

ギガビットルータ Comet のアーキテクチャとその評価

陣崎 明[†]、中村 修[‡]、村井 純[‡]

[†] 新情報処理開発機構 並列分散システム富士通研究室

〒211-8588 川崎市中原区上小田中 4-1-1

E-mail: zinzin@flab.fujitsu.co.jp

[‡] 慶應義塾大学 環境情報学部

〒252-0816 神奈川県藤沢市遠藤 5322

E-mail: {osamu,jun}@sfc.keio.ac.jp

1. はじめに

「初めにルータがあった。ルータはインターネットと共にあり、ルータはインターネットであった。」¹

大規模計算機ネットワークにおいて、ルータはネットワークを構成し、情報の伝達を司る最も重要なインフラストラクチャの一つである。特にインターネットのように多様な装置によって構成されるネットワークではインターネットサービスの機能、性能など全てがルータによって支配されるといっても過言ではない。

近年、インターネットの発達はネットワークトラフィックの増大と共に応用の多様化を促し、その結果ルータに対する性能的、機能的要求は非常に厳しくなってきた。このためギガビットネットワークに対応できるルータは非常に限られているのが現状である。

これまでインターネット技術は UNIX を共通プラットフォームとした開かれた環境の上で開発されてきた。このオープン性がこれまでのインターネットの発展と普及の原動力であったし、今後も同様であることは間違いない。しかし、今後のインターネット研究においてギガビットネットワーク上で実用的な水準で利用することのできる研究開発プラットフォームが得られないとすれば、それはインターネット技術の発展のために大きな障害となるだろう。

そこで我々は高速なプロトコル処理機構をもつネット

ワークアダプタを標準的な PC や Workstation (WS) に搭載することにより高速なパケット処理性能を実現する Comet (Communication Enterprising Technology) を開発している [1]、[2]、[3]、[9]。現在、Comet プロトタイプの試作と評価をひととおり完了し、Comet によるギガビットルータ実現の目処がたった。

本論文ではまずインターネットルータの方式を概観し、ルータアーキテクチャの課題を整理する。次に Comet によるルータの実現方式を説明し、Comet プロトタイプの実現および IEEE1394/IP 機能の実装を用いた評価結果をもとに Comet によるギガビットルータの実現性を示す。

2. インターネットルータ

2.1. ルータをとりまく状況

かつて、ほんの 10 年前、インターネットのネットワークはたかだか 10Mbps の Ethernet であり、広域では Kbps 級の回線が中心であった。伝送品質も悪く、実効的な通信性能は低かった。アプリケーションとしても ftp、メール、ニュースなどの非リアルタイム通信が中心で、ある程度の応答性を要求するものはキャラクターベースの telnet くらいであった。このころのルータは UNIX マシンや安価な低速 CPU を用い UNIX のかわりに軽い専用 OS を搭載した専用ルータだったが、十分に実用的であった。特に UNIX マシンはインターネット研究者が技術の開発と実験を行うプラットフォームとして大きな役割を果たしてきた。

¹ In the beginning was the Word, and the Word was with God, and the Word was God. (John 1-1)

今日、インターネットを支える技術は長足の進歩をとげた。ネットワーク技術は Gbps 台の伝送性能と高い信頼性を実現しており、近い将来に 2~8Gbps 程度のコモディティネットワークが LAN 環境、WAN 環境をとわず利用可能となるとみられる（表 - 1）。

表 - 1 高速ネットワーク

ネットワーク	速度	状況	
Gigabit Ethernet	1Gbps x 2 (2Gbps)	既存	
Fibre Channel	1Gbps x 2 (2Gbps)	既存	
	2Gbps x 2 (4Gbps)	1998 年末	
	4Gbps x 2 (8Gbps)	2000 年以降	
IEEE 1394	400Mbps	既存	
	800Mbps	1998 年後半	
	1.6Gbps	2000 年以降	
	3.2Gbps	2001 年以降	
ATM	OC3	150Mbps x 2 (300Mbps)	既存
	OC12	600Mbps x 2 (1.2Gbps)	既存
	OC48	2.5Gbps x 2 (5Gbps)	1999 NGI

ネットワーク技術と同様にアプリケーション技術も日進月歩の発達をとげた。パーソナルコンピュータの発達と利用の拡大により高機能なアプリケーションが実現可能となり、それがインターネット利用の量的、質的な変化をもたらした。World Wide Web (WWW) 技術は大量の情報を容易に獲得する手段を提供した。この結果インターネットのユーザ数、トラフィックは日々激増している。また音声、画像などのリアルタイム通信への期待はインターネット全体の通信性能、通信品質の向上を促す強い要求となっている。同時にインターネットの利用拡大は通信の安全性に対する厳しい要求をもたらしており、認証、機密保持など従来に比べて格段に複雑な機能の実現が求められている。

以上のようなインターネットの量的、質的拡大に対応するためにはルータがそれらの要求を上回る性能的、機能的発達をする必要がある。このため今日のルータは機能単位にプロセッサを設けたり、マルチプロセッサ化したり、パケット処理専用のハードウェアを使用した専用システム化の方向にある。このことは誰もが使える高速なインターネット技術の研究開発プラットフォームがなくなりつつあることを意味する。一部のメーカーでしかギガビットネットワーク向けのルータを実現できないとすればそれは大きな問題である。

2.2. 従来のルータ

ルータの処理は経路の管理とネットワークから別のネットワークへのパケットの中継である。初期のルータにおけるパケット処理方式を図 - 1 に示す。ネットワークから受信したパケットはプロセッサに送られ、オペレーティングシステム (OS) あるいはアプリケーションプログラムが処理する。

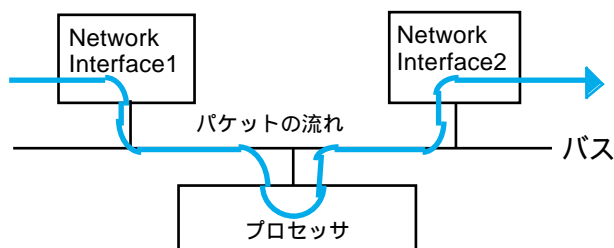


図 - 1 低速ルータ

このような方式ではバスとプロセッサが性能ネックとなる。特に UNIX ベースのルータでは汎用 OS のオーバヘッドが大きいので応答性に問題がある。例えば 1000Byte の UDP/IP パケットの処理に BSD/OS は約 16000 クロックを必要としており、100MB/sec のネットワーク (単方向) を使い切るには 1GHz 以上の Pentium が 100% の能力を必要とする [3]。Gigabit Ethernet のように双方向の場合は 2GHz の Pentium が必要である。今後プロセッサの処理性能は 1GHz 程度になると予想されるが、それでも Gigabit Ethernet に 100% 対応できないと考えられる。

2.3. ルータの高性能化

多くのネットワークや高速のネットワークを収容する高速ルータでは複数のネットワークインタフェースを搭載したアダプタ毎に専用プロセッサを設け、ルーティング処理をアダプタ内部で処理する方式を採用している (図 - 2)。

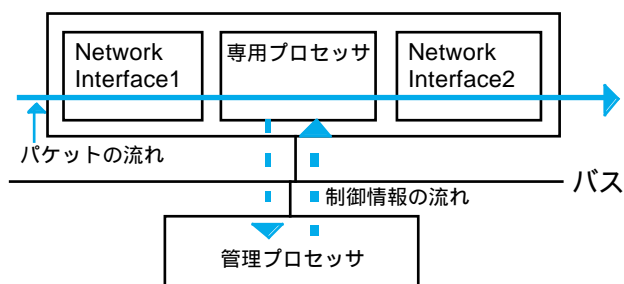


図 - 2 高速ルータ

図 - 3 に専用ルータの代表的な構成を示す [10]。専用ルータでは専用制御 CPU が経路を管理しアダプタのフォワーディングテーブルに経路情報を設定する。アダプタには専用プロセッサやフォワーディングハードウェアがあり、パケットを解析しフォワーディングテーブルの情報をもとにフォワーディングを行う。アダプタ間のパケット転送にはバックプレーンバスやクロスバススイッチを用いて高速低遅延な転送を実現している。

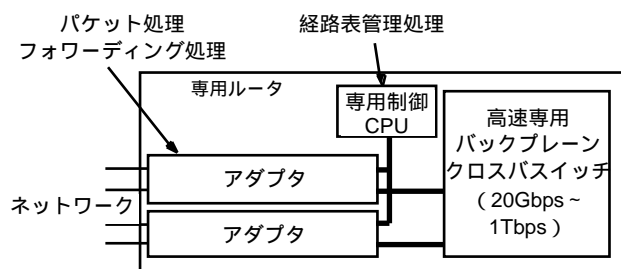


図 - 3 専用ルータの構成

このようなアーキテクチャは計算機でいえば超並列計算機に例えられる。専用化することにより非常に最適化されたシステムを実現できる一方、閉鎖的でスケラビリティに乏しい。特殊なハードウェアに依存するためコストが高くなりがちであり、IPv6 サポートのように大きな変更にはハードウェアそのものの交換が必要となる。当然ながらソフトウェアも専用であり、他の類似機能をもったソフトウェアとの融通性は小さい。このため他の装置との相互接続性に問題が生じ、ネットワークシステムを構築し、運用管理する時の大きな障害となる場合がある。

すでに超並列計算機はごく一部の専用システムを除いて陳腐化し、PC やワークステーション (WS) を高速ネットワークで結合したクラスタシステムにとってかわられつつあるが、専用ルータも同じ道を歩む可能性がある。

3. Comet ルータ

3.1. Comet ルータの構成

Comet によるルータの構成を図 - 4 に示す。標準的な PC や WS の I/O バスに Comet アダプタを搭載して単位となるルータ (ネットワークサーバ) を構成する。さらにネットワークサーバを標準高速ネットワーク用

の高速スイッチで結合することで柔軟なシステム拡張性を実現する。

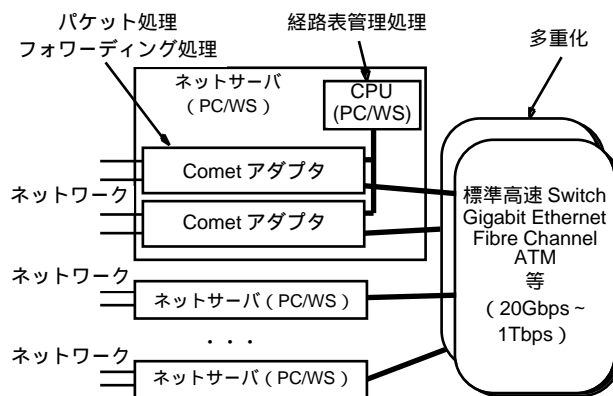


図 - 4 Comet ルータ

Comet では PC/WS の CPU でルーティングプロトコル処理など経路情報の管理を行い、Comet アダプタはパケットのフォワーディング処理やキュー制御処理などを行う。

PC/WS の CPU は UNIX などの OS のもとで経路情報やネットワークを管理する一般的なソフトウェアを動作させる。経路の更新があるとバスを用いて配下の Comet アダプタの経路情報を変更することでフォワーディング動作を制御する。

Comet ネットワークサーバ同士の経路情報の交換は分散共有メモリ方式を用いた効率的な方法で行う。一般に経路表の大きさは最も大きなバックボーンルータで 5~10 万経路といわれ、経路表を更新する負荷は大きな問題となっているが、このような並列分散計算機の技術を用いることにより、ルーティングプロトコル処理の負荷を軽減することが可能である [8]。

3.2. Comet アダプタ

Comet アダプタはネットワークインタフェースを複数搭載し、パケットをアダプタ内部で処理するためのプロセッサやハードウェアをもつ標準バスカードで、専用ルータのアダプタに対応する。バスに標準バスを用い、制御デバイスやネットワークインタフェースも標準バス準拠とすることでオープンプラットフォームで利用できる。

Comet の特徴はギガビットネットワークを処理するために、アダプタ内に専用のプロトコル処理エンジンを

もつところにある。プロトコル処理エンジンはアダプタに接続されたネットワークの送受信処理をホスト計算機と独立に実時間処理する。

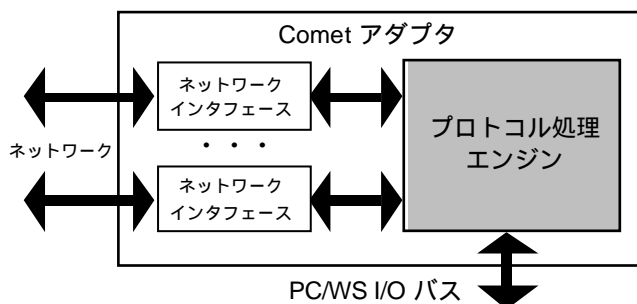


図 - 5 Comet アダプタの構成

3.3. プロトコル処理エンジン

高速なプロトコル処理機構はすでに専用ルータや Gigabit Ethernet クラスの NIC で実現されつつあり、これらの方式は専用ハードウェアによるもの（専用ルータ）とマイクロプロセッサによるもの（NIC）に大別される。

専用ハードウェアは高速処理が可能だが、ハードウェアでは複雑な処理を組み込みにくく、プロトコルの変更にも柔軟に対応できないという問題がある。FPGA（Field Programmable Gate Array）を利用して「プログラマブル」という場合があるが、現在の FPGA は万能ではなく、速度的にも機能的にも十分なレベルには達していない。一方、マイクロプロセッサは計算機インタフェース制御を含めて複雑な処理を実現でき、プロトコル変更にも柔軟に対応できる反面、性能的限界が問題である。これらの問題を解決するためには柔軟性をもちつつ高速の packets 処理を行なえる新しいハードウェアアーキテクチャが必要である。

Comet のプロトコル処理エンジンは汎用プロセッサとプログラマブルハードウェアからなる。汎用プロセッサはネットワークインタフェース、プログラマブルハードウェアの初期化や制御、ホスト計算機との通信を行う。プログラマブルハードウェア（図 - 6）は構成メモリを設定することによって動作を変更可能な有限状態機械である。チェックサム計算やテーブル検索など packets 処理に必要な機能ユニットを備え、packets を伝送速度で実時間処理する。データメモリに

は経路情報や packets バッファを置く。

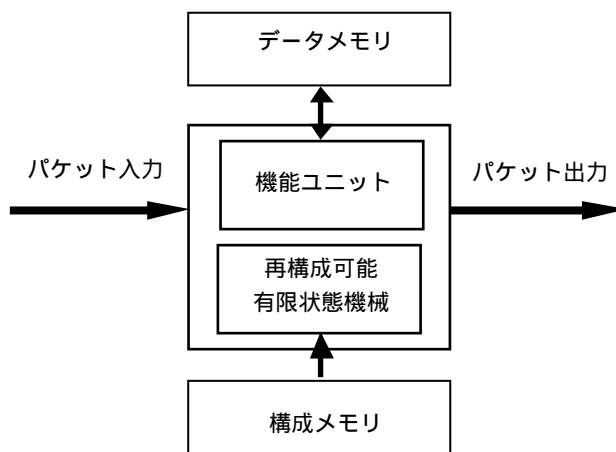


図 - 6 プログラマブルハードウェア

3.4. Comet のルーティング処理

Comet アダプタはネットワークから流れてきた packets を解析し、アダプタ内部に保持した経路表を検索し、フォワーディングを行う。この時、フォワーディング先が同一のネットワークアダプタ内部のネットワークであれば直接フォワーディングし、同一のネットワークサーバの別のネットワークアダプタのネットワークであれば標準バスを用いて転送し、別のネットワークサーバのネットワークであれば標準高速スイッチを介して転送する（図 - 7）。

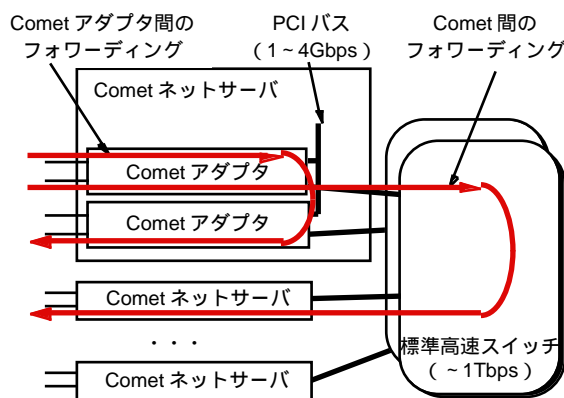


図 - 7 Comet でのルーティング

標準高速スイッチとしては Gigabit Ethernet など高速ネットワーク用のスイッチ製品を用いる。複数のスイッチを用いることにより、接続数、冗長構成などを自由に変更できるという、分散システムならではの利点が得られる上、低コスト化が可能である。また、専用ルータのように装置規模が制限されることはない。現在の高速な Gigabit Ethernet スイッチの遅延は 20~

40 μ 秒程度である。Comet アダプタが同程度の遅延を実現できるならば Comet ルータのルーティング遅延は 100 μ 秒程度となり、高速専用ルータ並みの性能となることが期待される。

4. Comet プロトタイプ

4.1. Comet アダプタ

図 - 8 に試作した Comet アダプタのブロックダイアグラムを示す。Comet アダプタは PCI (Peripheral Component Interconnect) 規格準拠の標準サイズボードで、PMC (PCI Mezzanine Card) 規格 [11] のネットワークインタフェースカード (NIC) を二枚搭載できる。I₂O (Intelligent I/O) アーキテクチャを採用しており、アダプタ内部の制御は専用プロセッサ (Intel i960RD) が行う。システム支援チップに計算機側とのインタフェースとしてハードウェア FIFO を複数設けており、パケットバッファ、制御コマンド、処理結果の受け渡しを非同期的に行うことができる [4]。

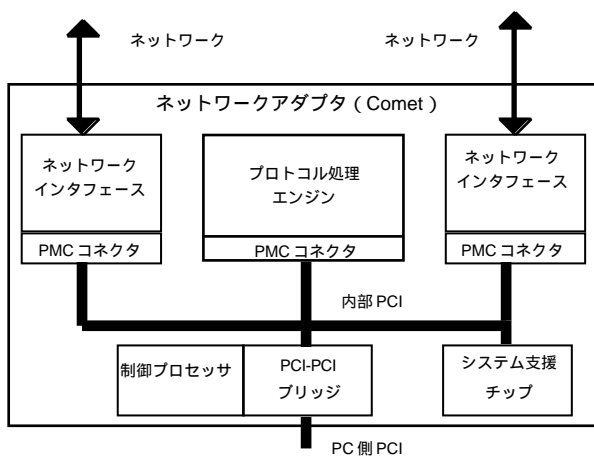


図 - 8 Comet アダプタ試作構成

表 - 2 に Comet アダプタの諸元を示す。

表 - 2 Comet アダプタ諸元

PCI バス	33MHz, 32bit	
プロトコル処理エンジン	Alpha 21066A Altera FLEX10K100	166MHz 33MHz
制御プロセッサ PCI ブリッジ	Intel i960	66MHz
ネットワーク インターフェース	Fast Ethernet	100Mbps
	ATM	155Mbps
	IEEE1394	200Mbps
	Gigabit Ethernet	1Gbps

Comet アダプタ内でパケット処理を高速に行うプロトコル処理エンジンとして 166MHz の 64bit RISC および FPGA (10 万ゲート相当) を用意した。これらはおもに Comet アーキテクチャの評価用であって、実用化段階ではプロトコル処理エンジン全体を ASIC 化する予定である。

現在のところプロトコル処理エンジンが実現すべきネットワーク処理機能の評価を RISC を用いて行っており、IEEE1394/IP、IP/IEEE1394、IP/ATM、IP ブリッジの機能を試作した。RISC ソフトウェアは OS をもたず、メインループを構成するプログラムコードが 8KB のオンチップキャッシュにおさまるよう最適化している。データメモリは 8MB である。プログラマブルハードウェアは FPGA で試作しており、PCI 上のバースト転送を読み取り、データを解析してチェックサム計算などを行う機構を実現した。33MHz の PCI バスクロックで動作し、データ処理性能は最高 133MB/秒である。

ネットワークとして WAN では ATM OC3、LAN では FastEthernet、IEEE1394、Gigabit Ethernet を準備した。PMC 準拠の NIC を利用することにより、多種のネットワークに容易に対応できるが、それぞれの NIC 用のドライバが必要となる。またネットワークの制御とデータ転送を一つの PCI バスを用いて行うため、PCI アクセス競合が性能上の問題となる。現在は RISC がデバイス制御とパケット処理を行い、2 個のネットワーク DMA とパイプライン的に動作するように調整している (図 - 9)。

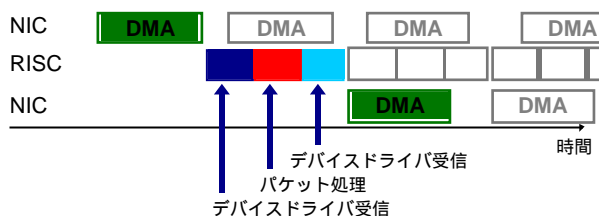


図 - 9 デバイスドライバ処理

4.2. Comet の処理性能

試作した Comet アダプタの基本的なパケット処理能力を評価することを目的として IEEE1394/IP 機能を試作し、LAN および WAN での通信実験を行った [2]。

IEEE1394 [12]は PC の周辺機器接続用に開発されたネットワークであって、接続距離や接続台数が限られるが、低コストな高速通信メディアである上に、LAN で一般に用いられる非同期通信と同時に実時間通信を実現する Isochronous モードをサポートするという大きな特徴がある。現在は Digital Video (DV) 装置の接続に 100Mbps の IEEE1394 が多く利用されている。

DV は 125 μ 秒ごとに平均 500byte 弱 (約 34Mbps) のデータを IEEE1394 Isochronous モードを用いて転送する。このパケットを IP パケットにカプセルリングし、IP ネットワークを用いて転送する。受信側では逆変換を行い IEEE1394 Isochronous モードで送信する。IEEE1394/IP を用いることで、接続距離や接続台数の制限を取り除くことができる[5]、[6]、[7]。

Comet アダプタの RISC により IEEE1394/IP のパケット変換処理およびブリッジ機能を実現したところ、NIC の制御も含めた全処理時間はパケットあたり 40 μ 秒以下だった (表 - 3)。

表 - 3 Comet アダプタ評価結果

処理	モジュール	処理時間 (μ 秒)	
プロトコル処理	IP カプセル	6.6	12.4
	ブリッジ	5.8	
デバイスドライバ	IEEE1394	9.1	23.9
	Fast Ethernet	6.6	
	ホストとの通信	8.2	
合計		36.3	

スルーブットでみると、Comet アダプタは 25000 パケット / 秒程度のフォワーディング能力をもつ。これは平均 500 バイトのパケットを処理するとして 100MB/秒に相当し、Gigabit Ethernet の単方向のトラフィックを 40 μ 秒の遅延で完全に処理できる性能である。

以上の結果から、Comet ルータにおけるルーティングの遅延合計は Comet アダプタ スイッチ一段 Comet アダプタのフォワーディング経路で約 100 μ 秒となる。この性能は現在の高速専用ルータに匹敵し、Comet がギガビットルータの素材として利用可能であることがわかる。

4.3. 専用ルータとの比較

DV 信号は高速で高精度なトラフィックソースと考えることができ、これを用いてネットワーク性能の定性的、定量的評価を容易に行うことができる。そこで Comet 直結の場合と専用ルータを間に挿入した場合とで DV パケットの到着間隔のゆらぎ (ジッタ) を測定した (図 - 10)。測定にあたっては可能なかぎり純粋なフォワーディング性能を調べるため、専用ルータはスタティックルートを設定し、フォワーディングキャッシュが常にヒットするように配慮した。一方、Comet はラーニングブリッジの機能を含んでおり、パケットのヘッダチェック、ブリッジテーブルのハッシュ検索、検査結果によるフィルタリングを実行している。

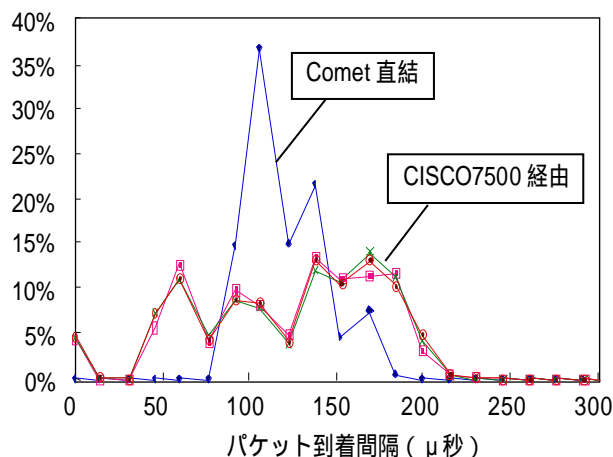


図 - 10 IEEE1394/IP ジッタ

測定の結果、Comet 直結ではほぼ 70%以上のパケットが 125 ± 25 μ 秒の間隔 (ジッタゼロ) で転送されることがわかった。Comet の場合、全てのパケットはほぼ一定の処理時間で処理され、変動要因としてはパケットを受信してから処理するまでの遅延しかない。このジッタは平均 20 μ 秒以下と考えられる。

一方、専用ルータ経由ではジッタゼロパケットが 30% 以下となる。また、50%以上のパケットが 125 μ 秒以上の間隔で到着するためバッファリングなどの対処をしなければ DV 再生はできないことがわかる。Comet と専用ルータでは実現されている機能に大きな違いがあるし、専用ルータの処理内容が不明なので単純比較することは危険であるが、このようにジッタのばらつき

きが大きいルータによる現在のインターネットでは一般に DV データの通信は困難と考えられる。

このことは WIDE Project のバックボーンを利用した広域での IEEE1394/IP 転送実験 (図 - 1 1) で検証できた。現在のインターネットでは百万パケット / 秒台の性能を誇る最新のルータを用いた場合であっても限定的にしかバッファリングなしの DV 転送には使えない。例えば一方向の画像転送に限定するとある程度の品質で通信できる場合があるが、双方向ではほとんどの場合画像が乱れてしまう。

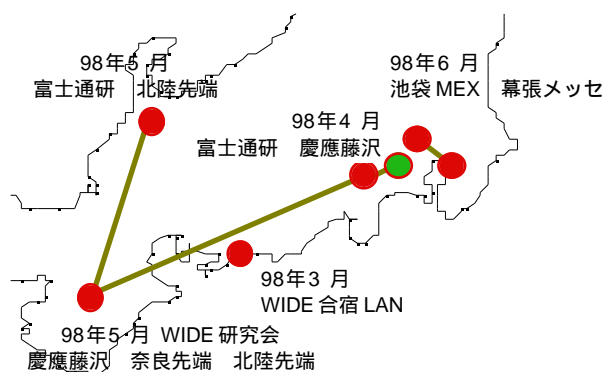


図 - 1 1 IEEE1394/IP 実験

次世代インターネットでは高速、高品質な IP ネットワークの実現が期待されている。DV 転送はそのような高速 IP ネットワークの品質を評価する一つの尺度であり、これを実現することは将来への第一歩といえよう。

5. 処理性能の改善

Comet アダプタ試作評価の結果をもとにして、処理性能の改善がどの程度可能かを検討した。

処理性能上で最大の問題は PCI 性能である。すでに述べたように Comet アダプタは 25000 パケット / 秒程度の処理能力をもつが、32bit/33MHz の PCI がネックとなるため最高でも 50MB/秒程度のスループットしかだせない。また、デバイス制御の PCI アクセスが DMA との競合によって μ 秒単位で遅れることがあり、パケット処理のジッタを発生させる要因となっていることがわかった。この問題に関しては PCI を 64bit 化、66MHz 化することで Gigabit Ethernet 程度までは対応可能となる見込である。またプロトコル処理エンジン

に NIC 毎に PCI を設けることにより、PCI アクセスの競合を削減する必要もある。

もう一つの問題は、NIC として PMC 規格の標準品を採用したため、これを PCI を介して制御するオーバヘッドが大きいことである。一般に NIC を制御するためにはディスクリプタと呼ばれる構造体をメモリに準備し、NIC にこのディスクリプタの配列を渡してパケット転送 (DMA) を行わせる。このような制御方式は本来ソフトウェア制御を想定したものであって、ハードウェア制御には適さない。このデバイス制御の問題はネットワークデバイスの制御方法が統一化されていない現状では困難な問題である。この問題を解決する一つの方法として、デバイスの初期化や異常処理はソフトウェアで処理し、通常のパケット送受信処理はハードウェアで処理する方法が考えられる。Comet のようにネットワーク DMA をプロトコル処理エンジンが実時間処理する方式では DMA データをバッファリングすることなく直接処理する。そこでバッファアドレスとしてプロトコル処理エンジンの DMA 処理ポートを設定した固定的なディスクリプタを準備しておき、これをネットワークデバイスのディスクリプタアクセスに応じて DMA させることにより、ソフトウェアの介在なしにパケットの送受信を行うことができる (図 - 1 2)。このようなハードウェアはプログラマブルハードウェアで容易に実現できる。

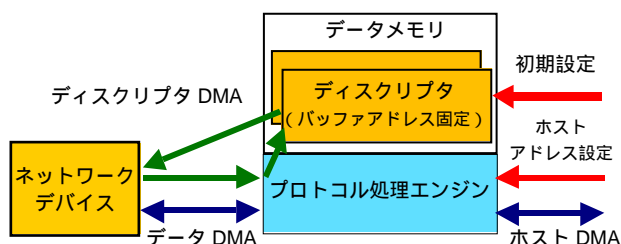


図 - 1 2 ディスクリプタ処理の高速化

以上の検討の結果を表 - 4 にまとめる。

表 - 4 Comet 高速化

処理	現試作	改善後
プロトコル処理	12.4 μ 秒	2 μ 秒
デバイスドライバ処理	24.0 μ 秒 (8.0 \times 3)	3 μ 秒 (1 \times 3)
合計	36.4 μ 秒	5 μ 秒

今後プロトコル処理エンジンをプログラマブルハードウェア化することにより、プロトコル処理は 2 μ 秒以下の遅延で実現できると予測している。デバイス制御については、パケット送受信のディスクリプタ処理をハードウェア化することでデバイス当たり 1 μ 秒程度で処理可能となる。まとめると現在の 10 倍程度の性能が実現でき、ルータとしての遅延合計は 50 μ 秒以下となることが期待される。

6. おわりに

「ルータによってすべてはでき、ルータによらずしてできたものは何もなかった。」²

ギガビットネットワークの時代においてルータをどう構成し、その上でどのように機能を実現していくかは次世代インターネットの基盤を形成する重要な課題である。実用的なレベルで研究プラットフォームとして利用できる新しいルータが強く求められている。

Comet はネットワークアダプタに高速のパケット処理機構を組み込み、これを標準的な PC や WS に搭載することによりギガビットネットワークに対応可能なルータを実現する。試作した Comet アダプタはプロトコル処理エンジンに RISC を用いたソフトエミュレーションで 40 μ 秒/パケットのパケット処理能力を実現しており、IP ネットワークにデジタルビデオデータを流すような従来にない高速、低ジッタの通信を実現できる。今後プロトコル処理エンジンを FPGA、ASIC 化することにより、5 μ 秒/パケット程度の処理が可能となる見込である。

Comet は標準バス用の I/O カードである Comet アダプタを標準的な計算機にアドオンして構成される。すなわち任意の部品を組み合わせたシステムを低コストで構築可能である。開発者は Comet アダプタをプログラムすることにより、好みの OS のもとで高速のネットワークアプリケーションを実現できる。Comet は実用システムであると同時に、これからのインターネット技術を開発していくプラットフォームとなることを目指している。

参考文献

- [1] 陣崎、林、中村、村井：大規模広域並列分散システムの実現を目指す超高速インターネットの構想、信学技報 CPSY97-61, 1997 年 8 月
- [2] 陣崎、河合、小林、古賀、下國、水野、中村、村井：ネットワークサーバ (Comet) による実時間ストリーム通信処理の実験、RWC 技術報告書 (TR-98001), 1998 年 6 月
- [3] 陣崎、中村、村井：並列ネットワークサーバ Comet のアーキテクチャとその応用、信学技報 CPSY, 1998 年 8 月
- [4] 河合、下國、都筑、竹原、陣崎：Comet のハードウェア試作と性能評価、SWoPP'98 CPSY, 1998 年 8 月
- [5] 古賀、陣崎：IEEE1394 バスの計算機ネットワークへの適用、並列処理シンポジウム JSPP'98 論文集 p.158, 1998 年 6 月
- [6] 古賀、陣崎：Comet による IEEE1394 を利用した計算機ネットワークの構築、SWoPP'98 CPSY, 1998 年 8 月
- [7] IEEE1394 によるネットワーク相互接続実験、WIDE プロジェクト 1997 年度年次報告書, 1998 年 3 月
- [8] 水野、陣崎：Comet による分散共有メモリの提案とその評価、SWoPP'98 CPSY, 1998 年 8 月
- [9] <http://www.pds-flab.rwcp.or.jp/>
- [10] <http://www.cisco.com/warp/public/733/12000/>
- [11] <http://www.info.cern.ch/ce/ms/mezzanines/>
- [12] <http://www.1394ta.org/>

2 Through Him everything came into being and without Him nothing that exists came into being. (John 1-3)