析を行うことを考える。

3. 従来のセルトラヒックモデル

この章では、本論文で着目する従来のセルトラヒックモデルに関して、その要点を述べる。

3.1 MMPPモデル

MMPP(Markov Modulated Poisson Process)は、到着率の異なるポアソン過程を各状態とし、それらの状態間をマルコフ的に推移する確率過程である。このモデルは、セル到着レベルでは独立到着とみなし、状態間のマルコフの推移によって、間接的にセルトラヒックの自己相関を表現する。

3.1.1 画像セルトラヒックへの適用

本論文では、文献(13)に従い、画像セルトラヒックを4状態MMPPモデルによって近似する。すなわち、n画像端末からのセルトラヒックの通常部分を2状態MMPPモデルによって近似し、シーンチェンジ部分を2状態MMPPモデルの特別な場合であるIPPモデルによって近似し、これら二つの2状態MMPPモデルを独立多重したもものとして、画像セルトラヒックを4状態MMPPモデルで表す。

通常部分の2状態MMPPモデルによる近似は、文

献(3)の方法に従う。すなわち、到着セル数にかかわる以下の四つのモーメント値が一致するように2状態 MMPP モデルの四つのパラメータを決定する。

- 平均到着セル数
- 時間区間 $[0, T_1]$ の分散対平均比
- 時間区間 $[0, \infty)$ の分散対平均比
- 時間区間 $[0, T_2]$ の3次モーメント

なお、 T_1 と T_2 は、通常部分と2状態 MMPP モデルの分散対平均比の時間特性が広い時間範囲において一致するように設定する。

シーンチェンジ部分は、 n 端末のうちいずれか一つがシーンチェンジ状態にあると仮定して⁽⁶⁾、1 端末の平均シーンチェンジ発生間隔の $1/n$ 倍の平均発生間隔をもつ IPP モデルによって近似する。

3.1.2 セル廃棄率の解析

MMPP モデルを位相マルコフ再生過程 (PHase type Markov Renewal Process: PH-MRP) によって表現し、行列解析法を用いてセル廃棄率を求める^{(7),(13)}。

3.2 AR(1)モデル

AR(1)モデルは、到着セル数を式(2)のように表す⁽⁵⁾。

$$x(t) = y(t) + \rho \quad (2)$$

$$y(t) = ay(t-1) + e(t) \quad (3)$$

但し、

$x(t)$: 時間区間 $[t-1, t]$ における到着セル数

$y(t)$: AR(1)に従う到着セル数の時系列

ρ : 平均到着セル数

a : AR係数, $|a| < 1$

$e(t)$: 平均値0, 分散 σ^2 の独立正規分布系列

3.2.1 画像セルトラヒックへの適用

画像セルトラヒックに対して、上記 AR(1)モデルを適用する。このとき、式(3)の a および $e(t)$ の分散 σ^2 は、Yule-Walker 方程式により、以下のように求めることができる。

$$a = \frac{R_x(1) - \rho_x}{R_x(0) - \rho_x} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{(R_x(0) + R_x(1) + 2\rho_x)(R_x(0) - R_x(1))}{R_x(0) - \rho_x^2} \quad (5)$$

但し、 $R_x(i) = E[X(t)X(t+i)]$

$X(t)$: 画像セルトラヒックの時間区間 $[t-1, t)$ の到着セル数

ρ_x : 画像セルトラヒックの平均到着セル数

3.2.2 セル廃棄率の解析

AR(1)モデルでは、セル廃棄率の厳密解析が困難である。そこで本論文では、文献(15)で筆者が提案している近似解析法を AR(1)モデルに適用し、セル廃棄率の近似値を求める。

AR(1) / D / 1(q)におけるセル廃棄率は、AR(1) / D / 1(∞)におけるキュー長 Q が q を超える確率 $\Pr[Q > q]$ によって安全側で近似される。その近似は、バッファサイズが大きいほど、よりシャープなものとなる。ここで、その $\Pr[Q > q]$ について次の不等式が成り立つ。

$$\Pr[Q > q] \leq \sum_{t=1}^{\infty} e^{-\frac{(q+t-\sigma t)^2}{2\sigma^2 t}} \quad (6)$$

但し、

$$\sigma^2 = \frac{\rho^2}{(1-a)^2(1-a^2)}((1-a^2)t - 2a(1-a^t))$$

$$a_t: a_t \geq 1 \text{ の任意実数} \quad (7)$$

式(6)より求めた上界値に適切な補正を加えることで、AR(1) / D / 1(q)のセル廃棄率の近似値を求める⁽¹⁵⁾。

4. AR(1) + IPP モデルの提案

AR(1)モデルは、表現形式が簡単なこと、そしてセルトラヒックの自己相関を直接表現できる点においてバーストセルトラヒックモデルとしての優位性がある。

しかし、到着セル数を直前の到着セル数に依存して決定する AR(1)モデルでは、到着セル数の急激な変動を十分にとらえきれないのではないかと考えられる。そこで、AR(1)モデルの優位性を生かしつつ、到着セル数の急変動にも対応可能な AR(1) + IPP モデルを、本論文において提案する。

我々は、以下に挙げる二つの理由により、提案モデルの意義を主張する。

(1) 我々が行ったシミュレーション結果から、シーンチェンジ部分の性質は、セルトラヒックの自己相関関数には、大きな影響を与えないことがわかっている⁽¹⁷⁾。そのため、AR(1)モデルによって、セルトラヒックの自己相関関数が極めてよく表現されていても、必ずしも画像セルトラヒックの性質が AR(1)モデルに十分反映されているとは言えない。

(2) 3.1で示した4状態 MMPP モデル (2状態 MMPP + IPP) も提案モデルと同様に、シーンチェンジ部分を独立に扱うことにより、近似能力の改善を試

みたモデルである。しかし、我々の研究の結果、シーンチェンジ部分を独立に扱わない2状態MMPPモデルの場合と比較して、4状態MMPPモデルの近似能力は、あまり改善されないという結論を得ている⁽¹⁷⁾。このことから、シーンチェンジ部分を独立に扱うことにより、必ずしもモデル全体の近似能力の改善がはかれるとは言えず、それは、基本とするモデルの性質にかなり依存すると考えられる。

AR(1)+IPPモデルでは、到着セル数を式(8)のように表す。

$$x(t) = y(t) + w(t) + \rho \quad (8)$$

$$y(t) = ay(t-1) + e(t) \quad (9)$$

但し、

$x(t)$: 時間区間 $[t-1, t)$ における到着セル数

$y(t)$: AR(1)に従う到着セル数の時系列

$w(t)$: IPPに従う到着セル数

ρ : 平均到着セル数

a : AR係数, $|a| < 1$

$e(t)$: 平均値0, 分散 σ^2 の独立正規分布系列

提案モデルは、少ないパラメータ数で、セルトラヒックの自己相関を直接表現でき、更に到着セル数の急変動にも対応できるという点において、バーストセルトラヒックモデルとして、従来モデルよりも高い有効性をもつことが期待される。

4.1 画像セルトラヒックへの適用

画像セルトラヒックを通常状態部分とシーンチェンジ部分とに分け、各部分は独立であるとみなす。本論文では、情報量の時間推移から、通常部分とシーンチェンジ部分は区別できるという前提のもとで以下議論を進める。

このとき、画像セルトラヒックの時間区間 $[t-1, t)$ の到着セル数 $X(t)$ は、次式のように表すことができる。

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) \quad (10)$$

但し、

$X_1(t)$: 通常部分による到着セル数

$X_2(t)$: シーンチェンジ部分による到着セル数

通常状態部分 $X_1(t)$ は、AR(1)モデルによって近似する。このとき、式(9)の a および $e(t)$ の分散 σ^2 は、以下のように求めることができる。

$$a = \frac{R_{X_1(1)} - \rho_{X_1}}{R_{X_1(0)} - \rho_{X_1}} \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \frac{(R_{X_1(0)} + R_{X_1(1)} + 2\rho_{X_1})(R_{X_1(0)} - R_{X_1(1)})}{R_{X_1(0)} - \rho_{X_1}^2} \quad (12)$$

但し、 $R_{X_1(i)} = E[X_1(t)X_1(t+i)]$

ρ_{X_1} : 通常部分の平均到着セル数

シーンチェンジ部分 $X_2(t)$ は、IPPモデルによって表す。IPPモデルは、シーンチェンジ状態のセル到着率 λ 、平均継続期間 r_1^{-1} および平均シーン間隔 r_2^{-1} の三つのパラメータで記述される。本論文では、これらのパラメータは、画像情報量の時間推移の実測から得るものとする。

4.2 セル廃棄率の解析

AR(1)+IPPモデルに、近似解析法⁽¹⁵⁾を適用し、セル廃棄率の近似値を求める。式(8)について、時間区間 $[0, t)$ の到着セル数を $N_{AR+IPP}(t)$ とすると、 $N_{AR+IPP}(t)$ は次式のようになる。

$$N_{AR+IPP}(t) = \sum_{\tau=1}^t x(\tau) = N_{AR}(t) + N_{IPP}(t) \quad (13)$$

但し、

$$N_{AR}(t) = \sum_{\tau=1}^t (y(\tau) + \rho) \quad (14)$$

$$N_{IPP}(t) = \sum_{\tau=1}^t w(\tau) \quad (15)$$

$N_{AR}(t)$ と $N_{IPP}(t)$ は独立であるから、 $N_{AR+IPP}(t)$ の確率母関数 $\Psi_{AR+IPP}(z, t)$ は、 $N_{AR}(t)$ の確率母関数 $\Psi_{AR}(z, t)$ と $N_{IPP}(t)$ の確率母関数 $\Psi_{IPP}(z, t)$ の積になる；

$$\Psi_{AR+IPP}(z, t) = \Psi_{AR}(z, t) \times \Psi_{IPP}(z, t) \quad (16)$$

ここで、 $\Psi_{AR}(z, t)$ は次式のように計算される⁽¹⁵⁾。

$$\Psi_{AR}(z, t) = \exp\left(\rho \log z + \frac{\sigma^2(\log z)^2}{2}\right) \quad (17)$$

但し、

$$\sigma^2 = \frac{\sigma^2}{(1-a)^2(1-a^2)}((1-a^2)t - 2a(1-a^t)) \quad (18)$$

また、 $\Psi_{IPP}(z, t)$ は次式のように表される⁽⁸⁾。

$$\Psi_{IPP}(z, t) = \Pi \exp\left((R + (z-1)\Lambda)t\right) e \quad (19)$$

但し、

$$\Pi = \frac{1}{r_1 + r^2} \begin{bmatrix} r_2 & r_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$e = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$R = \begin{bmatrix} -r_1 & r_1 \\ r_2 & -r_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$A = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

AR(1)+IPP/D/1(q)におけるセル廃棄率を, AR(1)+IPP/D/1(∞)におけるキュー長 Q が q を超える確率 Pr[Q>q] によって近似する. ここで, この Pr[Q>q] について次の不等式が式り立つ⁽¹⁵⁾.

$$\begin{aligned} \Pr[Q>q] &\leq \sum_{t=1}^{\infty} a_t^{-(t+q)} \Psi_{AR+IPP}(a_t, t) \\ &= \sum_{t=1}^{\infty} a_t^{-(t+q)} \Psi_{AR}(a_t, t) \Psi_{IPP}(a_t, t) \end{aligned} \quad (24)$$

但し,

a_t : $a_t \geq 1$ の任意実数

式(24)の右辺は, $\min_{a \geq 1} a^{-(t+q)} \Psi_{AR+IPP}(a, t)$ を満たす a_t を選ぶことにより, 最もシャープな上界となる. 最終的に式(24)より求めた上界値に文献(15)6節の補正を加えることで, AR(1)+IPP/D/1(q)のセル廃棄率の近似値を求める.

5. 数値例

提案モデルを画像セルトラヒックに適用した数値例を示す. 提案モデルの比較対象として, 4状態MMPPモデルおよびAR(1)モデルの数値例を併せて示す.

本論文で用いた画像セルトラヒックのパラメータを, 表1および表2に示す. システムの条件は, バッファサイズ20, 出力回線速度150[Mbit/s]としている.

5.1 セル廃棄率特性

入力回線多重数に対するセル廃棄率特性の近似能力に関して, 各セルトラヒックモデルの比較評価を行う.

図2は, 画像セルトラヒックおよびその近似モデルのセル廃棄率特性を示している. また, 図3は, バッファサイズ∞のシステムにおけるキュー長 Q が20を超える確率 Pr[Q>20] の特性を示している. 図3の特性は, 図2の特性を安全側で近似する. 各図において, 実線により示される特性は, 画像セルトラヒックのシミュレーションより得た結果である. 本論文では, このシミュレーションより得られた特性を画像セルトラヒックの実特性として考え, 各近似モデルの特性評価の基準とする. 黒色の点によって示される特性は, 上記の画像セルトラヒックの近似モデルの解析結果であり, 白色の点によって示される特性は, 同じく近似モデルのシミュレーション結果である. また, 図中のプロットの説明は, セルトラヒック(モデル)名, 特性の計算法の順に略名により示している. 例えば,

表1 画像セルトラヒックパラメータ (通常部分)

情報転送速度の平均	4.5×10^5 [bits/frame]
情報転送速度の分散	2.1×10^{10} [bits/frame] ²
自己相関関数	$e^{-u\tau}$; $u=0.06$ [1/frame] 1[frame]=1/30[s]

表2 画像セルトラヒックパラメータ (シーンチェンジ部分)

平均発生間隔	340 [frame]
平均継続期間	1 [frame]
情報転送速度	1.1×10^6 [bits/frame]

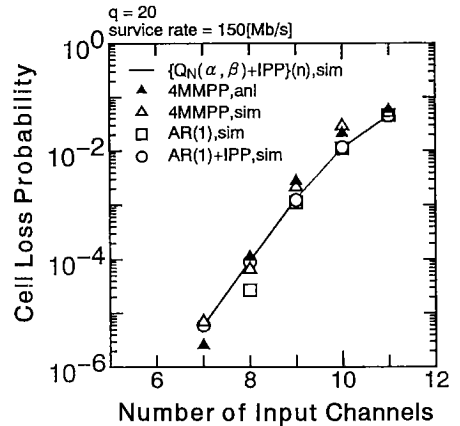


図2 入力回線多重数とセル廃棄率
Fig. 2 Cell loss probability vs. number of input channels.

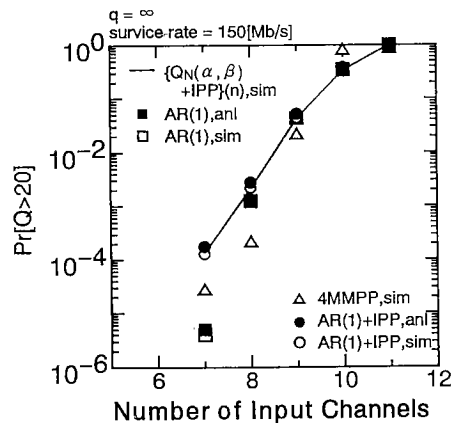


図3 入力回線多重数と Pr[Q>20]
Fig. 3 Cell loss probability vs. number of input channels.

“4MMPP, anl”は、4状態MMPPモデルの解析結果、“AR(1)+IPP, sim”は、AR(1)+IPPモデルのシミュレーション結果を意味する。

図2および図3から、次のことが言える。

4状態MMPPモデルの特性は、画像セルトラヒックの特性とのずれが認められる。これは、MMPPモデルにおけるモーメントに着目した近似方法では、到着セル数の分散対平均比の時間特性の近似に限界があるため、画像セルトラヒックが、4状態MMPPモデルによって十分表現されていないためだと考えられる。

一方、AR(1)モデルの特性は、画像セルトラヒックの特性からの危険側へかなりずれている。これは、到着セル数が急激に変動するシーンチェンジ部分の性質が、セルトラヒックの自己相関関数によって十分表現できないため、AR(1)モデルにその性質が反映されなかったためだと考えられる。

そして、本論文で提案するAR(1)+IPPモデルの特性は、従来のセルトラヒックモデルと同等以上に画像セルトラヒックの特性をよく近似していることがわかる。その特性の傾向から、画像セルトラヒックに要求されるセル廃棄率の許容レベル(10^{-9} ~ 10^{-11} 以下)においても、提案モデルが有効であることが期待される。

5.2 計算時間の比較

図4は、図3で示した各特性、すなわち入力回線多重数7から11の範囲の5ポイントの $\Pr[Q>20]$ 特性を得るための計算時間を比較したものである。参考として4状態MMPPにおけるセル廃棄率解析に要した計算時間(4MMPP, anl)も示している。なお、計算には、ワークステーションHP Model 715/33を用いている。

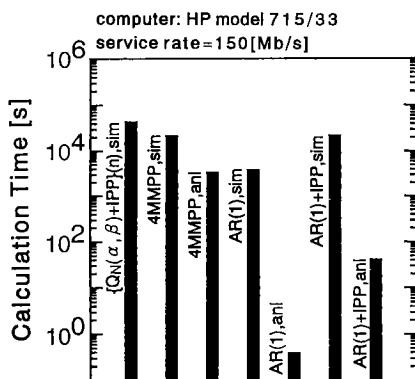


図4 計算時間の比較
Fig. 4 Calculation time.

図4から、AR(1)+IPPモデルに近似解析法を適用した場合、数十秒で計算が終了することがわかる。4状態MMPPモデルに適用した行列解析法は、バッファサイズに依存して計算量が增大するのに対し、近似解析法は、その依存性がほとんどない点において実用上のメリットがある。

6. むすび

本論文では、バーストセルトラヒックモデルとして、AR(1)+IPPモデルを提案し、これをATMネットワークにおいて重要な画像セルトラヒックに適用し、セル廃棄率特性の近似能力および計算時間に関して、従来の4状態MMPPモデル、AR(1)モデルとの比較評価を行った。

本論文で提案するAR(1)+IPPモデルは、少ないパラメータ数で、セルトラヒックの自己相関を直接表現でき、更に到着セル数の急変動にも対応できるという点に長所がある。具体的には、画像セルトラヒックのセル廃棄率特性の近似能力に関して、4状態MMPPモデル、AR(1)モデルとの比較を行い、提案モデルの有効性を確認した。

提案モデルに適用した近似解析法⁽¹⁵⁾は、短時間でのセル廃棄率の近似特性の計算が可能である点において、実用上のメリットが大きい。また、それにより得られる近似特性は、数百のオーダのバッファサイズが設定される現実のATMシステムにおいて、シャープにセル廃棄率特性を近似することが期待される。

更なる研究課題として、さまざまな種類の端末からのセルが重畳したトラヒックに対する提案モデルの有効性の検討が挙げられる。

文 献

- (1) Neuts M.: "A Versatile Markovian Point Process", J. Appl. Prob., 16, pp. 764-779 (1979).
- (2) Sriram K. and Whitt W.: "Characterizing Superposition Arrival Processes and The Performance of Multiplexers for Voice and Data", IEEE J. Select. Areas Commun., this issue, pp. 833-846 (1985).
- (3) Heffes H. and Lucantoni D.: "A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance", IEEE J. Sel. Areas Commun., SAC-4, 6, pp. 855-868 (1986).
- (4) Maglaris B.: "Performance Analysis of Statistical Multiplexing for Packet Video Sources", Proc. IEEE Globecom'87, pp. 1890-1899 (1987).
- (5) Nomura M. and Fujii T.: "Basic Characteristics of Variable Rate Video Coding in ATM Environment",

- IEEE J. Sel. Areas Commun., 7, 5, pp. 752-760 (1989).
- (6) 山田博司：“画像パケットの到着過程モデルとその統計多重化特性”，信学技報，IN89-72 (1989).
- (7) 山田博司，町原文明：“位相マルコフ再生入力待ち行列モデルの解析と応用”，信学論(B-I)，J73-B-I, 3, pp. 170-178 (1990-03).
- (8) Okuda T., Akimara H. and Sakai M.: “A Simplified Performance Evaluation for Packetized Voice System”, IEICE Trans., E73, 6 (1990).
- (9) 牛 志升，秋丸春夫：“選択的パケット廃棄制御を用いた音声パケット多重化装置の性能評価”，信学論(B-I)，J74-B-I, 4, pp. 267-274 (1991-04).
- (10) 尾家祐二，村田正幸，宮原秀夫：“B-ISDN 用 ATM 交換機のアーキテクチャ”，情報物理，33, 2, pp. 134-142 (1992).
- (11) 中川健治：“確定的パラメータで規定された VBR パス/チャンネル多重化特性の解析”，信学技報，CAS 91-150, CS 91-110, DSP 91-77 (1992).
- (12) 斉藤 洋：“ATM 網におけるトラヒック課題の研究状況”，信学誌，75, 5, pp. 496-502 (1992).
- (13) 小峰隆宏，山田博司：“音声・画像混合入力下での ATM 多重化特性の解析”，信学論(B-I)，J75-B-I, 8, pp. 509-516 (1992).
- (14) 恩田和幸，中川健治，荻原春生：“セル廃棄率に関する MMPP モデルと AR モデルの比較”，信学信越支部大，92 (1992).
- (15) 中川健治：“Loss And Wating Time Probability Approximation for General Queueing”，IEICE Trans. Commun., E76-B, 11, pp. 1381-1388 (1993).
- (16) 恩田和幸，中川健治，荻原春生：“AR(1)+IPP モデルによる画像セルトラヒックの近似”，信学'94 春大，B-671.
- (17) 恩田和幸：“ATM パーストセルトラヒックのモデル化法の研究”，長岡技術科学大学修士論文 (1994).

(平成 6 年 3 月 25 日受付，7 月 21 日再受付)



恩田 和幸

平 3 長岡技科大・工・電気電子システム卒，平 5 同大大学院修士課程了。同年 NTT アドバンステクノロジー入社。



中川 健治

昭 55 東工大・理・数学卒。昭 60 同大大学院博士課程満期退学。昭 61 理博。昭 60 NTT 研究所入社。平 4 長岡技術科学大学工学部助教授。統計的情報理論，待ち行列理論などの研究に従事。IEEE，情報理論とその応用学会，日本数学会各会員。