オンボード分散スイッチによるループ型 ATM-LAN の試作と伝送遅延時間の評価

会 員 高橋 正弘 ((株)日立製作所 日立研究所)
会 員 大倉 敬規 ((株)日立製作所 日立研究所)
非会員 濱田 卓志 ((株)日立製作所 大みか工場)

An Experimental Loop-type ATM-LAN System using Onboard Distributed Switch Architecture and Evaluation of Transmission Delay

Masahiro Takahashi and Yoshinori Ohkura (Hitachi Res. Labo., Hitachi, Ltd.,)
Takuji Hamada (Omika Works, Hitachi, Ltd.,)

In a network for an information and control systems, real time communication of large volume data and transmitting multimedia information such as video and voice has been required. In response to realize these requirements, introduction of an ATM(Asynchronous Transfer Mode)-LAN have been investigated. This paper describes an experimental loop-type ATM-LAN for control use utilizing an onboard distributed architecture. Realization method of a loop control mechanism(abortion of loop round-trip cells and loop-back control) using ATM switch function to miniaturizing a hardware and transmission delay of cyclic data communication caused cascade connection of an ATM switch is obtained.

キーワード : 制御 LAN、ループ型 ATM-LAN、ATM スイッチ、コネクション設定、ループー巡伝送遅延時間

1. はじめに

情報処理と制御を統合した情報制御システムは、産業・社会生活を支える基盤として定着し着実に発展している。その適用範囲は、電力、交通、上下水、鉄鋼、一般産業のFA・物流、非製造業の情報サービスと広範囲にわたる。

このような情報制御システムを支える通信ネットワークに対しては、情報制御の高度化・高精度化の要求を受けて、更なる高速化とリアルタイム性の向上が要求されると共に、画像・音声などのマルチメディア通信、オープン化、構内・広域にわたるシームレス化、低価格化が強く求められている。(1)

一方、汎用ネットワークの世界では、ATM (Asynchronous Transfer Mode : 非同期転送モード) が次世代のWAN, LAN, インターネット構築の基幹ネットワーク技術として、ATM Forum (参加企業700社以上) において標準化がほぼ完成しつつあり、また各分野でその実用化が急速に立ち上がりつつある。(2)(3)

従来の情報制御システム分野のネットワークは、一つの伝送メディアを共有した(ループ、バス型) 同報通信を主体としたネットワークであった。(4)これに対してATM-LANは、スイッチングハブを中心としたメディア非共有のコネクションオリエント、トラヒック制御/帯域保証が可能などの特徴を有したネットワークであるが、そのまま情報制御シ

ステム、特に制御分野に適用することは、コスト、障害時のシステム再構成制御、制御LANの通信機能の収容などの点で十分とは言えない。そこで、ATM方式の特徴、機能等を失うことなく、ループ型のシンプル性を導入したATM-LANが検討されている。(5)(6)

このようなループ型ATM-LANシステムとして、FDDIと同様にループ型アクセスプロトコルを有するシェアードメディア型の専用ATM-LANで、障害発生時のシステム再構成制御としてループバック、光バイパスによりシステム全体の通信を継続する方式(ループ機構組み込み型専用スイッチATM-LAN) が制御分野でのリアルタイム性、高信頼性等の観点から着目されている。そこで、筆者らは4×4の小規模ATMスイッチLSIを使用したオンボード分散スイッチを用いた情報制御用ループ型ATM-LANを試作した。(7)また、このようなループ機構組み込み型ATM-LANにおいて、障害発生時のシステム再構成制御方式とその信頼度を評価し、信頼度/接続コストの関係を明らかにした。(8)更に、制御用LANの通信機能であるサイクリック通信において、セル・シェーピングとセルのループー巡遅延時間の関係等についてシミュレーションにより検討した。(9)

本論文では、情報制御システム、特に制御LANを対象として、スイッチ機能を各ノードに分散し、かつループ制御機構を組み込んだATM-LANを試作し、評価した。具体的には、汎用ATMスイッチを活用してループ制御機構(一巡セルの廃

棄、ループバック等)を実現するコネクション設定方法、また、ATMスイッチ多段接続によるデータの伝送遅延、特にリアルタイム性が要求されるサイクリック通信における伝送遅延時間の評価結果について述べる。

2. オンボード分散スイッチを用いたループ型ATM-LANの概要

図1にループ型 ATM-LAN を用いた分散制御システムのシステム構成例を示す。ループ伝送システムを介して、制御サーバー、コントローラ間でサイクリック通信、パケット通信を高速、高信頼に行うことにより、プロセス監視制御、生産管理等を実行する。制御 LAN に要求される機能、特性は次のようである。

- (1) 大容量リアルタイム通信
プロセス制御の高速応答性を可能とするため、大量プロセス情報を一定周期(転送周期: 1 ミリ秒~ 1 秒程度)でブロードキャスト、メモリに転写するサイクリック通信、或いは機能コード通信、パケット通信等の多様なトラヒック条件下でリアルタイム性を確保する必要がある。
- (2) 高信頼ネットワーク
ネットワークの障害に対しては、二重化、障害時自動交替等のシステム再構成を高速に行い情報制御システム全体停止の回避と迅速なシステム回復が必須である。

図2にオンボード分散スイッチで構成したステーションのハードウェア構成、表1にシステム仕様を示す。ステーションは、市販4×4の小規模スイッチ用LSIを用いて構成し、全体をボード1枚で実現している。

(1) 伝送制御部

図1 制御用ATM-LANシステムの構成
Fig.1 Configuration of ATM-LAN systems for control use

図2 ハードウェア構成
Fig.3 Hardware configuration

表1 ループ型ATM-LANシステムの仕様
Table 1.Specification of loop-type ATM-LAN system

項 目	仕 様
ネットワーク形状	ループ型
伝送路	155Mbps (OC-3) 光ファイバー
アクセス方式	ATM (PVCベース)
ループ長	100km
通信機能	サイクリック通信 (1:N) 機能コード通信 (UDP/IP, 1:N) パケット通信 (TCP/IP, 1:1/1:N)
RAS機能	伝送路2重化 ループバック、光バイパス

- ・ATM伝送制御部: 物理レイヤ機能の光モジュール、SONET (Synchronous Optical Network)/SDH (Synchronous Digital Hierarchy) フレームからセルへの変換、ATMレイヤ機能のセルヘッダーVPI/VCI翻訳、スイッチング機能を実行。
 - ・ループ機構付加機能: ループを一巡したセルの廃棄、ループバック、光スイッチによる光バイパスを実行するループ系特有の機能である。
 - (2) 通信処理部
 - ・サイクリック通信処理部: サイクリックデータの送受信を実行する機能で、試作ではオンボード分散スイッチ内蔵のマイクロプロセッサで実現した。
 - ・IPパケット通信処理: TCP/IP、UDP/IPプロトコルの処理。
 - (3) バスインタフェース
 - ・接続装置のバスへのアクセス機能。
- すなわち、オンボード分散スイッチは、汎用ATM-LANではATM-SW機能とNIC (Network Interface Card) 機能が別々な装置になっているものを、一体化、小型化、低価格化を実現

現することにより信頼度／接続コスト比を高めることを狙っている。

3. ループ型ATM-LANの試作

〈3.1〉ループ制御機構の実現方式

A. コネクション設定方式

低価格なオンボード分散スイッチを実現するには、汎用のATMスイッチLSI等を極力活用してループ制御機構を実現し、ハードウェアの小型化、開発期間の短縮等が必須である。

ATM ネットワークでは、従来の LAN と異なってエンドエンドの機器間で仮想コネクションを設定し、これにより帯域の予約／管理、QoS 保証などを実現する。また、各ノードにスイッチ機能を内蔵し、コネクション設定／変更が可能のため、情報種別に応じた振り分け、ループ一巡セルの廃棄、ループバック用コネクション構成などループ制御機構のハードウェア削減が可能である。そこで、

- (1) ループ構成に適した、かつルーチングテーブル容量の小さいコネクション設定方法
 - (2) ATM スwitchのコネクション設定機能によるハードウェア削減方法
- の2つの観点からループ制御機構の実現方式について検討する必要がある。

図3 VPI/VCIの構成
Fig.3 VPI/VCI format

ATM ネットワークでの VPI/VCI 設定方法は、基本的にエンドエンド間で個別にコネクションを張る方法であるため、ループ型ネットワークのすべてのノードを完全接続するには、各ノードのコネクション数（ルーチングテーブル容量）は $n(n+1)$ (n はノード数で、256 程度) と大きくなり、高速スイッチング、ハードウェア規模の点から好ましくない。また、制御 LAN の通信機能は、表 1 に示すように同報通信が主体であること、またセルを送信したノードはループを一巡してきた自局送出セルを廃棄して、その無限周回を防止する必要がある。

そこで、ループを一周する VPI（マルチキャストパス）を用いて、従来 LAN の DA/SA（宛先アドレス／発信元アドレス）の考え方を取り込んだ DA/SA ベースのコネクション設定方式とした。具体的な VPI/VCI の構成を図 3 に示す。なお、Np#は各ノードに割り付けた固有ノード番号である。セルを送信するノードは、その通信機能等に応じて、

- (a) 自ノード番号 (Np#) を付けた VPI を設定
- (b) 同報通信であれば各マルチキャスト番号を
 - ・サイクリック通信 → Nc#
 - ・機能コード通信 → Nf#
 - ・同報パケット通信 → Nb#

1:1 パケット通信であれば宛先 Np#を VCI に設定する。なお、Nc#, Nf#, Nb# = 1、Np# = n（ノード数）であり、また ATM スwitchでの送信優先順位は、 $Nc# > Nf# > Nb#$, Np#である。

このような、DA/SA ベースのコネクション設定方式にすることにより、下記のような特長を実現できる。

- (1) VPI 数はノード数分を用意すればよく、ルーチングテーブル容量を小さくすることが可能、
- (2) 各ノードは VCI=自ノード番号のセルのみをフィルタリングして受信すればよく、スイッチでのルーチング処理が簡単化できる。

B. セル廃棄用コネクションの検討

上記コネクション設定機能を実現するだけであれば、ATM

図4 セル廃棄用コネクションを設けた場合のATMスイッチでのルーチング方法
Fig.4 Routing method of ATM switch in case of preparing a connection of cell abortion

スイッチとして3×3（2重化光ファイバー伝送路が2ポート、端末への入出力が1ポート）の容量で十分である。しかし、スイッチのコネクション設定機能を活用すれば、ループ制御機構であるループー巡セルの廃棄、障害発生時のループバック、あるいは情報種別による振り分けなどのハードウェアが削減できる可能性がある。

図4に各ノードのATMスイッチにおけるコネクション設定の一例をしめす。図示の例では、ループー巡セルの廃棄用コネクションとサイクリック通信／IP通信の二種の通信機能を振り分けるコネクションを設けた場合について示す。セル廃棄用コネクションを設けることで、VPIを検出し自送出セルを消去するハードウェアを不要にできるが、各ノードのルーチングテーブルには、VPI(SA)/VCI(DA)をペアにして登録する必要があり、その容量はかなり大きくなる。ATMスイッチのルーチングテーブル容量は、LSIの構成方法によって異なるが、外付けメモリを増加することで可能であるが、ATMスイッチLSI内蔵メモリを使用する場合はその容量は1k～4k程度である。ハードウェアの小型化、低価格化の観点から、この容量に収まることが望ましく、基本的にはこれを目標容量とする。以下でセル廃棄用コネクションを設ける場合と設けない場合のルーチングテーブル容量を求め、比較する。

(a) セル廃棄用コネクションを設けない場合

セル廃棄用コネクションを設けない場合には、4×4のスイッチとなり、ATMスイッチの入力ポート#2の有するルーチングテーブル容量はVCI(DA)のみで行うため下式のようなになる。

$$RT_{VCI}=[(n-1)+3]\times 2$$
 (1)

但し、nはノード数

上式において、第1項(n-1)は1:1パケット通信の宛先アドレス数、第2項の3は同報通信用マルチキャスト番号数を示す。また、図示のVPI/VCI構成のように、後述するようにループバック・セルと通常セルを区別するビットが必要

なため、2倍となっている。

(b) セル廃棄用コネクションを設ける場合

セル廃棄用コネクションを設ける場合には、5×5のスイッチ構成となり、ルーチングテーブルの容量はVPI(SA)/VCI(DA)を同時に検出する必要があるため下式のようなになる。

$$RT_{VPI/VCI}=[n(n-1)+3]\times 2$$
 (2)

以上示した(1)、(2)式から、ノード数n=128/256とした場合、セル廃棄用コネクションを設けない時のルーチングテーブル容量RT_{VCI}はそれぞれ260、516、またセル廃棄用コネクションを設けた時のルーチングテーブル容量RT_{VPI/VCI}はそれぞれ32518、130566となる。

セル廃棄用コネクションを設けることにより、ルーチングテーブル容量はノード数nにより急激に増加し、目標とする1k～4k容量を大幅に超える。そこで、ループ制御機構であるループー巡後のセル廃棄機能はハードウェア化することにした。

C. ループバック用コネクションの検討

図5は上記したループバック方式をATMスイッチでのコネクション設定で行う場合を示す。障害発生場所、すな

図6 試作オンボード分散スイッチ
Fig.6 Experimental onboard distributed switch

図5 ループバックにおけるATMスイッチでのルーチング方法
Fig.5 Routing method of loopback using ATM switch

図7 サイクリックデータの伝送フォーマット
Fig.7 Format of cyclic data

図8 伝送遅延時間の内訳
Fig.8 Items of transmission delay

わち上流か下流（現用系伝送路を基準とし、ノードの上流／下流を規定）によって、ATM スイッチでのルーティング方法が異なる。ルーティングテーブルとしては、正常時／上流障害発生時／下流障害発生時の3種類を用意し、状況に応じて ATM スイッチのルーティングテーブルを書き換える。また、各ルーティングテーブル容量は、前節でのべたセル廃棄用コネクションを設けない場合の $RT_{vcl} = [(n-1) + 3] \times 2$ に等しい。従って、ルーティングテーブルとしては、1種類のみを有するだけでよく、かつその容量は目標値を実現できる。

D. 試作評価

図6に試作したオンボード分散スイッチの写真を示す。CPU(SH3), ROM, RAM, ATM 関連 LSI 等全てを PCI バス用カード (288mm×88mm) 1枚に実装できる見通しを得た。

ループ制御機構は、7k ゲート程度の FPGA 2個で構成した。また、本試作では、ATM スイッチは5チップの LSI で構成したが、既に1チップ化が実現されており、さらなる小型化が可能である。

オンボード分散スイッチは、ATM スイッチのコネクション設定機能を用いて、ループへのセルの挿入／分岐を行っているため、多数のノードを多段に接続した場合のループ

表2 伝送遅延時間の計算モデル
Table 2. Calculation model of transmission delay

項目	仕様
伝送速度	155Mbps(OC-3)
ATMスイッチの遅延時間	3.5セル時間/ステーション
伝送路の遅延時間	21.9セル時間(10km相当)
ステーション台数	48~64台
サイクリック・データのトラフィック	トラフィック=102Mb/s 送信周期T _{im} の起動時刻はランダム 送信周期=1ms

図9 ブロックのループ一巡遅延時間
Fig.9 Round-trip delay of block data

一巡の遅延時間が大きくなる。そこで、オンボード分散スイッチの遅延時間の評価を行った。遅延時間の要因としては、下記の2項目がある。

(1) 物理レイヤの遅延時間

送信、受信処理を各1回実行。SONET/SDH フレームと ATM レイヤの同期化のためのバッファ遅延が2セル時間程度になる。

(2) ATM レイヤの遅延時間

セルヘッダー翻訳等の処理、スイッチング遅れに起因するもので、スイッチ規模が小さいため汎用 ATM 装置に比較して小さくできる。遅延時間は1.2~1.4セル時間程度。従って、オンボード分散スイッチの遅延時間はノード当り $(3.2 \sim 3.4 + \alpha)$ セル時間となる。

4. 伝送遅延時間の評価

<4.1> 伝送遅延時間の計算モデル

サイクリック通信では、1ミリ秒程度の高周波で、比較的大容量のデータを低伝送遅延時間で伝送する必要がある。図7にサイクリック・データの伝送フォーマット、図

8に伝送遅延時間の内訳を示す。

サイクリック・データのループ巡延延時間は、(無負荷時のループ巡延延時間) + (ブロック伝送時間) + (セルのループ巡延延時間の待ち行列によるゆらぎ) で表せる。ブロック伝送時間は、ブロック長とシェーピング間隔に依存するため、目標遅延時間に対して適切な値を選択する必要がある。ブロック長は伝送効率に影響し、シェーピング間隔はセルの待ち行列によるゆらぎに影響する。

4.2) ループ巡延延時間の評価

表2の伝送遅延時間の計算モデルに基づいたブロックのループ巡延延時間を図9に示す。サイクリック通信の伝送周期1ミリ秒の場合、サイクリック・データのループ巡延延時間1ミリ秒を許容できると仮定している。

- (1) ステーション数=48の場合、ブロック長=23セル(サイクリックデータ長1.0kバイト相当)であれば、目標伝送遅延時間を満足することができる。また、シェーピングのセル間隔=8セル時間の方が、各ステーションのトラフィックを分散でき、待ち行列による伝送遅延時間のゆらぎを小さくできるので4セル時間に比べて望ましい。
- (2) ステーション数=64の場合、無負荷時のループ巡延延時間が大きいため、ブロック長は11セル(サイクリックデータ長0.5kバイト相当)程度が望ましい。この場合の伝送効率は88%である。

5. まとめ

産業分野での情報制御システムにおいて、その通信ネットワークには大容量リアルタイム通信、画像・音声などのマルチメディア統合、オープン化、広域/構内シームレス化、低価格化が求められている。このような状況の中で、ATM-LANの導入が検討されている。

本論文では、産業分野での制御情報システム、特に制御LANを対象として、スイッチ機能を各ノードに分散し、かつループ制御機構を組み込んだATM-LANを試作し、評価した。具体的には、ATMスイッチを活用してループ制御機構を実現するコネクション設定方法、また、ATMスイッチ多段接続によるデータの伝送遅延、特にリアルタイム性が要求されるサイクリック通信における伝送遅延時間の評価結果について述べた。

(平成11年12月06日受付、平成12年04月13日再受付)

文 献

- [1]特集：変革期の新しいニーズにこたえる産業用情報制御システム：日立評論、77,7(平7-7)
- [2]企業システムにATMを生かす：日経コミュニケーション、1995.8.21号
- [3]The ATM Forum：ATM USER-NETWORK INTERFACE(UNI) SPECIFICATION Ver.3.1('94)

- [4]浜田ほか：産業用高速光ループネットワーク「トランクネットワーク」：日立評論、69,11,pp.15-21('87)
- [5]Y.Du,et al.：ATM local area networks using distributed switch architecture：IEEE GLOBECOM vol.1994, No. Vol 3, pp.1832-1838('94)
- [6]鹿島ほか：プラント監視・制御用ATM-LANの実現方式：電子情報通信学会、1996年ソサイエティ大会 B-739
- [7]高橋、大倉、浜田：監視制御用ループ型ATM-LANのシステム構成の検討：電気学会通信研究会資料CMN-97-29(平9)
- [8]高橋、大倉、濱田：制御用ループ型ATM-LANのシステム構成と信頼度評価、電学論(C),119-C,7,pp.883-889(1999)
- [9]高橋、大倉、濱田：ループ型ATM-LANにおけるサイクリック通信の性能評価、電学論(C),120-C,2,pp. - (2000)予定

高橋 正弘 (正員) 昭42年東北大学工学部電気工学科卒業、同年(株)日立製作所に入社。以来、日立研究所にて、遠方監視制御システム、制御用LANシステム、通信会議システム、ナビゲーションシステムなどの研究・開発に従事。現在、同所技術主幹。電気学会、電子情報通信学会会員。工博。

大倉 敬規 (正員) 昭63年京都大学大学院工学研究科修士課程終了。同年(株)日立製作所入社、日立研究所勤務。制御用LANシステムの研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。

濱田 卓志 (非会員) 昭49年東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。日立研究所にて制御用LANの研究・開発に従事。平成5年から大みか工場にてネットワーク製品の開発に従事。