

# マルチメディア通信端末におけるシステムバス転送方式の性能解析法

正 員 阪本 秀樹<sup>†</sup>      正 員 石橋 豊<sup>††</sup>

## Performance Analysis Method for System Bus Architectures in Multimedia Communication Terminals

Hideki SAKAMOTO<sup>†</sup> and Yutaka ISHIBASHI<sup>††</sup>, Members

あらまし 本論文では、マルチメディア通信端末において、システムバスの転送方式に先着順転送方式、優先バス転送方式、バスの分離方式、バスの複数化方式の各転送方式を採用した場合の性能の近似解析法を提案する。提案する解析法は、端末での処理シーケンスをもとに構築した待ち行列網モデルを、まず仮想サーバ等価表現を用いて解析可能な形式に構成し直し、その後QNA (Queueing Network Analyzer)法を適用するものである。本解析法の特徴は、各バス転送方式の差異を仮想サーバパラメータの形で吸収するため、異なったバス転送方式に対して、同じモデルを用いて統一的に性能解析を行うことが可能なことである。数値例を用いて各バス転送方式での端末内のデータパケット平均滞在時間を求めた結果、本解析法での算出値が計算機シミュレーションの結果とよく一致していること、有効なシステムバス転送方式はプロセッサとバスとの速度関係により異なること、等を明らかにしている。

キーワード マルチメディア通信、システムバス、待ち行列網モデル、システム性能解析

### 1. ま え が き

B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network)や FDDI (Fiber Distributed Data Interface)に代表される通信網の広帯域化や、RISC (Reduced Instruction Set Computer)に代表されるプロセッサ処理能力の向上を背景に、センタに蓄積された高精細静止画や高品質サウンドを端末から検索する高速ビデオテックスシステム<sup>(1)</sup>、汎用ワークステーションのマルチウィンドウに会議中の多地点の人物像、音声、文書等を同時に表示・再生する多地点通信会議システム<sup>(2)</sup>のように、多くのマルチメディア通信システムが提案されている。これらのシステムの端末においては、長大なメディア情報とそれを制御するための多数の制御情報とがシステムバス上で混在するため、そのバストラフィックは高く、性能ネックはしばしばシステムバスにあることが指摘されている<sup>(3)</sup>。

システムバスの転送方式には、最も基本的な、1本

のバスを先着順に使用する先着順転送方式に加え、メディア情報に対して制御情報の転送を優先する優先バス転送方式(非割込み、割込み)、転送する情報種別ごとに別のバスを用いるバスの分離方式、複数の対等なバスを用いて負荷を分散するバスの複数化方式があり、マルチメディア通信端末の設計において、これらの各バス転送方式を採用した場合に得られる性能を明らかにすることは重要となる。しかしながらこの種の装置においては、外部からのデータパケットの到着間隔分布や、内部のバスやプロセッサでのサービス時間分布が必ずしも単純な指数分布とはならず<sup>(4)</sup>、また、バス上でメディア情報と制御情報という性質の異なる情報転送が混在する。そのため、その待ち行列網モデル(QNM: Queueing Network Model)においては局所平衡が成立せず、その厳密解を求めることは困難である<sup>(5)</sup>。一般的なQNMの近似解法として提案されているQNA (Queueing Network Analyzer)法<sup>(6)</sup>においても、各サーバでのサービス規律は先着順処理(FCFS: First-Come-First-Serve)規律<sup>(6)</sup>または非割込み優先制御規律<sup>(7)</sup>に限定されており、先に示したすべてのバス転送方式を解析するためには、別の数値的解法等と組み合わせる必要があった。

<sup>†</sup> NTT ヒューマンインタフェース研究所, 武蔵野市

NTT Human Interface Laboratories, Musashino-shi, 180 Japan

<sup>††</sup> 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋

Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466 Japan

本論文では、マルチメディア通信端末において、各バス転送方式を採用した場合の性能を統一的に近似解析する方法を提案する。提案する解析法は、端末での処理シーケンスをもとに構築したQNMに対して、まず仮想サーバによる等価表現<sup>(7)</sup>を用いて、QNM内のすべてのサーバが単一カスタマクラス入力でFCFS規律となるようQNMを再構成し、その後QNA法を適用するものである。本解析法の特徴は、各バス転送方式の差異を仮想サーバパラメータの形で吸収するため、異なったバス転送方式に対して、同じQNMを用いて統一的に性能解析を行うことが可能であり、そのためバス転送方式間の性能比較が容易なことである。また本解析法は、解析対象となるQNMにおけるカスタマのサーバ間遷移状況には依存しないため、異なったデータパケット処理方式を採用する端末に対しても、その処理シーケンスに基づいて必要なQNMを構築し、そのQNMに対して同様の手順で本解析法を適用することが可能である。

以下、まず2.で対象とするマルチメディア通信端末について述べ、3.で提案する性能解析法を示す。最後に4.で数値例をもとに本解析法の有効性を検証し、算出結果について考察を行う。

## 2. マルチメディア通信端末

### 2.1 構成とデータパケット処理方式

マルチメディア通信端末の構成を図1に示す。シス

テムバス(System bus)には、通信ボード(Communication board)、ホストプロセッサボード(Host processor board)、メディアボード(Media board)の3種類のボードが接続されている。このシステムバスの転送方式には表1に示すものが挙げられる。通信回線(Communication line)には、大量のメディア情報を転送するために、低い誤り率で高速伝送が可能な光ファイバが使用されている。通信ボードには、ホストプロセッサの負荷軽減のためにサブプロセッサ(Sub-processor)が搭載されており、そこで通信プロトコル処理の一部を実行する<sup>(8)</sup>。ホストプロセッサボードには、1個または複数個のプロセッサ(Host processor)が搭載されており、残りの通信プロトコル処理およびアプリケーションを実行する。ホストプロセッサボードには、命令フェッチ、ローカル変数参照、タイマ監視等のためにプロセッサのみが使用するリソースをすべて搭載し、システムバスがDMA(Direct Memory Access)転送等で使用中のときにも、プロセッサ処理は継続可能である。メディアボードでは、画像や音声等の各メディア情報の復号再生を行う。

このような構成をとるマルチメディア通信端末における代表的なデータパケット処理方式としては、次の二つが挙げられる。

[処理方式1] ホストプロセッサは、システムバスを介して通信ボード上のデュアルポートメモリに蓄えられたデータを直接アクセスし、その処理を行う。

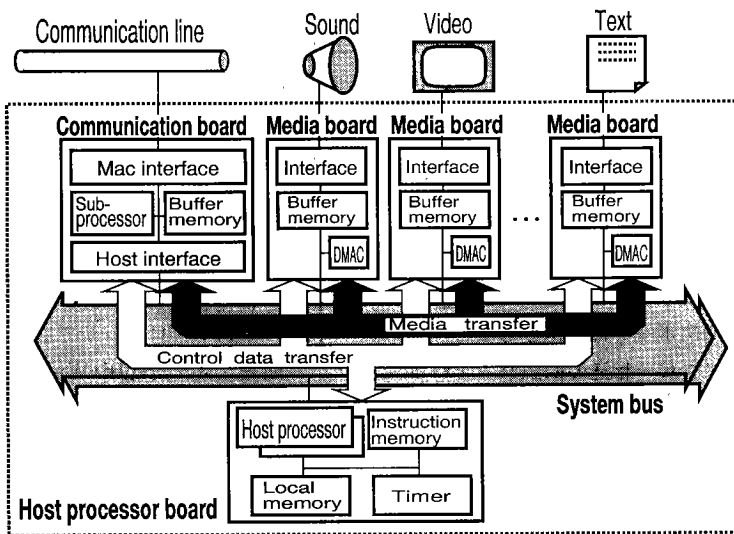


図1 マルチメディア通信端末の一般構成

Fig.1 Typical configuration of a multimedia communication terminal.

表 1 システムバスの各転送方式とその実装

(1) 先着順転送 (1bus-FCFS)	方式	1本のシステムバスを使用し、先着順に転送を行う。
	実装	最も基本的な構成であり、実現は極めて容易である。
(2) 非割り込み 優先バス転送 (Head-of-the-line)	方式	1本のシステムバスを使用し、メディア情報の転送要求と制御情報の転送要求が同時に発生した場合、制御情報に対して優先してバス使用許可を出す。なお、現在実行中の転送については中断することなく、また、同じ種類の情報転送は先着順とする。
	実装	バスアービタが各ボードからのバス要求の優先度を識別する機構と、バスアービタで優先クラス別の待ち行列を作る機構が必要となる。実現は比較的容易である。
(3) 割り込み 優先バス転送 (Preemptive-resume)	方式	1本のシステムバスを使用し、メディア情報の転送中に制御情報の転送要求が発生した場合には、一時的にメディア情報の転送を中断させ、制御情報を優先して転送する。その制御情報の転送終了後、中断点より再びメディア情報の転送を再開する。同じ種類の情報転送は先着順とする。
	実装	非割り込み優先バス転送方式と同等の機構に加え、バスアービタがメディアボードに対して現在転送中のメディア情報転送の「中止」およびその「再開」を指示する機構、命令を受けたメディアボード側でDMA転送を一時中断したり、中断点より転送を再開する機構が必要である。実現は非割り込みの場合より難しい。
(4) バスの分離 (Separate buses)	方式	2本のシステムバスを使用し、一方のバスをメディア情報転送用、もう一方を制御情報転送用と、バスを使用目的に応じて分離する。各バスでの情報転送は先着順とする。
	実装	メディア情報の転送を行うボード(通信ボード、メディアボード)を、2本のバスからアクセスできるように2ポート化することが必要である。実現は比較的容易である。
(5) バスの複数化 (Multiple buses)	方式	対等な複数本のシステムバスを使用し、空いたバスを順次使用していくことにより、全ての種類の情報転送を複数本のバスに均等に分散させる。情報転送は先着順とする。
	実装	全てのボードの複数ポート化とバスアービタにおける空きバス選択機構が必要。実現は、バス本数が多くなるほど難しく、最も容易なバス本数が2本の場合でもバスの分離方式に比べて難しい。

[処理方式2] 通信ボード上のデータを、システムバスを通じていったんホストプロセッサボード上のローカルメモリへコピー転送し、ホストプロセッサはローカルメモリ上でその処理を行う。

処理方式2では処理のほとんどをホストプロセッサで分担することが可能であり、通信ボードには高性能なサブプロセッサや大容量のデュアルポートメモリを搭載する必要がないので経済的である。そのため、現在パソコンやワークステーションではこのデータパケット処理方式を採用しているものが多い。しかし、処理方式2では、通信ボードからホストプロセッサボードへのデータコピー転送時間が非常に大きなオーバーヘッドとなり、それが端末高速化のネックとなることが報告されている<sup>(9),(10)</sup>。この問題を解決するために提案されているのが処理方式1である<sup>(9)</sup>。処理方式1は、フレームエラーチェックのようなすべてのデータを操作する必要のある処理を通信ボードに分担させることを前提に、バス上のデータコピー転送の回数減少をねらったものである。この処理方式1では、データパケットの処理時間の平均値のみでなくその揺らぎも小さくなり、特に動画や音声といったリアルタイム性の強いメディアの通信に適している<sup>(9)</sup>。

本論文では、高速化に適した処理方式1を取り上げ、そのQNMの構築法および構築したQNMの解析法

について示すこととする。但しこの二つの処理方式の差は、一つのデータパケット処理に必要な制御情報およびメディア情報のバス転送回数のみである。従って、処理方式2に対しても同様の方法でQNMの構築が可能であり、その構築したQNMに対して同様の手順で本解析法を適用することが可能である。

## 2.2 処理シーケンス

データパケット処理方式1において、データ受信時の処理シーケンスを以下に示す(図2)。なおこの処理シーケンスは、既に通信プロトコルのコネクションが確立され、定常的なデータ転送フェーズに入っているとす。また、通信路での誤り率は無視できるほど小さく、通信誤りの回復手順は発生しないものとする。

(1) 通信ボードでの処理が終了すると、通信ボードはシステムバスを通じてホストプロセッサに通知する(Arrival notification)。

(2) ホストプロセッサでは、処理を行う通信プロトコル処理タスクを起床(Waking up task)し、起床されたタスクは、処理すべき最初の層の通信プロトコルヘッダをシステムバスを通じて読み取る(Protocol header read(1))。

(3) 以後、ホストプロセッサでの通信プロトコル処理(Protocol processing(1)~(4))と、システムバスを通じたアックノリッジパケット生成(Acknowledge

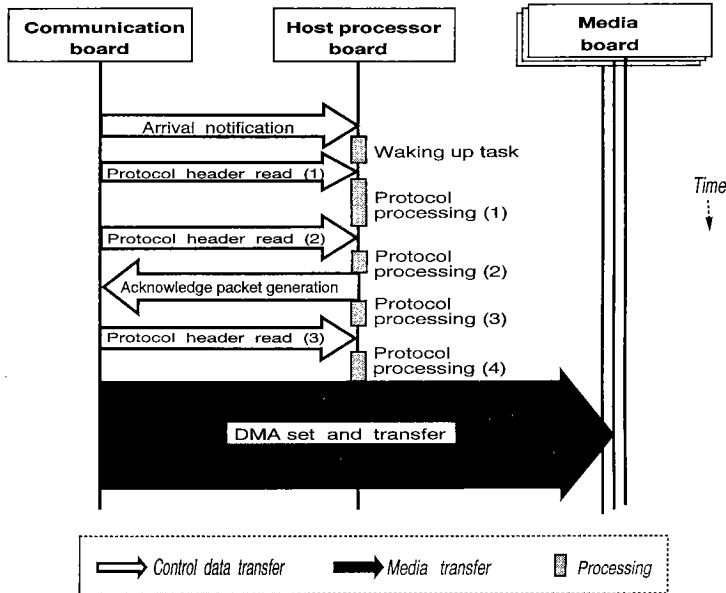


図 2 データ受信時の処理シーケンス  
Fig.2 Processing sequence for data reception.

packet generation)や、より上層の通信プロトコルヘッダの読取り (Protocol header read(2)~(3))のための情報転送とを交互に実行する。

(4) ホストプロセッサですべての処理を終了後、メディアボード上のDMAを設定し、通信ボードからメディアボードへシステムバスを通じてメディア情報をDMA転送する(DMA set and transfer)。

以上のようなデータ受信時には、まずバス上で短い制御情報転送(Control data bus transfer)とホストプロセッサでの処理(Processing)が同じ回数だけ交互に繰り返し実行され、最後にバス上で長大なメディア情報転送(Media bus transfer)が1回実行されることがわかる。データ送信時にはこの逆のシーケンスをとり、最初にメディアボードよりメディア情報のバス転送が実行され、それに続いてホストプロセッサ処理と制御情報バス転送が同じ回数だけ交互に繰り返し実行される。これらのデータ受信・送信処理シーケンスにおける制御情報バス転送およびホストプロセッサ処理の実行回数  $N$  は、ホストプロセッサで処理する通信プロトコル層数やボード間処理手順といったシステム設計により異なる。しかし、一つのシステムについて言えば、その処理内容は毎回ほぼ同様であり、その値  $N$  は一定値に近いと考えられる。

### 3. 性能解析法の提案

#### 3.1 モデル化のための仮定と QNM の構築

マルチメディア通信端末のモデル化にあたり、以下の仮定をおく。

- 各ボード上のバッファメモリ容量は十分大きく、従ってバス転送およびホストプロセッサ処理においてバッファビジーによるブロッキングは発生しない。

- バスのアービトレーション時間、優先バス転送方式における優先制御時間、バスの複数化方式における空きバス選択時間、の各オーバーヘッドは、バスの平均転送時間に比較して十分小さく、また、バスが複数本ある場合の、複数バスからのメモリ同時アクセスにより発生するバス転送速度の低下はないとする。

- ホストプロセッサでの処理の実行順序はすべてFCFS規律とする。また、プロセッサが複数個ある場合、それらはすべて対等な関係(並列サーバ)とし、そのときの空きプロセッサ選択のオーバーヘッドはプロセッサの平均処理時間に比較して十分小さいとする。

更に、実際には単位分布に近いと考えられる、一つのデータパケット処理のための制御情報バス転送およびホストプロセッサ処理の実行回数  $N$  を、平均  $1/q$  回の幾何分布で近似する(近似精度については、後でシミュレーションとの比較により検証する)。この近似によ

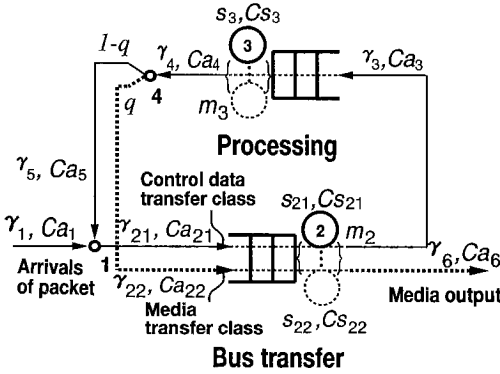


図3 マルチメディア通信端末のQNM

Fig. 3 Queueing network model of a multimedia communication terminal.

表2 各バス転送方式を採用した場合のサーバ2でのサーバ数およびカスタマクラス間処理規律

バス転送方式	サーバ数	カスタマクラス間の処理規律
先着順転送	1	FCFS 規律
非割り込み優先バス転送	1	非割り込み優先制御規律
割り込み優先バス転送	1	割り込み優先制御規律
バスの分離	1	クラスごとに別サーバ
バスの複数化	2以上	FCFS 規律

り、図2のデータ受信時の処理シーケンスを、図3に示すようなQNMにモデル化することができる。

図3のQNMでは、まずデータパケットの到着 (Arrivals of packet)として通信ボードより新たにカスタマが到着すると、そのカスタマは制御情報転送クラス(Control data transfer class)としてバス転送 (Bus transfer)のサーバ2を通過し、更にホストプロセッサ処理(Processing)のサーバ3を通過する。その後、分岐ノード4において、確率 $(1-q)$ で制御情報転送クラスにとどまり、確率 $q$ でメディア情報転送クラス(Media transfer class)に遷移する。制御情報転送クラスに残留した場合、合流ノード1で新たに到着したカスタマと合流し、再びバス転送のサーバ2、ホストプロセッサ処理のサーバ3の通過を繰り返す。一方、メディア情報転送クラスに遷移した場合、その後一度だけバス転送のサーバ2を通過し、メディア情報出力(Media output)として退去する。図3のQNMにおいて、各バス転送方式の差異は、表2に示すようにサーバ2におけるサーバ数( $m_2$ )とカスタマクラス間の処理規律の違いとして表現される。図中 $\gamma_i$ および $C_{ai}$ は、それぞれノード $i$ またはサーバ $i$ ( $i \leq 5$ )への平均

表3 QNMのモデルパラメータ

記号	パラメータの意味	数値例
$\gamma_1$	データパケットの平均到着率	—
$C_{a1}$	データパケットの到着間隔変動係数	1.0
$m_2$	並列システムバス本数	1 ~ 2
$\gamma_{21}$	制御情報転送: 平均到着率	—
$C_{a21}$	制御情報転送: 到着間隔の変動係数	—
$s_{21}$	制御情報転送: 平均転送時間	$s_{22}/200$
$C_{s21}$	制御情報転送: 転送時間の変動係数	1.0
$\gamma_{22}$	メディア情報転送: 平均到着率	—
$C_{a22}$	メディア情報転送: 到着間隔の変動係数	—
$s_{22}$	メディア情報転送: 平均転送時間	—
$C_{s22}$	メディア情報転送: 転送時間の変動係数	0.0
$\gamma_3$	プロセッサ処理: 平均到着率	—
$C_{a3}$	プロセッサ処理: 到着間隔変動係数	—
$s_3$	プロセッサ処理: 平均処理時間	—
$C_{s3}$	プロセッサ処理: 処理時間の変動係数	0.80
$m_3$	プロセッサ処理: 並列プロセッサ個数	1
$q$	カスタマクラス間遷移確率	1/5

到着率および到着間隔の変動係数を意味し、 $\gamma_6$ および $C_{a6}$ は、それぞれ外部への平均退去率および退去間隔の変動係数を意味する。主なモデルパラメータの意味を表3に示す。なお、通信ボード上のサブプロセッサ処理の影響は、すべてのバス転送方式に共通するため図3のモデルからは除外してあるが、入力パラメータ $\gamma_1, C_{a1}$ により表現されている。

データ送信の場合には、処理シーケンスがデータ受信時とは逆となる。すなわち、図3のQNMにおいて外部より到着したカスタマは、まずメディア転送クラスとしてサーバ2を通過し、その後サーバ3を通過し、今度は制御情報クラスとしてサーバ2を通過する。その後外部への退去とサーバ3へとの分岐ノードを設けることにより表現される。また、データ送信と受信が同時に発生する場合には、この二つのQNMを重ね合わせることで必要なQNMが得られる。

一般にマルチメディア通信端末においては、パケットの到着間隔や、システムバス転送時間およびプロセッサ処理時間を、必ずしも単純な指数分布と置くことはできない。このことは、文献(4)で示されている実測結果からも明らかである。また、バスの分離方式以外の各バス転送方式では、システムバス上に制御情報とメディア情報という性質の異なった情報転送が混在することとなる。従って図3に示したような、マルチメディア通信端末での各処理シーケンスをもとに構築したQNMにおいては、外部からの到着分布または内部のサーバでの処理時間分布が一般分布となり、また、内部に複数のカスタマクラスの通過するサーバが存在

することとなる。このような QNM では、局所平衡が成立していないため、その厳密解析は困難であることが知られている<sup>(6)</sup>。そこで、以降は図3に示した QNM を例にとり、マルチメディア通信端末をモデル化した QNM の近似解析法を提案する。

### 3.2 仮想サーバ等価表現を用いた QNM の再構成

図3の QNM では、サーバ2に制御情報転送、メディア情報転送の二つのクラスのカスタマが通過する。平均待ち時間を求めるため、各クラスに対応して、サーバ2と等価な特性をもつ二つの単一カスタマクラス入力で FCFS 規律の仮想的なサーバ 21, 22 を定義する。すなわち、この二つの仮想サーバは、サーバ2と同一の入力条件においては、それぞれサーバ2での各カスタマクラスに対する平均待ち時間と等価な平均待ち時間を与え、かつ、それぞれサーバ2での各カスタマクラスの平均完了時間に等しい平均サービス時間をもつ<sup>(7)</sup>。このときの、仮想サーバ 21, 22 における平均サービス時間  $s_{21}^*$ ,  $s_{22}^*$  と、その変動係数  $C_{s21}^*$ ,  $C_{s22}^*$  (以後これらのパラメータを仮想サーバパラメータと呼ぶ) は、もとのサーバ2のカスタマクラス間の処理規律により異なる。図4は、図3のサーバ2を、この二つの仮想サーバ 21, 22 で置き換えることにより、QNM を再構成したものである。図4の QNM は、すべて単一カスタマクラス入力で FCFS 規律のサーバのみから構成されているため、QNA 法による解析が可能となる<sup>(6)</sup>。

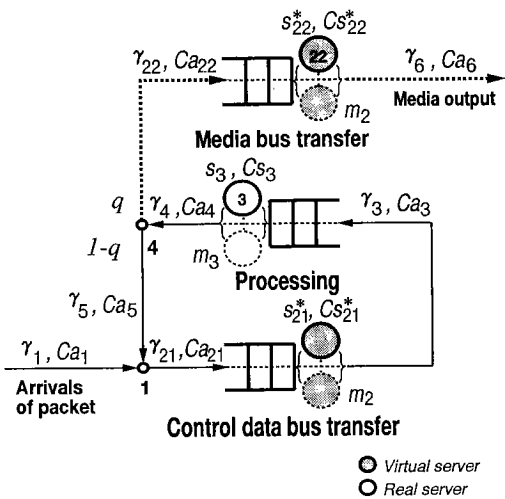


図4 仮想サーバにより等価表現された QNM  
Fig. 4 Equivalent queueing network model with virtual server expressions.

### 3.3 仮想サーバパラメータの導出

図3の QNM においては、サーバ3を通じてのカスタマのフィードバックのため、サーバ2を通過するカスタマ間には相関が内在する。文献(11)では、このような2ノードフィードバック型 QNM に QNA 法を適用する場合について相関に関する数値的な検討がなされており、サーバ2とサーバ3の利用率に大きな差のない領域(領域1)ではカスタマを独立とみなすことができ、両サーバの利用率に極端な差が生じる領域(領域2)においては、利用率の小さい方のサーバを完全な直接フィードバックとみなして補正を行う必要があることが報告されている。通常、マルチメディア通信端末の設計においては、システムバスとプロセッサ処理のどちらか一方を極端なネックに設計する場合は少なく、多くの場合その両者の使用率には大きな差はないと考えられる。従って以降は領域1を想定し、サーバ2を通過する各カスタマを独立とみなして、サーバ2のカスタマクラス間の処理規律ごとに仮想サーバパラメータを求める。

#### 3.3.1 カスタマクラス間が FCFS 規律の場合

先着順転送方式やバスの複数化方式のように、サーバ2のカスタマクラス間の処理規律が FCFS 規律の場合、まず、仮想サーバ 21, 22 における平均待ち時間が、サーバ2における各カスタマクラスに対する平均待ち時間に等しいという条件より、以下の式が成立する。

$$W_{21[M/M/m_2]}^* \frac{C_{a21}^2 + C_{s21}^2}{2} = W_{2[M/M/m_2]} \frac{C_{a2}^2 + C_{s2}^2}{2} \quad (1)$$

$$W_{22[M/M/m_2]}^* \frac{C_{a22}^2 + C_{s22}^2}{2} = W_{2[M/M/m_2]} \frac{C_{a2}^2 + C_{s2}^2}{2} \quad (2)$$

ここで、仮想サーバ 21, 22, サーバ2は、使用率が1に近い、ヘビータラヒック状態を想定した<sup>(6)</sup>。 $W_{2[M/M/m_2]}$ ,  $W_{21[M/M/m_2]}^*$ ,  $W_{22[M/M/m_2]}^*$  はそれぞれサーバ2, 仮想サーバ 21, 22 において、到着間隔分布とサービス時間分布がいずれも指数分布となる場合の平均待ち時間である。また  $C_{a2}$ ,  $C_{s2}$  は、サーバ2で二つのカスタマクラスを合成した全体の到着間隔およびサービス時間の変動係数であり、以下のように与えられる。

$$C_{a2}^2 = \frac{\gamma_{21} C_{a21}^2 + \gamma_{22} C_{a22}^2}{\gamma_{21} + \gamma_{22}} \quad (3)$$

$$C_{s2}^2 = \frac{(\gamma_{21} + \gamma_{22}) \{ \rho_{21} s_{21} (C_{s21}^2 + 1) + \rho_{22} s_{22} (C_{s22}^2 + 1) \}}{(\rho_{21} + \rho_{22})^2} - 1 \quad (4)$$

ここで、 $\rho_i = s_i \gamma_i$  ( $i=2, 21, 22$ ) である。なお、式(3)は近似式である<sup>(6)</sup>。

表 4 各バス転送方式を採用した場合の仮想サーバパラメータ

バス転送方式	$s_{21}^*$	$C_{s_{21}}^{*2}$	$s_{22}^*$	$C_{s_{22}}^{*2}$
(1) 先清順転送 (5) バスの複数化	$s_{21} + \frac{\rho_{22}}{\gamma_{21}}$	$\frac{\gamma_{21}}{\gamma_{21} + \gamma_{22}}(C_{a2}^2 + C_{s2}^2) - C_{a21}^2$	$s_{22} + \frac{\rho_{21}}{\gamma_{22}}$	$\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{21} + \gamma_{22}}(C_{a2}^2 + C_{s2}^2) - C_{a22}^2$
(2) 非割り込み 優先バス転送	$s_{21}$	$C_{s_{21}}^2 + \frac{s_{22}\rho_{22}}{s_{21}\rho_{21}}(1 + C_{s_{22}}^2)$	$\frac{s_{22}}{1 - \rho_{21}}$	$C_{s_{22}}^2 + \frac{\rho_{21}}{s_{22}\rho_{22}}\{s_{21}(C_{a21}^2 + C_{s_{21}}^2) + s_{22}(1 - \rho_{21} - \rho_{22})(C_{a22}^2 - 1)\}$
(3) 割り込み 優先バス転送	$s_{21}$	$C_{s_{21}}^2$	$\frac{s_{22}}{1 - \rho_{21}}$	$C_{s_{22}}^2 + \frac{\rho_{21}}{s_{22}\rho_{22}}\{s_{21}(C_{a21}^2 + C_{s_{21}}^2) + s_{22}(1 - \rho_{21} - \rho_{22})(C_{a22}^2 - 1)\}$
(4) バスの分離	$s_{21}$	$C_{s_{21}}^2$	$s_{22}$	$C_{s_{22}}^2$

平均完了時間は、あるクラスのカスタマのサービスを開始した時点から、次に同じクラスのカスタマのサービスを開始可能となるまでの平均時間である<sup>(12)</sup>。クラス  $x$  とクラス  $y$  の二つのカスタマクラス間の処理が FCFS 規律の場合のクラス  $x$  の平均完了時間は、クラス  $x$  のカスタマの平均サービス時間  $s_x$  と、クラス  $x$  のカスタマの平均到着間隔  $1/\gamma_x$  の間に到着する別のクラス  $y$  のカスタマすべて(平均  $\gamma_y/\gamma_x$  個)についてのその平均サービス時間  $s_y$  の総和とを合わせたものであり、 $s_x + \rho_y/\gamma_x$  となる。仮想サーバ 21, 22 における平均サービス時間が、サーバ 2 における各カスタマクラスの平均完了時間に等しいという条件より、次式が得られる。

$$s_{21}^* = s_{21} + \frac{\rho_{22}}{\gamma_{21}} \quad (5)$$

$$s_{22}^* = s_{22} + \frac{\rho_{21}}{\gamma_{22}} \quad (6)$$

式(1)~(6)を整理して得られた仮想サーバパラメータを表4の(1)と(5)に示す。

### 3.3.2 カスタマクラス間が優先制御規律の場合

次に、バス転送方式が優先バス転送方式であり、サーバ 2 のカスタマクラス間の処理規律が優先制御規律となる場合の仮想サーバパラメータを求める。優先制御規律のうち、非割り込み(Head-of-the-line)の場合については、文献(7)に示されている(表4(2))。割り込み(Preemptive-resume)の場合については、次のように求めることができる。まず、仮想サーバ 21, 22 における平均待ち時間がサーバ 2 における各カスタマクラスに対する平均待ち時間<sup>(13)</sup>に等しいという条件より、以下の式が成立する。

$$\frac{\rho_{21}^* s_{21}^* (C_{a21}^2 + C_{s_{21}}^{*2})}{2(1 - \rho_{21}^*)} = \frac{\rho_{21} s_{21} (C_{a21}^2 + C_{s_{21}}^2)}{2(1 - \rho_{21})} \quad (7)$$

$$\frac{\rho_{22}^* s_{22}^* (C_{a22}^2 + C_{s_{22}}^{*2})}{2(1 - \rho_{22}^*)}$$

$$= \sum_{k=21,22} \frac{\rho_k s_k (C_{ak}^2 + C_{sk}^2)}{2(1 - \rho_{21} - \rho_{22})(1 - \rho_{21})} + \frac{\rho_{21} s_{22} (C_{a22}^2 - 1)}{2(1 - \rho_{21})} \quad (8)$$

ここで、 $\rho_i^* = s_i^* \gamma_i$  ( $i=21, 22$ ) である。FCFS 規律の場合と同様に、各サーバはヘビートラヒック状態を想定した<sup>(6)</sup>。また、仮想サーバ 21, 22 での平均サービス時間は、サーバ 2 における各カスタマクラスの平均完了時間<sup>(12)</sup>に等しいという条件より、次式が得られる。

$$s_{21}^* = s_{21} \quad (9)$$

$$s_{22}^* = \frac{s_{22}}{1 - \rho_{21}} \quad (10)$$

式(7)~(10)を整理して得られた仮想サーバパラメータを表4(3)に示す。

### 3.3.3 カスタマクラスごとに別サーバを使用する場合

バスの分離方式のように、各カスタマクラスごとに別サーバを使用する場合には、サーバ 21, 22 は仮想サーバではなく、実サーバとなる。従って、サーバ 21, 22 における平均サービス時間やその変動係数は、制御情報転送クラスやメディア情報転送クラスがもつ本来の数値に一致する。他のバス転送方式の場合と用語を統一するため、便宜上、これらの数値を仮想サーバパラメータと呼ぶ(表4(4))。

### 3.4 QNA 法の適用

図4のQNMは、以下のようにQNA法を適用することにより解析が可能である。まず、フローバランスより以下の式が得られる。

$$\gamma_{21} = \gamma_3 = \gamma_4 = \frac{1}{q} \gamma_1 \quad (11)$$

$$\gamma_{22} = \gamma_6 = \gamma_1 \quad (12)$$

$$\gamma_5 = \frac{1 - q}{q} \gamma_1 \quad (13)$$

ノード 1 は合流(superposition)、ノード 4 は分流(decomposition)、サーバ 21, 22, 3 は退去(departure)で

あるので、以下の式が成立する。

$$C_{a21}^2 = \frac{\gamma_1}{\gamma_{21}} C_{a1}^2 + \frac{\gamma_5}{\gamma_{21}} C_{a5}^2 \quad (14)$$

$$C_{a5}^2 = (1-q)C_{a4}^2 + q \quad (15)$$

$$C_{a22}^2 = qC_{a4}^2 + 1 - q \quad (16)$$

$$C_{a3}^2 = 1 + (1 - \rho_{21}^{*2})(C_{a21}^{*2} - 1) + \frac{\rho_{21}^{*2}}{\sqrt{m_2}}(\max\{C_{a21}^{*2}, 0.2\} - 1) \quad (17)$$

$$C_{a6}^2 = 1 + (1 - \rho_{22}^{*2})(C_{a22}^2 - 1) + \frac{\rho_{22}^{*2}}{\sqrt{m_2}}(\max\{C_{a22}^2, 0.2\} - 1) \quad (18)$$

$$C_{a4}^2 = 1 + (1 - \rho_3^2)(C_{a3}^2 - 1) + \frac{\rho_3^2}{\sqrt{m_3}}(\max\{C_{a3}^2, 0.2\} - 1) \quad (19)$$

式(17)~(19)の中の仮想サーバパラメータ  $s_{21}^*$ ,  $s_{22}^*$ ,  $C_{s21}^*$ ,  $C_{s22}^*$  に、表4に示した各バス転送方式に応じた値を代入し、式(11)~(19)の連立方程式を解くことにより、 $\gamma_{21}$ ,  $\gamma_{22}$ ,  $\gamma_3$ ,  $C_{a21}$ ,  $C_{a22}$ ,  $C_{a3}$  を求めることができる。そこで仮想サーバ21, 22およびサーバ3において、それぞれ  $GI/G/1$  または  $GI/G/m$  の待ち時間の公式<sup>(6)</sup>を用いることにより、異なったバス転送方式を採用した場合の各サーバにおける平均待ち時間を算出できる。各サーバでの平均通過時間は、ここで得られた平均待ち時間と、各バス転送方式においてそのサーバを通過するカスタマに対して実際にサービスを開始してからそれが終了するまでの平均時間(割込み優先バス転送方式では平均完了時間、その他の方式では平均サービス時間)を加えたものとなる。

## 4. 検証と考察

### 4.1 数値例によるシミュレーションとの比較

表3に示す数値例を用い、データパケット処理方式1のデータ受信時について、本解析法による算出値と計算機シミュレーションの結果との比較を行った。数値例では、ホストプロセッサでネットワーク層以上を処理することを想定し、通常 FDDI 上のデータパケット長は 4 kByte 程度であるのに対し、IP (Internet Protocol) のヘッダ長は 20 Byte 程度である<sup>(14)</sup> ことから、システムバスでの制御情報の平均転送時間は、メディア情報の平均転送時間に対して 1/200 であるとした。また、通信ボードからのデータパケット到着間隔分布とシステムバスでの制御情報の転送時間分布はいずれも指数分布、メディア情報の転送時間分布は単位分布、ホストプロセッサでの処理時間分布は変動係数

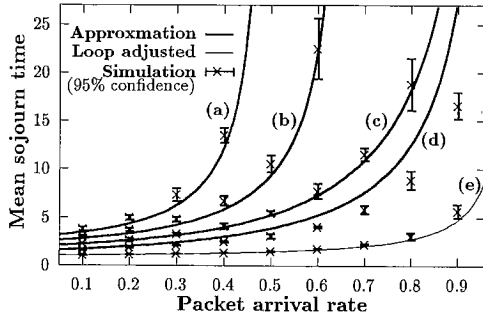
表5 数値例におけるプロセッサとバスの速度の関係

		パケットの各ノードでのサービス時間合計の比	
領域		プロセッサ	バス
プロセッサ ネック ⇕	(a)	200	100
	(b)	150	100
	(c)	100	100
	(d)	50	100
バス・ネック	(e)	1	100

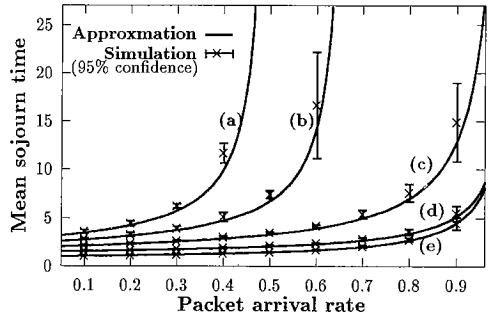
0.8 のアーラン分布とした。一つのデータパケット処理のための制御情報バス転送およびホストプロセッサ処理の実行回数  $N$  は、シミュレーションでは5回に固定した。更に、バス転送とプロセッサ処理との速度関係については、バスの転送速度を固定し、プロセッサの処理能力を変化させて、表5に示す(a)~(e)までの五つの領域を設定した。図5に、(1)先着順転送方式(1 bus-FCFS)、(2)非割込み優先バス転送方式(Head-of-the-line)、(3)割込み優先バス転送方式(Preemptive-resume)、(4)バスの分離方式(Separate buses)、(5)バス本数2のバスの複数化方式(Multiple buses)、の各バス転送方式を採用した場合について、一つのパケットの端末内平均滞在時間(Mean sojourn time)を示す。図5の横軸は通信ボードからのパケット到着率(Packet arrival rate)であり、縦軸は、一つのパケットの平均バス転送時間の合計を1としたときの相対値として、平均滞在時間が示されている。

先着順転送、非割込み優先バス転送およびバスの複数化の三つの方式では、図5に示すように(a)~(c)の領域において本解析法による算出値と計算機シミュレーション結果がよく一致している。しかし、バスの使用率がプロセッサの2倍となる領域(d)では平均滞在時間をやや過大評価する傾向にある。これは、領域(d)ではプロセッサの使用率がバスの使用率に対して相対的に小さくなり、3.3で示した、図3のサーバ2を通過するカスタマを独立とみなせる領域1から、補正が必要となる領域2に近づいたため、サーバ2でのカスタマ間の独立を前提に求めた仮想サーバパラメータの近似精度が低下したことによる。更にバス側の負荷が増し、バスの使用率がプロセッサの100倍に達する領域(e)においては、図3のサーバ2を通過するカスタマの独立性は完全に失われるため、これら三つのバス転送方式に対しては仮想サーバ等価変換による近似解析は不可能となる。従ってこの領域(e)においては

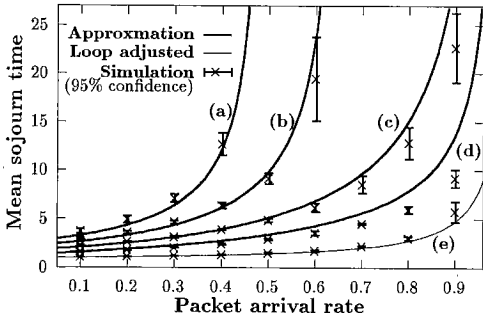




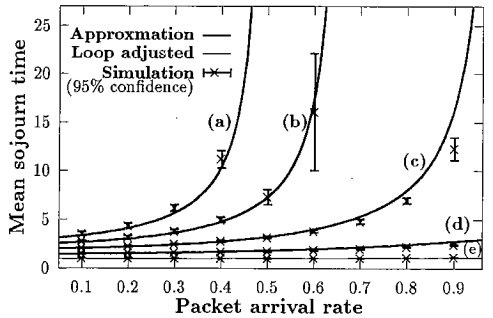
(1) 1bus-FCFS



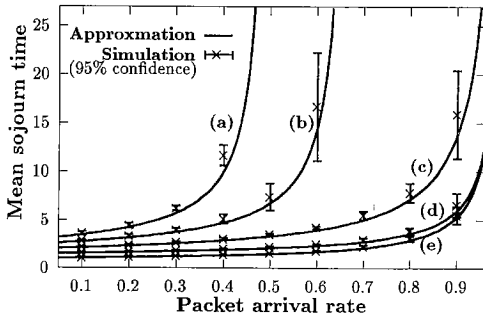
(4) Separate buses



(2) Head-of-the-line



(5) Multiple buses (2buses)



(3) Preemptive-resume

図5 各バス転送方式におけるパケットの平均滞在時間  
Fig. 5 Mean sojourn time for packets with each system bus architecture.

図3の実サーバモデルに戻り、QNA法におけるループ補正(Loop adjusted)<sup>(6)</sup>により解析を進める必要がある。この場合にも解析精度は高い。

一方バスの分離方式については、図4のQNMは実際には仮想サーバでなくすべて実サーバを使ったモデルであることから、図3のカスタムフィードバックに依存する近似精度の低下等はなく、(a)~(d)の全領域において評価精度は高い。また、割込み優先バス転送方式についても同様に(a)~(d)の全領域において評価精度は高い。これは、この数値例のようにメディア情報に対して制御情報が平均1/200と非常に小さい

場合には、その性質はバスの分離方式に近く、仮想サーバパラメータの近似精度低下の影響をあまり受けないためと考えられる。

以上、データパケット処理方式1のデータ受信時についてその解析精度を示したが、筆者らは同様の数値例を用いて、処理方式1のデータ送信時および処理方式2のデータ送受信時に対しても本解析法の適用を試み、これらすべての場合について、ここで示した結果と同等の精度が得られることを確認している。

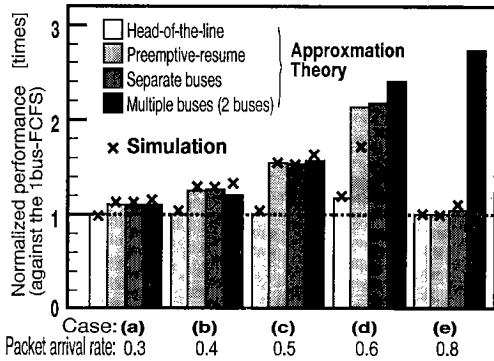


図 6 各バス転送方式の相対性能  
Fig. 6 Relative performance of each bus architecture.

#### 4.2 先着順転送方式に対する各バス転送方式の性能改善度

図 5 の領域 (a)～(e) について、先着順転送方式を採用した場合のバスの平均滞在時間が、純粋なサービス時間の合計の 2～3 倍に達するバスの到着率を求め、その到着率における先着順転送方式に対する他の各バス転送方式の相対性能を図 6 に示す。

プロセッサネックとなっている領域 (a) および領域 (b) では、当然ながらバス転送方式による性能差はほとんど現れない。しかし、バスとプロセッサが同程度の負荷となる領域 (c) では、割込み優先バス転送、バスの分離、バスの複数化の三つの方式が、いずれも 1.5 倍程度の改善を達成する。これは、これら三つの方式は長大なメディア情報の転送中に短い制御情報の転送を可能とするものであり、この領域でのバス転送とプロセッサ処理との同時実行を可能としたためである。しかし、同じ優先バス転送方式でも、非割込みの場合にはほとんど改善効果がないことがわかる。更にバスの負荷が大きくなり、プロセッサの負荷の 2 倍となる領域 (d) では、バスの複数化方式の性能改善度が、割込み優先バス転送やバスの分離方式に比べて若干大きくなる。最後に完全なバスネック状態である領域 (e) では、バスの総転送能力のみが問われるため、バスの複数化方式のみ性能が改善される (約 3 倍)。

#### 5. むすび

本論文では、システムバス転送方式に、先着順転送方式、優先バス転送方式 (非割込み、割込み)、バスの分離方式、バスの複数化方式の各転送方式を採用した場合のマルチメディア通信端末の性能解析法を提案し

た。提案した解析法は、端末での処理シーケンスをもとに構築した QNM に対して、まず仮想サーバによる等価表現を用いて、すべてのサーバが単一クラス入力で FCFS 規律となるよう QNM を再構成し、その後 QNA 法を適用するものである。本解析法の特徴は、各バス転送方式の差異を仮想サーバパラメータの形で吸収するため、異なったバス転送方式を採用した場合の端末性能を、同一の QNM により統一的に解析可能であり、そのため方式間の性能比較が容易なことである。また、本論文では高速化に適したデータパケット処理方式 1 のデータ受信時について、QNM の構築法およびその解析法を示したが、本解析法は QNM におけるカスタマのサーバ間遷移状況には依存しないため、処理順序が受信時とは逆になるデータパケット処理方式 1 の送信時、および処理方式 1 とは一つのデータパケット処理のための制御情報とメディア情報のバス転送回数が異なるデータパケット処理方式 2 のデータ送受信時についても、それぞれの処理シーケンスに基づいて必要な QNM を構築し、その QNM に対して同様の手順で本解析法を適用することが可能である。

取り上げたデータパケット処理方式 1 でのデータ受信時について、数値例を用いて各バス転送方式を採用した場合のデータパケットの平均端末内滞在時間の算出を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 各バス転送方式とも、提案解析法での算出値は計算機シミュレーション結果とよく一致する。但し、バスでの負荷がプロセッサ負荷より若干大きくなる領域 (2 倍程度) では、先着順転送、非割込み優先バス転送、バスの複数化の各方式の平均滞在時間を少し過大評価する傾向にある。

(2) 基本的な先着順転送方式に対して、プロセッサネックの場合にはバス転送方式による性能改善はない。しかし、バスとプロセッサの負荷がほぼバランスしている領域では、割込み優先バス転送、バスの分離、バスの複数化の 3 方式が同程度 (約 1.5 倍) の性能改善を示す。更に、バスネックとなる領域では、バスの複数化方式のみが大きな改善 (約 3 倍) を示す。

今後は、その他の特殊なデータパケット処理方式を採用する端末に対しても本性能解析法を適用し、本解析法の適用可能範囲を明らかにすると共に、実システムとの比較により本解析法の有効性を確認する。

謝辞 本研究の機会を与えて頂いた NTT ヒューマンインタフェース研究所メディア応用システム研究部

の山川修三前部長、画像情報サービス研究グループの中野博隆グループリーダーに感謝致します。また、本研究を進めるにあたり、御指導・御助言を頂いた同グループの西村一敏主幹研究員、解析法について御討論頂いたNTT通信網総合研究所高橋敬隆主幹研究員に深く感謝致します。

### 文 献

- (1) Kajiwara T., Ueda T., Nakano H. and Yamakawa S.: "HDTV High-Speed Videotex Prototype System", Proc. ICC' 91, pp. 484-490(1991).
- (2) Masaki S., Imaki N. Ichihara H. and Shimamura T.: "Personal Multimedia-multipoint Teleconference System for BISDN", Third Int. Conf. HSN, pp. 215-230(1991).
- (3) Pehrson B., Gunningberg P. and Pink S.: "Distributed Multimedia Applications on Gigabit Networks", IEEE Network Mag., 6, 1, pp. 26-35(Jan. 1992).
- (4) 石橋 豊, 阪本秀樹, 丸山 充, 西村一敏: "階層型通信プロトコルの処理方式と評価", 信学技報, SSE91-74(1991-09).
- (5) 橋田 温, 川島幸之助: "待行列ネットワークモデルによる計算機システムの性能解析", 情報処理, 21, 7, pp. 743-750(1980-07).
- (6) Whitt W.: "The Queueing Network Analyzer", Bell Syst. Tech. J., 62, pp. 2779-2815(1983).
- (7) Yoshino H.: "An Approximation Method for Queueing Network with Nonpreemptive Priority and Its Performance", Trans. IEICE, E73, 3, pp. 386-394(1990).
- (8) Siegel M., Williams M. and Robler G.: "Overcoming Bottlenecks in High-Speed Transport Systems", IEEE Proc. 16th Conf. on Local Computer Networks, pp. 399-407(1991).
- (9) 北村 浩, 前原一之: "ワークステーションにおける高速プロトコル処理を目指した性能評価", 信学技報, SSE92-38(1992-09).
- (10) Clark D.D., Jacobson V., Romkey J. and Salwen H.: "An Analysis of TCP Processing Overhead", IEEE Commun. Mag., 27, 6, pp. 23-29(June 1989).
- (11) Whitt W.: "Performance of the Queueing Network Analyzer", Bell Syst. Tech. J., 62, pp. 2817-2843(1983).
- (12) Jaiswal N.K.: "Priority queues", Academic Press, New York(1968).
- (13) Yoshitaka Takahashi: "Mean-delay approximation for a single server priority queue with batch arrivals of two classes", Trans. IEICE, E72, 1, pp. 29-36(1989).
- (14) 石橋 豊, 丸山 充, 阪本秀樹: "FDDI ネットワークにおけるトランスポートプロトコルのスループット解析", 信学技報, IN92-32(1992-09).

(平成5年3月12日受付, 8月12日再受付)



阪本 秀樹

昭59阪大・工・通信卒。昭61同大大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来、メッセージ通信処理システム、高精度画像情報提供システムの研究開発に従事。現在NTTヒューマンインタフェース研究所主任研究員。情報処理学会、IEEE各

会員。



石橋 豊

昭56名工大・工・情報卒。昭58同大大学院修士課程了。同年日本電信電話公社入社。NTTヒューマンインタフェース研究所主任研究員を経て、平5より名工大電気情報・助教授。情報ネットワークの性能評価、ネットワークアーキテクチャの研究に従事。情報処理学会、IEEE各会員。工博。

に従事。情報処理学会、IEEE各会員。工博。