モバイルコンピューティングと
ワイヤレス通信 23−13
高度交通システム 11−13
（2002．11．28）

車載マルチメディアネットワークにおけるQoS制御方式の提案

伊藤 健二† 柴田 伝幸† 三田 勝史† 伊藤 修朗†

E-mail: †itoken@mosk.tytlabs.co.jp

あらまし 本報告では，車載マルチメディアネットワークを構築する際に，車両内で取り扱う情報の優先度を考慮した転送方式を提案する．提案方式は，次世代の車載マルチメディア用データバスとして有力視されているIDB−1394（ITS Data Bus−1394）を対象とし，ストリームメディアの利用帯域に関わらず優先情報の遅延改善を可能とする転送方式である．提案方式の有効性を明らかにするために，離散時間待ち行列モデルを利用して性能解析を行う．その結果，通常のasynchronous転送，及びisochronous転送を用いるより，提案方式を用いた場合の方が低遅延性に優れていることを示す．

Proposal of a QoS Control Scheme for In−Vehicle Networks

Kenji ITO†, Tsutayuki SHIBATA†, Katsushi SANDA†, and Nobuo ITOH†

E-mail: †itoken@mosk.tytlabs.co.jp

Abstract This paper proposes an efficient transmission scheme, which takes the priority of messages into consideration, for in−vehicle multimedia networks. The proposed scheme focuses on IDB−1394 (ITS Data Bus−1394), which is considered promising as the future in−vehicle data bus for multimedia. The transmission delay of high priority packets is improved by the scheme independently of the allocated bandwidth for stream media. In order to clarify the effectiveness of the scheme, we analyze its performance with a discrete−time queueing model. The analytical result shows that the scheme has lower delay property of high priority messages than both *asynchronous transmission* and *isochronous transmission*.

1. まえがき

ITS（Intelligent Transport Systems）の高度化に伴い，車載機器間には，大容量，かつ高速なデータ通信が必要となり，システム間の連携を行うことが要求される．そこで，現在，車両内のネットワーク化を実現するため，車載ネットワークの国際標準化が進められている．

車載ネットワークに関する研究開発は，近年盛んに行われている．この車載ネットワークを実現することにより，共有の車載バスを利用して複数の情報メディアを同時に取り扱うことが可能となる．特に，車両内のマルチメディア用ネットワークで取り扱われる情報メディアの種類は多種多様であり，マルチメディア情報（映画・音楽などのストリーミングメディアやメール・インターネットアクセスなど）だけでなく，交差点情報や交通情報などの走行支援系情報なども検討されている．このような情報が車両内で処理される一例として，次のようなことが考えられる．インターネットなどの車外のネットワークから走行支援系情報を車載マルチメディアLANを介して取得し，制御系LANに伝達する．そして，周囲の状況に応じて，ブレーキ制御やステアリング制御などを行うことである．これにより，運転者への安全支援だけでなく，車の遠隔制御などを実現することが可能となる．

このとき，情報メディアのサービス品質（QoS：Quality of Service）に関して着目すると，マルチメディア情報は，音楽や映画のように高ビットレートな情報ではあるが，ユーザの主観的評価が最終的な評価となる．したがって，滑らかさや画質などのユーザレベルQoSが重視される．一方，走行支援系情報は，受信した情報を音声や画像な

† 株式会社豊田中央研究所 〒480−1192 愛知県長久手町
Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute−cho, Aichi−ken, 480−1192 Japan

どを用いてユーザに通知するだけでなく，ブレーキやステアリングなどの制御系 LAN（CAN：Controller Area Network や TTP：Time Triggered Protocol など）にも情報を伝達する必要性がある．したがって，マルチメディア情報に比べて，即時性，確実性などが要求される．このように異なる QoS をもつ情報メディアを複数同時に取り扱う場合，ネットワークでの QoS 制御が必要となる．

本報告では，次世代のマルチメディア用車載データバスの規格として有力視されている IDB-1394（ITS Data Bus-1394）[1] に焦点を合わせる．これは，A/V 機器やホームネットワークの構築のためのネットワークインタフェースとして標準化されている IEEE1394 [2] の車載用の新規格であり，転送方式は，IEEE1394 と同じ方式である．そこで，IEEE1394 プロトコルの問題点を明らかにし，IEEE1394 を車両内で取り扱う情報メディアを考慮した転送方式に拡張する．これは，通常の IEEE1394 転送方式と比較して，車両内で優先すべき情報（走行支援系情報）の転送遅延を改善することのできる転送方式である．

以下では，**2.** で車載マルチメディアネットワークの概要を示し，**3.** で IEEE1394 プロトコルについて記す．そして，**4.** において，提案方式を概説し，**5.** において，文献 [3] で提案されたネットワークモデルを利用し，解析を行う．最後に，**6.** で，解析結果による数値計算結果を示す．

2. 車載マルチメディアネットワーク

車載ネットワークには，ボディー系，制御系，診断系，マルチメディア系の 4 種類に分類することができる．以下では，本報告で取り扱うマルチメディア系ネットワークについて概要を述べる．

2.1 概　　要

車載ネットワークを実現することによって，以下のようなメリットが得られると考えられている．

（1） システム・ネットワーク間連携協調の実現
　　車両制御の高度化を実現
（2） 新規システムへの拡張可能性の実現
　　Plug & Play の実現
（3） ワイヤ・ハーネス本数の削減
　　車両重量の軽量化，燃費向上
　　ハーネス組み付け性の向上（作業効率向上）

マルチメディア系の車載ネットワークは，IDB（ITS Data Bus）[1] と呼ばれており，次世代の高速な IDB として，以下の二つの規格が挙げられている（表 1）．

- IDB-1394（ITS Data Bus-1394）[1]
- MOST（Media Oriented Systems Transport）[4]

現在の段階で，転送速度，民生機器への対応度，TCP/IP の標準化による IP ネットワーク開発環境などを考慮すると，IDB-1394 が将来的に有力であると考えている．そこで，本報告では IDB-1394 に注目する．

表 1　IDB-1394 と MOST の性能比較

項目	IDB-1394	MOST
トポロジ	ツリー，チェーン	リング
転送速度	100Mbps，200Mbps，400Mbps	24.8Mbps MOST2（48Mbps）
民生機器対応	A/V 機器中心（IEEE1394）	普及なし
TCP/IP 標準化	IP over 1394 [5], [6]	標準化なし
ロイヤリティ	25¢（米）/台	無料

2.2 IDB-1394

IDB-1394 は，情報 A/V 機器のインタフェースにも使われている IEEE1394 のプロトコルをベースとし，伝送媒体としてプラスチック光ファイバ（POF：Plastic Optical Fiber）を使用する車載向けプロトコルである．

通常の IEEE1394 の仕様に加えて，以下のような機能が含まれている．

- 電源管理
- CCP（Consumer Convenience Port）
- ウィンドウ・ミラーコントロール

実際の情報転送方式は，IEEE1394 と同様であるため，以下では，IEEE1394 について検討する．

3. IEEE1394 プロトコル

本章では，IDB-1394 のベースとなっている IEEE1394 プロトコルについて概要と機能の特徴，及びその問題点を明らかにする．

3.1 概　　要

IEEE1394 は，P2P（Peer-to-Peer）の通信を実現するシリアルバス通信の規格である．PC 環境だけではなく，AV 機器を含めた家庭内ディジタル機器のインタフェースとして標準化されている．

以下に，IEEE1394 の特徴を簡単に列挙する．

（1） 高速性（100Mbps〜3.2Gbps）
（2） マルチメディア情報の等時性確保
（3） Hot Plug In
（4） Plug & Play

3.2 IEEE1394 動作概要

IEEE1394 バスは，半二重のデータ転送サービスを提供する．したがって，同一バスに接続された二つ以上のノードが同時にデータを転送することはできない．また，データはパケットに分割され，転送される．

前述した特徴を実現するために様々な仕組みがある：Plug & Play を実現するためのコンフィグレーションプロセス，半二重通信のため，バスの所有権を制御する調停制御，マルチメディア情報のリアルタイム性を確保する転送方式などである．

3.2.1 コンフィグレーションプロセス

IEEE1394は，Plug & Playに対応するために，コンフィグレーションプロセスがある．このプロセスには，次の三つの機能がある．

（1） バスリセット（Bus Reset）
ノードの初期化（電源投入，ノード接続・切断）

（2） ツリー構造形成（Tree Identification）
ルートノードの決定，トポロジの決定

（3） 自己識別（Self Identification）
物理ID割当，伝送能力情報交換，トポロジ通知

3.2.2 調停制御

IEEE1394は，一つの共有バス上にデータを転送する．したがって，同じ時刻に複数のノードからの情報パケットが存在することはなく，バスの所有権をもっているノードのみが情報パケットの転送を許される．その制御を実現しているのが，調停制御である．

情報パケットをバス上に送信するノードは，まず，バス上に唯一存在するルートノードに向けて，調停信号（転送要求信号）を送出する．その後，ルートノードから許可信号が返信された場合のみ，情報パケットの送信が許される．

この調停により，バス上に存在するルートノードに早く問い合わせたノードがバスの所有権を得る．したがって，ルートノードが最も早く所有権を得ることができ，よりルートノードに近いほど早いタイミングで所有権を得ることが可能となる．

3.2.3 転送方式

IEEE1394には，次の二つの転送方式がある．

（1） isochronous転送
- ストリーミングメディアのための転送方式
- 転送サイクル（仕様上，125 μ秒）毎に1回の転送
- リトライ処理なし
- 最大80%（1サイクル中の100 μ秒）の帯域利用可

（2） asynchronous転送
- データ系の転送方式（IP接続など）
- ACK（ACKnowledgement）を用いたリトライ処理
- 各ノードの転送順序はFairness Interval(注1)
- 最低20%（1サイクル中の25 μ秒）の帯域確保

3.3 IEEE1394の問題点

車両内には，マルチメディア情報だけでなく，走行支援系などの優先情報を取り扱うノード（優先ノード）が存在しているネットワークシステムを想定する．優先ノードが優先情報をバス上に転送するときには，他のノードよりも早く調停を行い，バス所有権を取得し，連続的な転送を行う必要がある．

しかし，前述した特徴をもつIEEE1394プロトコルを車両内マルチメディアネットワークに適用することを考えると，以下のような問題が生じる恐れがある．

（1） ルートノードの変動
バスリセット時に，ツリー構造形成によってルートノードが変化するため，車両内の優先すべきノードを特定することが困難となる．

（2） データ系パケットの転送遅延
ストリーミング情報を優先転送するため，優先情報の転送遅延が生じる可能性がある．

（3） ノード間の公平性
データ系の転送は，Fairness Intervalによるため，優先すべき情報を同一ノードから連続転送する場合，転送遅延が生じる可能性がある．

そこで，これらの問題を解決するために，4.において，車両内で優先すべき情報を適切なタイミングで転送することを可能とするQoS制御方式を提案する．

4. 提案方式

本章では，車載マルチメディアデータバスにおいて，走行支援系情報などの優先情報を取り扱うことを考慮したQoS制御方式を提案する．

4.1 前提条件

まず，本提案方式を実現するための前提条件を記す．マルチメディア情報（ストリーミングメディア）は通常のisochronous転送によって転送する．一方，走行支援系情報の転送に関しては，どちらの転送方式を用いるのか新たに定義する必要がある．そこで，次のように定義する．

走行支援系情報は，HDDアクセスなどのデータ転送と同様にマルチメディア情報よりも確実性が要求される．したがって，ACKによるリトライ処理が行われるasynchronous転送によりパケット転送を行うこととする．しかし，通常のIEEE1394プロトコルでは，asynchronous転送パケットはisochronous転送パケットよりも後に転送される．つまり，そのまま適用すると前述した走行支援系情報の即時性が失われる可能性がある．そこで，走行支援系情報の即時性を満足できるように，asynchronous転送を拡張し，その方式を以下に説明する．

4.2 拡張方式

3.3で取り上げたIEEE1394プロトコルの問題点を解決する手段として，ルートノード固定，調停制御への拡張，及び優先ノードからのパケット連続転送を可能とする機能拡張を行う．以下に，これらの機能を説明する．

4.2.1 ルートノード固定

車両内で優先情報の転送を行うノードは車両内に常時設置される端末，及び通信機器（例えば，DSRC：Dedicated Short Range Communication）と考え，その端末を常にルートノードと固定する．更に，バスリセットが生じてもルートノードは変更されず，常に固定となるようにする．

(注1)：Fairness Intervalとは，asynchronousパケットと転送する全てのノードが，isochronous転送で使用していない転送時間を公平に利用することである．

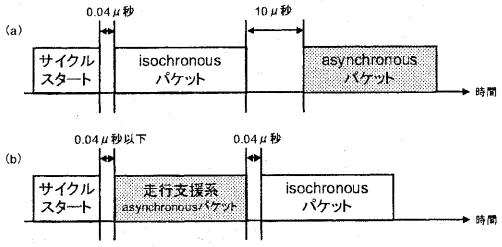

図 1　調停制御の拡張

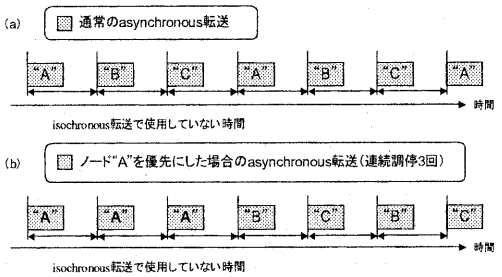

図 2　連続調停の動作

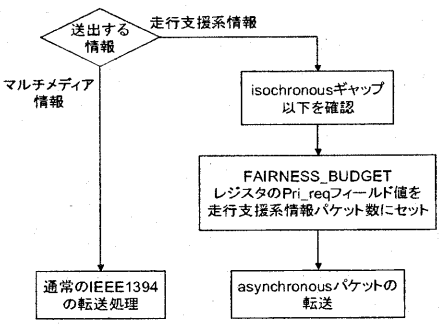

図 3　ルートノードにおける提案方式の処理フロー

4.2.2　調停制御の拡張

調停制御は，バスにパケットが流れていない時間（ギャップ時間）を検出した後に行われる．通常，asynchronous 転送の調停はサブアクションギャップ（10 μ 秒），isochronous 転送の調停は isochronous ギャップ（0.04 μ 秒）をそれぞれ検出した後に行う．したがって，ギャップ時間の短い isochronous パケットが先に転送される．これを解決するために，走行支援系情報の転送の際には，isochronous ギャップ以下を検出後に調停を行う．このときのバス上のパケットの流れを図 1 に示す．

図 1 において，(a) は通常の IEEE1394 によるギャップ時間とパケットの関係である．サイクルスタートパケット送出後，isochronous ギャップ時間（0.04 μ 秒）経過した後に，isochronous パケットが送出される．更に，サブアクションギャップ（10 μ 秒）経過後に asynchronous パケットが送出されている．これを走行支援系情報である asynchronous パケットを送出する場合には，(b) のように，isochronous ギャップ以下で調停を行う．この時間が isochronous ギャップと同じ値となった場合でも，ルートノードから送出されるパケットが常に優先となるため，(b) のようなパケットの流れを実現することが可能となる．

4.2.3　連続調停許可

本節では，優先ノードが優先情報を連続的に転送することを実現するための連続調停機能を説明する．連続調停に関するバス上のパケットの流れを図 2 に示す．

図 2 は，ノード “A”，“B”，“C” が asynchronous パケットをバス上に送出した場合のパケットの流れとノードの記号が記されている．図において，(a) は，通常の asynchronous 転送を示しており，isochronous 転送で使用していない時間を Fairness Interval に基づいて，パケットの間隔が同じで，かつ，“A”，“B”，“C” と順番に送出されているのが確認できる．

一方，(b) は，ノード “A” を優先ノードとし，3 回の連続調停許可を与えた場合である．図より，送出パケットの間隔は (a) と同じであるが，最初にノード “A” のパケットが 3 回連続に送出されており，その後，“B”，“C” のノードのパケットが交互に送出されている．

これを実現するためには，走行支援系情報を送信するノードが，FAIRNESS_BUDGET レジスタの Pri_req フィールドの値を走行支援系情報のパケット数にセットする [2]．

4.3　ルートノードの処理フロー

ルートノードにおける提案方式の処理フローを図 3 に示す．まず，ルートノードは，マルチメディア情報と走行支援系情報とを取り扱うことを可能とするノードである．そこで，これらの情報種別を識別できることが必須である．

受信した情報（バス上に送出したい情報）がマルチメディア情報であると識別された場合には，特に制御を行わず，通常の IEEE1394 の転送方式に準じた転送を行う．

一方，走行支援系情報と識別された場合には，他のノードよりも早く転送する必要がある．そこで，isochronous ギャップ時間（0.04 μ 秒）以下の時間だけ，バス上にパケットが流れていないのを確認した後，バス所有権を取得する必要がある．更に，連続転送する必要がある場合には，レジスタの値をセットし直して asynchronous パケットとして転送する．ただし，この値の最大値は，“63 – 接続ノード数”(注 2) で定義される．また，転送すべき情報が 1 パケットの場合，レジスタの値をセットする必要はない．このパケット数は，asynchronous 転送の最大パケットサイズ(注 3) によって求めることが可能である．

(注 2)：IEEE1394 の最大接続ノード数が 63 ノードであるため，このような式で表現される．

(注 3)：400Mbps の回線速度を用いた場合，asynchronous 転送の最大パケットサイズは 2048 バイトである．

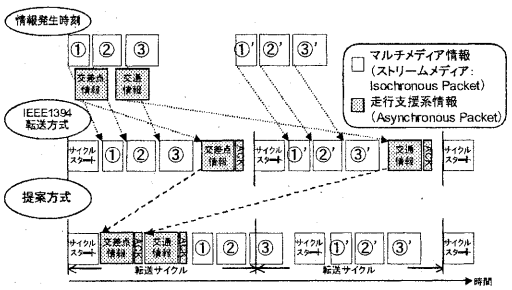

図 4　提案方式におけるバス上のパケットの流れ

4.4　提案方式によるバス上のパケット動作

前節までに，提案方式の拡張機能の動作を機能別に説明し，そのときのバス上のパケットの流れを示した．本節では，それら全拡張機能を含めた提案方式全体の動作概要を説明する．

図 4 において，IEEE1394 転送方式では，マルチメディア情報（図における ①，②，③ と ①′，②′，③′）が各転送サイクルのサイクルスタートパケット送出後，すぐに転送され，走行支援系情報（図における “交差点情報” と “交通情報”）が後に転送されているのがわかる．

一方，提案方式では，調停制御により走行支援系情報がマルチメディア情報よりも先に転送され，かつ，連続調停の許可により，連続してバス上に転送されている．しかし，マルチメディア情報の等時性が保たれていないのが確認できる．

このように，走行支援系情報を送出する際には，遅延ジッタが生じ，マルチメディア情報の等時性が失われるという欠点がある．しかし，実際の車載ネットワークにおいて，優先情報の利用帯域は，それほど大きなものとならないと考えられる．したがって，ストリーム情報のこの程度のジッタは，ユーザにわからない程度と推定可能である．

5.　ネットワークモデル

本章では，文献 [3] の解析モデル（離散時間待ち行列システム）を用いて，提案方式を解析する．走行支援系情報などの優先情報を転送する際に，提案方式，通常の asynchronous 転送，isochronous 転送の 3 種類を用いた場合のパケット転送遅延を解析する．

5.1　提案方式の転送遅延解析

本節では，4. で概説した提案方式のパケット転送遅延（待ち時間）を解析する．

5.1.1　モデル化の仮定

ビデオやテレビ会議などのようなリアルタイムアプリケーションによって，定量の isochronous トラヒックが発生している状態と仮定する．この他のトラヒックは，全て優先すべき情報パケット（asynchronous パケット）とする．そのとき，各ノードのバッファに存在している asynchronous パケットの数は，マルコフ連鎖によって表現することが可能である．そこで，各ノードで発生する優先情報パケットは，ポアソン分布に従うものとする．したがって，全ノードからバッファに到着する asynchronous パケットの数は，平均到着率 λ_A のポアソン分布である．

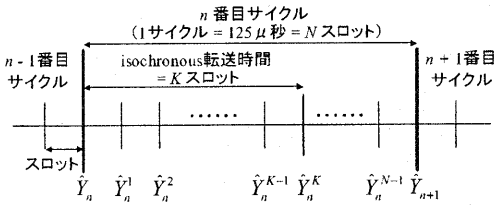

図 5　ネットワーク解析モデル

以下のようにモデルを仮定する．

（1）　IEEE1394 プロトコルのサイクル時間を N 個の固定長に分割する（これをスロットと定義する）．

（2）　1 サイクル中に占める isochronous パケットは，一定情報量の K スロットとする（$K \leq \lfloor 0.8 \times N \rfloor$，ここで，$\lfloor x \rfloor$ は x 以下の最大の整数である）．

（3）　asynchronous パケット，及び isochronous パケットの転送は，簡単のため 1 スロットで行われるものとする．

（4）　サイクルスタートパケットの時間，及び各ギャップ時間（isochronous，調停，サブアクションギャップ）は，パケット転送時間に比べて小さいので無視する．

提案方式における n 番目のサイクル始点における asynchronous パケット数を $\hat{Y}_n$，n 番目のサイクルの h 番目スロット終点における asynchronous パケット数を $\hat{Y}_n^h$，n 番目サイクルの h 番目スロット始点に到着するパケット数 A_n^h とする（図 5）．

$$\hat{Y}_n^h = A_n^h + \left[\hat{Y}_n^{h-1} - 1\right]^+; \quad 1 \leq h \leq N \tag{1}$$

ここで，$[x]^+ := \max(0, x)$，$\hat{Y}_n^0 := \hat{Y}_n$ である．また，$Y_{n+1} = Y_n^N$ である．

5.1.2　モデルの解析

まず，asynchronous パケット数の確率母関数を求める．$\hat{Y}_n^h$，Y_n の確率母関数をそれぞれ，$\hat{Y}_n^h(z)$，$Y_n(z)$ とすると，以下のように定義される．

$$\hat{Y}_n^h(z) := \sum_{k=0}^{\infty} \Pr(\hat{Y}_n^h = k) z^k; \quad 1 \leq h \leq N$$

ここで，$\Pr(\hat{Y}_n^h = k)$ は，$\hat{Y}_n^h = k$ となる確率である．更に，式 (1) より，以下のように表現される．

$$\begin{aligned} \Pr(\hat{Y}_n^h = k) = & \sum_{l=0}^{k-1} \Pr(A_n^h = l) \Pr(\hat{Y}_n^{h-1} = k - l + 1) \\ & + \Pr(A_n^h = k) \left[\Pr(\hat{Y}_n^{h-1} = 1) \right. \\ & \left. + \Pr(\hat{Y}_n^{h-1} = 0)\right] \end{aligned} \tag{2}$$

ここで，$\Pr(A_n^h = k) = \dfrac{\lambda_{\rm A}^k e^{-\lambda_{\rm A}}}{k!}; k \geqq 0$ であるため，

$$\hat{Y}_n^h(z) = \frac{e^{\lambda_{\rm A}(z-1)}}{z}\left[\hat{Y}_n^{h-1}(z) + (z-1)\Pr(\hat{Y}_n^{h-1}=0)\right] \tag{3}$$

となり，更に，$\hat{Y}_n(z)$ の項で表現すると，

$$\hat{Y}_n^h(z) = \frac{1}{z^h}\left[e^{h\lambda_{\rm A}(z-1)}\hat{Y}_n(z) + (z-1)\sum_{i=0}^{h-1}\Pr(\hat{Y}_n^i=0)e^{(h-i)\lambda_{\rm A}(z-1)}z^i\right] \tag{4}$$

となる．$h = N$ とし，$\hat{Y}_{n+1}$ に関して確率母関数を求める．

$$\hat{Y}_{n+1}(z) = \frac{1}{z^N}\left[e^{N\lambda_{\rm A}(z-1)}\hat{Y}_n(z) + (z-1)\sum_{i=0}^{N-1}\Pr(\hat{Y}_n^i=0)e^{(N-i)\lambda_{\rm A}(z-1)}z^i\right] \tag{5}$$

待ち行列システムが定常状態にあると仮定するとき，$n \to \infty$ とおける．ここで，$\hat{Y}(z) = \lim_{n\to\infty}\hat{Y}_n(z)$，$\mathrm{P}^i(k) = \lim_{n\to\infty}\Pr(\hat{Y}_n^i = k)$ とする．式 (5) を $n \to \infty$ とすると，次のように表現できる．

$$\hat{Y}(z) = \frac{(z-1)e^{N\lambda_{\rm A}(z-1)}}{z^N - e^{N\lambda_{\rm A}(z-1)}} \times\left[\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{P}^i(0)\left(ze^{-\lambda_{\rm A}(z-1)}\right)^i\right] \tag{6}$$

確率母関数の特徴より，$\lim_{z\to 1}\hat{Y}(z) = 1$ であるから，

$$\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{P}^i(0) = N - N\lambda_{\rm A} \tag{7}$$

が導かれる．ここで，式 (6) の分母の零点を考える．

$$z^N - e^{N\lambda_{\rm A}(z-1)} = 0 \tag{8}$$

この方程式は，N 個の解をもち，そのうちの一つは，1 である．残りの $N-1$ 個の解は Lagrange の公式より，以下のように求められる．

$$z_k = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{\frac{2\pi kn\mathrm{i}}{N}}}{n!}\frac{d^{n-1}}{dz^{n-1}}\left(e^{N\lambda_{\rm A}(z-1)}\right)^{\frac{n}{N}}\Bigg|_{z=0} = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{\frac{2\pi kn\mathrm{i}}{N}}}{n!}(n\lambda_{\rm A})^{n-1}e^{-n\lambda_{\rm A}} \tag{9}$$

ここで，$\mathrm{i} := \sqrt{-1}$，$1 \leqq k \leqq N-1$ である．このような z_k に対して，式 (6) より，以下の関係が成り立つ．

$$\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{P}^i(0)\left(z_ke^{-\lambda_{\rm A}(z_k-1)}\right)^i = \sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{P}^i(0)(\alpha_k)^i = 0; \tag{10}$$

したがって，式 (7)，(10) より，$\mathbf{pV} = \mathbf{u}$ の線型方程式が成り立つ．ここで，$\mathbf{p} := \left[\mathrm{P}^1(0),\cdots,\mathrm{P}^{N-1}(0)\right]$，$\mathbf{u} := \left[N - N\lambda_{\rm A}, 0, \cdots, 0\right]$ である．また，

$$\mathbf{V} := \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \alpha_1 & \cdots & \alpha_{N-1} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ 1 & (\alpha_1)^{N-1} & \cdots & (\alpha_{N-1})^{N-1} \end{bmatrix} \tag{11}$$

が導出される．すなわち，$\mathbf{V}$ は，Vandermonde 行列であることがわかる．

定常状態において，1 サイクルの始点に存在する平均パケット数 $\overline{\hat{Y}}$ は確率母関数 $\hat{Y}(z)$ の性質より，以下のように表される．

$$\overline{\hat{Y}} = \lim_{z\to 1}\frac{d}{dz}\hat{Y}(z) \tag{12}$$

L'Hospital の定理を用いて計算すると，

$$\overline{\hat{Y}} = \frac{1}{2(N-N\lambda_{\rm A})} \times\left[2\sum_{i=0}^{N-1}\mathrm{P}^i(0)\left[(N-i)\lambda_{\rm A}+i\right] - N(N-1) + N^2\lambda_{\rm A}^2\right] \tag{13}$$

更に，h 番目のスロット終点に存在する平均パケット数 $\overline{\hat{Y}^h}$ $(1 \leqq h \leqq N)$ は，式 (1) より，次のとおりである．

$$\overline{\hat{Y}^h} = \lambda_{\rm A} + \overline{\hat{Y}^{h-1}} - \left[1 - \mathrm{P}^{h-1}(0)\right] = h\lambda_{\rm A} + \overline{\hat{Y}} - \sum_{i=0}^{h-1}\left[1-\mathrm{P}^i(0)\right] \tag{14}$$

Little の公式より，定常状態におけるパケットの平均待ち時間 $\overline{\hat{W}}$ は，以下の式で表現できる．

$$\overline{\hat{W}} = \frac{1}{N\lambda_{\rm A}}\left[\overline{\hat{Y}} + \sum_{h=1}^{N-1}\overline{\hat{Y}^h}\right] = \frac{N-1}{2} + \frac{\overline{\hat{Y}}}{\lambda_{\rm A}} + \frac{1}{N\lambda_{\rm A}}\sum_{i=0}^{N-2}(N-i-1)\left[1-\mathrm{P}^i(0)\right] \tag{15}$$

5.2 asynchronous 転送を利用した場合の解析

本節では，優先情報パケットを通常の asynchronous 転送を利用する場合のパケット転送遅延を求める．文献 [3] の結果を用いると，通常の asynchronous 転送を用いた場合の平均待ち時間 $\overline{W}$ は，以下の式で表現できる．

$$\overline{W} = \frac{N-1}{2} + \frac{\overline{Y}}{\lambda_{\rm A}} + \frac{1}{N\lambda_{\rm A}}\sum_{i=K}^{N-2}(N-i-1)\left[1-\mathrm{P}^i(0)\right] \tag{16}$$

平均パケット数 $\overline{Y}$ は，以下の式で表される．

$$\overline{Y} = \frac{1}{2(N-K-N\lambda_{\mathrm{A}})} \times \left[2\sum_{i=K}^{N-1} \mathrm{P}^i(0)\left[(N-i)\lambda_{\mathrm{A}}+i-K\right] - (N-K)(N-K-1)+N^2\lambda_{\mathrm{A}}^2 \right] \quad (17)$$

未知変数 $\mathrm{P}^i(0)$ は，次の線形方程式の解で求められる．

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} \mathrm{P}^i(0) = N-K-N\lambda_{\mathrm{A}} \\ \sum_{i=0}^{N-1} \mathrm{P}^i(0)\left(z_k e^{-\lambda_{\mathrm{A}}(z_k-1)}\right)^{i-K} = 0; \\ z_k = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{\frac{2\pi k n \mathrm{i}}{N-K}}}{n!}\left(\frac{nN\lambda_{\mathrm{A}}}{N-K}\right)^{n-1} e^{\frac{-nN\lambda_{\mathrm{A}}}{N-K}} \end{cases} \quad (18)$$

ここで，$\mathrm{i} := \sqrt{-1}$，$1 \leqq k \leqq N-K-1$ である．

5.3 isochronous 転送を利用した場合の解析

優先情報パケットを通常の isochronous 転送をそのまま利用した場合のパケット遅延解析を行う．

5.3.1 モデル化の仮定

バス上のパケットは，優先情報とストリーム情報のパケットとし，どちらも isochronous 転送を用いる．ただし，解析の簡単のためパケットを区別せず，**5.1.1** と同様のモデルを用いて転送遅延解析を行う．そこで，各ノードで発生する優先情報パケット（isochronous パケット）の到着過程は，平均到着率 λ_{I} のポアソン分布である．また，1 サイクル中に isochronous パケットの占める最大スロット数を M とする（$M = \lfloor 0.8 \times N \rfloor$，ここで，$\lfloor x \rfloor$ は x 以下の最大の整数）．n 番目のサイクル始点における isochronous パケット数を $\hat{X}_n$，n 番目のサイクルの h 番目スロット終点における isochronous パケット数を $\hat{X}_n^h$ とする．すなわち，解析モデルは，図 5 における変数 Y を X に置き換えたものである．

$$\hat{X}_n^h = \begin{cases} A_n^h + \left[\hat{X}_n^{h-1}-1\right]^+; & 1 \leqq h \leqq M \\ A_n^h + \hat{X}_n^{h-1}; & M+1 \leqq h \leqq N \end{cases} \quad (19)$$

ここで，$\hat{X}_n^0 \equiv \hat{X}_n \equiv X_{n-1}^N$ である．

5.3.2 モデルの解析

$\hat{X}_n^h$，$\hat{X}_n$ の確率母関数をそれぞれ，$\hat{X}_n^h(z)$，$\hat{X}_n(z)$ とすると，以下のように表現できる．

- $1 \leqq h \leqq M$ の場合

$$\begin{aligned} \hat{X}_n^h(z) &= \frac{e^{\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}}{z}\left[\hat{X}_n^{h-1}(z) + (z-1)\Pr(\hat{X}_n^{h-1}=0)\right] \\ &= \frac{1}{z^h}\left[e^{h\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}\hat{X}_n(z) + (z-1)\sum_{i=0}^{h-1}\Pr(\hat{X}_n^i=0)e^{(h-i)\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}z^i \right] \end{aligned} \quad (20)$$

- $M+1 \leqq h \leqq N$ の場合

$$\begin{aligned} \hat{X}_n^h(z) &= e^{\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}\hat{X}_n^{h-1}(z) \\ &= \frac{1}{z^M}\left[e^{h\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}\hat{X}_n(z) + (z-1)\sum_{i=0}^{M-1}\Pr(\hat{X}_n^i=0)e^{(h-i)\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}z^i \right] \end{aligned} \quad (21)$$

この式に $h=N$ を代入すると，$\hat{X}_{n+1}$ に関する確率母関数を求めることが可能である．また，定常状態を考慮するため，$n \to \infty$ とする．このとき，$\hat{X}(z) = \lim_{n\to\infty}\hat{X}_n(z)$，$\mathrm{P}^i(k) = \lim_{n\to\infty}\Pr(\hat{X}_n^i=k)$ とおくと，

$$\hat{X}(z) = \frac{(z-1)e^{N\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}}{z^M - e^{N\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}} \times \left[\sum_{i=0}^{M-1}\mathrm{P}^i(0)\left(ze^{-\lambda_{\mathrm{I}}(z-1)}\right)^i\right] \quad (22)$$

確率母関数の特徴より，$\lim_{z\to 1}\hat{X}(z)=1$ であるから，未知変数 $\mathrm{P}^i(0)$ は，次の線形方程式の解で求められる．

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{M-1}\mathrm{P}^i(0) = M - N\lambda_{\mathrm{I}} \\ \sum_{i=0}^{M-1}\mathrm{P}^i(0)\left(z_k e^{-\lambda_{\mathrm{I}}(z_k-1)}\right)^i = 0; \\ z_k = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{\frac{2\pi k n \mathrm{i}}{M}}}{n!}\left(\frac{nN\lambda_{\mathrm{I}}}{M}\right)^{n-1}e^{\frac{-nN\lambda_{\mathrm{I}}}{M}} \end{cases} \quad (23)$$

ここで，$\mathrm{i} := \sqrt{-1}$，$1 \leqq k \leqq M-1$ である．

式 (13) と同様に，平均パケット数 $\overline{\hat{X}}$ は，

$$\overline{\hat{X}} = \frac{1}{2(M-N\lambda_{\mathrm{I}})} \times \left[2\sum_{i=0}^{M-1}\mathrm{P}^i(0)\left[(N-i)\lambda_{\mathrm{I}}+i\right] - M(M-1)+N^2\lambda_{\mathrm{I}}^2 \right] \quad (24)$$

更に，h 番目のスロット終点に存在する平均パケット数 $\overline{\hat{X}^h}$ $(1 \leqq h \leqq N)$ は，次の式となる．

$$\overline{\hat{X}^h} = \begin{cases} h\lambda_{\mathrm{I}} + \overline{\hat{X}} - \sum_{i=0}^{h-1}\left[1-\mathrm{P}^i(0)\right]; \\ \qquad\qquad 1 \leqq h \leqq M \\ h\lambda_{\mathrm{I}} + \overline{\hat{X}} - \sum_{i=0}^{M-1}\left[1-\mathrm{P}^i(0)\right]; \\ \qquad\qquad M+1 \leqq h \leqq N \end{cases} \quad (25)$$

定常状態における平均待ち時間 $\overline{\hat{W}}$ は次とおりである．

$$\overline{\hat{W}} = \frac{N-1}{2} + \frac{\overline{\hat{X}}}{\lambda_{\mathrm{I}}} - \frac{1}{N\lambda_{\mathrm{I}}}\sum_{i=0}^{M-1}(N-i-1)\left[1-\mathrm{P}^i(0)\right] \quad (26)$$

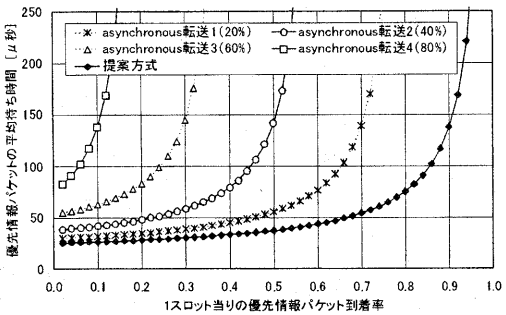

図 6　提案方式と asynchronous 転送の遅延解析

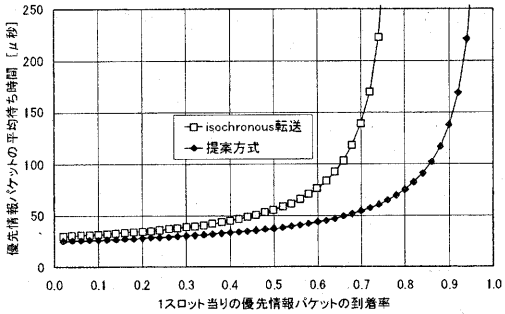

図 7　提案方式と isochronous 転送の遅延解析

6. 性能評価

本章では，**5.** で導出した平均待ち時間を用いて，提案方式の性能を評価する．

6.1 パラメータ値

数値計算で使用するパラメータは，以下とおりである．

- $N = 5$
- $K = 1, 2, 3, 4$
- $M = 4;$　$(\because M := \lfloor 0.8 \times N \rfloor)$
- スロット時間 $= 25.0 \times 10^{-6}$ 秒

6.2 数値計算結果

解析結果に前節のパラメータ値を代入して求めた数値計算結果を示す．

6.2.1 asynchronous 転送を利用した場合との比較

通常の asynchronous 転送を利用した場合と本提案方式を利用した場合のパケット遅延に関して数値計算結果を図 6 に示す．isochronous 転送の帯域が 20%，40%，60%，80%の場合，それぞれ，isochronous 転送のスロット数 K の値が 1，2，3，4 に対応する．また，そのときの転送方式を，それぞれ，asynchronous 転送 1，2，3，4 と定義する．

図 6 より，定常状態における全てのパケット到着率に対して，提案方式の平均待ち時間は，四つの asynchronous 転送のそれよりも小さくなっていることがわかる．したがって，提案方式を利用した方が優先情報のパケット転送遅延時間が改善され，有効であるといえる．

また，通常の asynchronous 転送は，isochronous 転送の帯域が増加するほど，平均待ち時間が大きくなっている．しかし，提案方式は，isochronous 転送の利用帯域に関わらず，常に同じ転送遅延となる．これは，式 (15) の平均待ち時間が K と無関係なためである．更に，提案方式の平均待ち時間は，通常の asynchronous 転送を用いた場合の式 (16) において，$K = 0$ とした場合と同等となる．すなわち，提案方式を利用することにより，isochronous 転送パケットが全く存在していない場合の asynchronous 転送と，同等の遅延品質を常に提供することが可能である．

6.2.2 isochronous 転送を利用した場合との比較

通常の isochronous 転送を利用した場合と本提案方式を利用した場合のパケット遅延に関して数値計算結果を図 7 に示す．図より，提案方式の平均待ち時間が isochronous 転送を利用した場合よりも低く抑えられていることが確認できる．したがって，優先情報を転送する際には，通常の IEEE1394 における isochronous 転送を利用するよりも提案方式を用いる方が有効であるといえる．

7. むすび

本報告では，車両内で取り扱う種々の情報の優先度を考慮したネットワークシステムを実現するため，QoS 制御の一方式を提案した．そして，提案方式の有効性を明らかにするために，離散時間待ち行列システムを用いた性能解析を行った．その結果，車両内における優先情報を転送する際には，通常の asynchronous 転送，及び isochronous 転送を用いる場合よりも，提案方式を用いる方が，パケットの転送遅延を低く抑えられることを確認した．更に，提案方式は，ストリーミング情報（isochronous 転送パケット）がバス上に全く存在していない場合における通常の asynchronous 転送を利用した場合と，同等の遅延品質を常に提供できることがわかった．

今後の課題として，提案方式を利用して優先情報を転送する際の isochronous 転送パケットへの影響の評価を行う予定である．更に，今回の結果を基にした提案方式の実装，及び評価実験を行うことなどが挙げられる．

文　献

[1] "IDB Forum," http://www.idbforum.org/

[2] D. Anderson, "FireWire system architecture: Second edition," Mindshare, Inc., 1999.

[3] T. Norimatsu and H. Takagi, "Modeling and performance analysis of the IEEE 1394 serial bus," IEICE Trans. Commun., vol. E84–B, no. 11, pp. 2979–2987, Nov. 2001.

[4] "MOST Cooperation," http://mostnet.de/

[5] P. Johansson, "IPv4 over IEEE 1394," RFC2734, Dec. 1999.

[6] K. Fujisawa and A. Onoe, "Transmission of IPv6 packets over IEEE 1394 networks," RFC3146, Oct. 2001.