

【コミュニケーションのためのVR】

コミュニケーションのためのVR

ギガビットネットワークをはじめとする次世代インターネットの研究開発が急ピッチで進められています。高速、大容量でリアルタイム性も重視したこれらのネットワークを使ったアプリケーションの一つとして、VRやAR、テレイクソスタンスを用いた空間伝送が挙げられています。本特集では、専門家の先生方にこれらの現状と課題について解説していただきました。



ギガビットネットワークとVR

青山友紀  
東京大学



1. はじめに

インターネットの進展によって我々は世界に分散する情報に瞬時にアクセスする強力な手段を手に入れるとともに、自らも世界に情報を発信することが可能となった。21世紀にはこのような情報共有手段が一層進歩する一方、

図1に示すように我々の知的活動環境そのものを共有し、互いに離れた場所において協調して研究開発、設計、教育などを行う技術が進歩すると考えられる。そのためには多くの課題を解決する必要があるが、互いに離れたVR空間を高速ネットワークで接続する技術は重要な課題の一

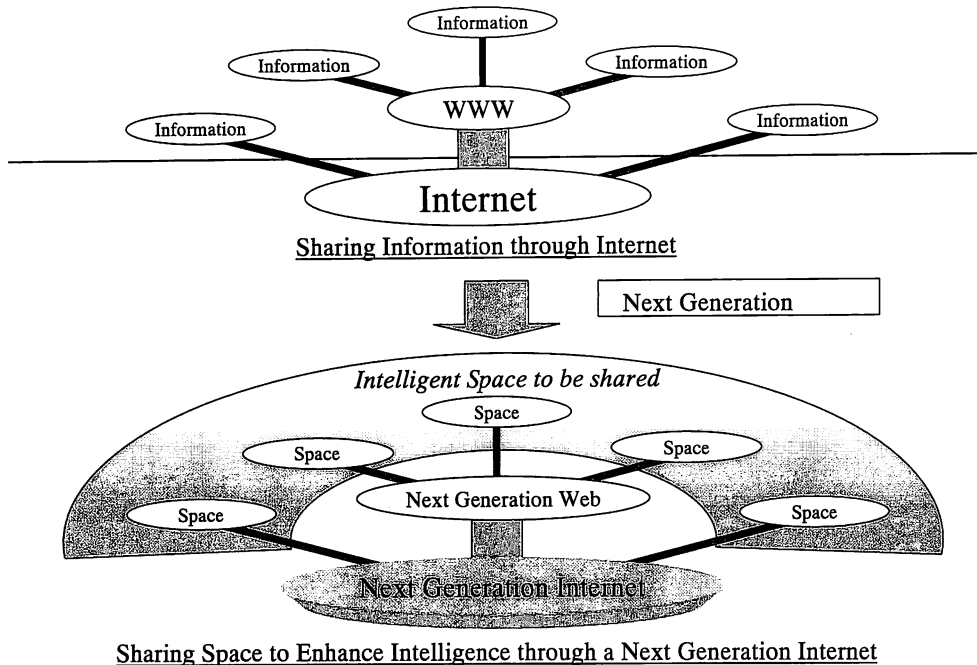


図1 知的活動空間のネットワークングによる共有

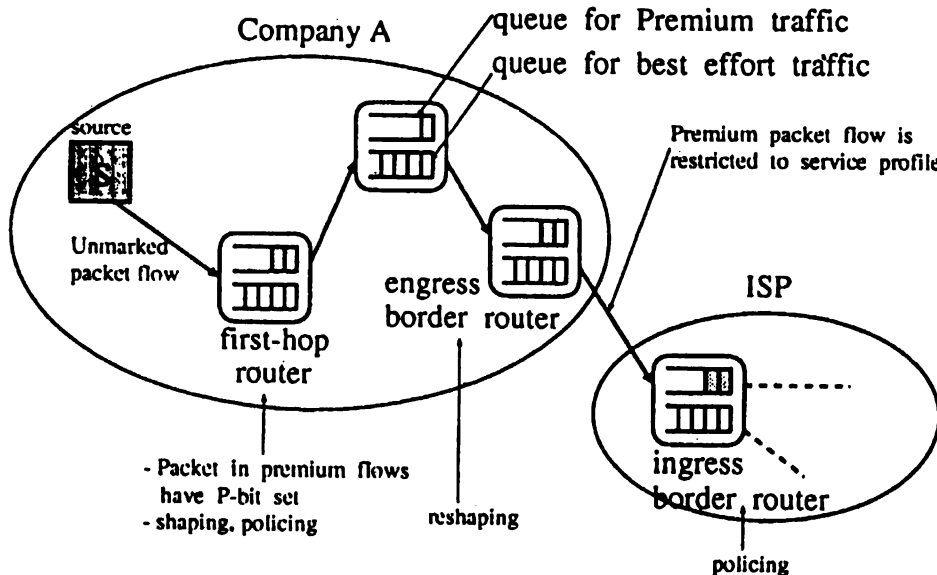


図2 Diff-Serv を用いたインターネットの複数 QoS の実現法

つである。VR 空間をネットワークするには現行のインターネットではまったく不十分であり、次世代のインターネットが必要である。本稿では次世代インターネットの技術課題およびその研究開発のテストベッドとして構築されたギガビットネットワークについて紹介するとともに、3次元 VR 空間をネットワークする研究について述べる。

## 2. 次世代インターネット

「次世代インターネット」という用語が頻繁に用いられるが、使用する人によってその意味する内容は様々である。その理由は現在のインターネットで直面している課題、あるいはインターネットの拡大によって予想される問題、が解決されたネットワークを指して次世代インターネットと呼ぶからである。代表的なものを下記に示す。

### (1) 複数の QoS を提供できるインターネット

現在のインターネットは「ベストエフォート」と呼ばれる一種類の QoS (Quality of Service: サービス品質) を提供するのみであり、品質の確保はホスト間のプロトコル (例えば TCP プロトコル) に頼っている。これではリアルタイム性が必要なストリームメディア (音声、音楽、動画像など) のサポートが困難であり、また帯域を共用するため輻輳時には一律にパケット転送性能が劣化する。次世代インターネットでは自由席に加えて座席指定のようなサービスが必須と考えられる。ベストエフォートを超える QoS を提供する技術としては、(a) Guaranteed Service, (b) Differentiated Service (Diff - Serv)、の2つの形態の手法が研究されている。これらの技術は21世紀の情報インフラ

となる次世代インターネットに必須のものであり、その研究開発は現在最もホットなトピックである。

インターネットにおいて転送品質 (パケットの転送時間、パケット転送時間の揺らぎ、パケット損失率、等) をあるレベル以上に保つためには転送する情報量に応じた帯域を確保し、それを占有する必要がある。コネクション型ネットワークの電話網ではそれが行われているが、コネクションレス型のインターネットではネットワークの帯域は共用されるので品質は保証されない。そこで Guaranteed Service は QoS を保証するためにネットワークの帯域を予約する。そのためのプロトコルとして RSVP (Resource Reservation Protocol) (1) がインターネットの標準化母体である IETF において標準化された。RSVP はネットワーク帯域の予約に送受信間で複雑な手順を用いるため、予約処理が重い、帯域予約に時間がかかる、インターネットのように大規模なネットワークに適用する場合のスケラビリティに問題がある、などの理由により実際にインターネットで用いられるに至っていない。

一方、Guaranteed Service を実現する他の手法として Media Cruising Protocol (MCP) (2) というプロトコルが提案されている。本手法では帯域の予約に RSVP のような複雑な手順は用いないで、IP レイヤにおいて予約が必要なフローにマークを付けそれを検出するとルータは ATM スイッチを制御して ATM レイヤで必要な帯域を予約し、そのフローは予約した ATM 上の帯域を占有する。本方式は RSVP 方式より簡単で高速な予約が可能である。後述する3次元 VR をネットワークする実験には本 MCP を用いている。

これに対して Diff-Serv<sup>(3)</sup> は QoS を保証するためにネットワークの帯域を確保することは行わない。その代わりに、ファーストクラス、ビジネスクラスのように複数のサービスクラスを設け、ファーストクラスの packets から優先的にルーティング処理を行う。そのために packets ヘッダに優先度を示すマークを付け、ルータでは図2に示すように優先度に応じてバッファを分離し、高優先度バッファの packets を優先的に処理する Premium Service や、バッファは共通とし、高いサービスクラスのタグを有する packets から優先的に処理する Assured Service などがインターネットの IETF や後述する Internet2 プロジェクトで検討されており、それらを実装したシステムで実験が行われているところである。Diff-Serv は帯域予約をおこなわないので QoS の完全な保証は出来ないが、より高いサービスクラスの packets は相対的に良好な品質が得られる手法であり、現在のルータに機能追加することで、実現可能であり、また複数の ISP で協定して Diff-Serv を運用することによりスケラビリティの問題も解決可能であるため、現在最も有望な方法として競って開発が行われている。

## (2) アドレス数制約の解消 (IPv6)

インターネットのホスト数は図3に示すように世界で4500万を超え、まもなく1億ホストに達すると予想される。これに応じてアドレス数の不足が問題となり IETF においてアドレス空間を32ビットから128ビットに拡大する次世代 IP プロトコル、IPv6 が標準化された。この IPv6 は現行 IPv4 に比べて階層的アドレス構造、セキュリティ機能、プラグアンドプレイ機能などより高度な機能を備えており、IPv6 を実装したインターネットを次世代インタ

ーネットと呼ぶこともある。IPv6 を実証するために 6Bone<sup>(4)</sup> と呼ばれるテストベッドが稼動している。

## (3) マルチキャストのサポート

多くの受信者に同一の情報を転送するマルチキャスト機能はインターネットを用いた会議サービスや音楽や映像配信サービス、ニュース配信などのプッシュ型サービスを提供するために重要である。ストリームメディアを対象とするリアルタイムマルチキャスト、データをマルチキャストするリライアブルマルチキャストなどのプロトコルが従来より研究されており、IP マルチキャストのテストベッド Mbone<sup>(5)</sup> で実験が行われている。QoS を保証する効率的なマルチキャストプロトコルの研究は次世代インターネットの重要課題である。

## (4) モビリティの提供 (Mobile-IP)

携帯電話の発展は驚異的であるが、今後通話ばかりではなく、インターネットを用いたモバイルサービスは次世代インターネットで必須のサービスである。IP packets にモビリティを与える Mobile IP<sup>(6)</sup> の研究が活発に行なわれている。モビリティを与えるためにワイヤレスリンクを導入すると、フェージングなどによるバーストエラーの影響、周波数資源の制約による低転送速度、移動中のルーティング保持のためのハンドオーバー、など有線ネットワークとは異なる環境で IP packets を転送する技術を開発する必要がある。さらに Location-aware サービスや Environment-aware サービスを提供するためのより高度なネットワークアーキテクチャやプロトコルの研究が行われている。

## (5) 超広帯域上のインターネット (IP over WDM)

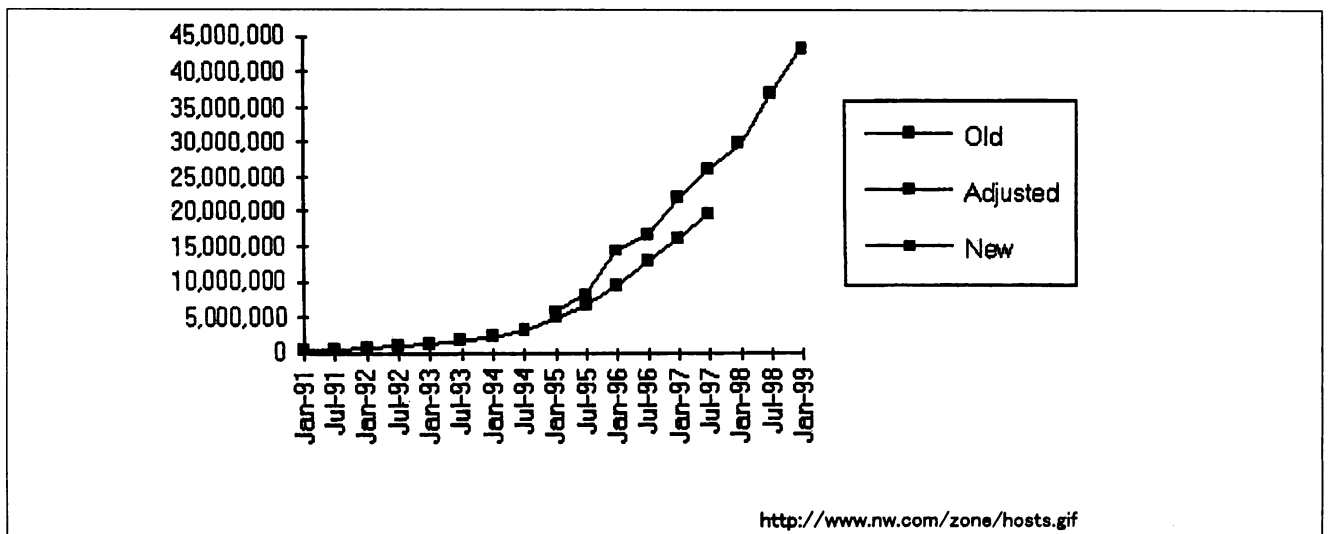


図3 インターネットに接続されるホスト数の拡大

IP トラフィックの爆発的な増加

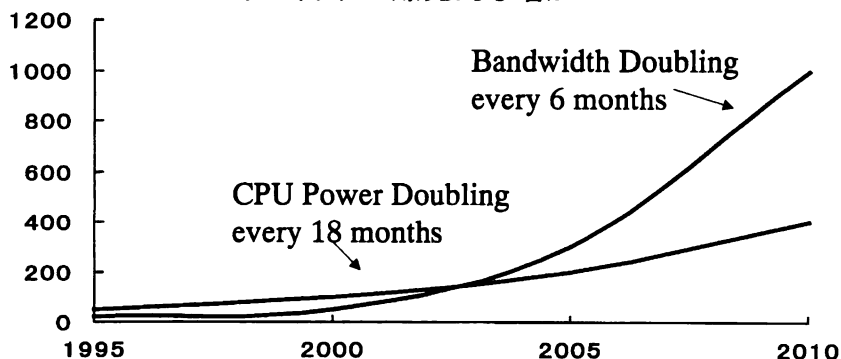
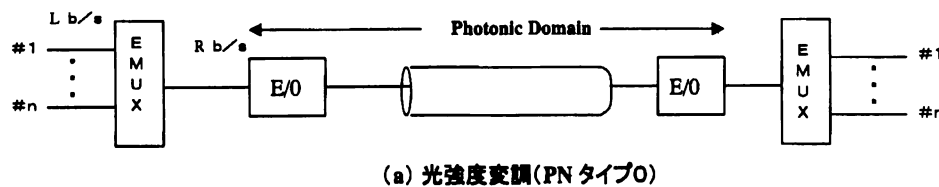


図4 ネットワーク帯域 vs. Mooreの法則

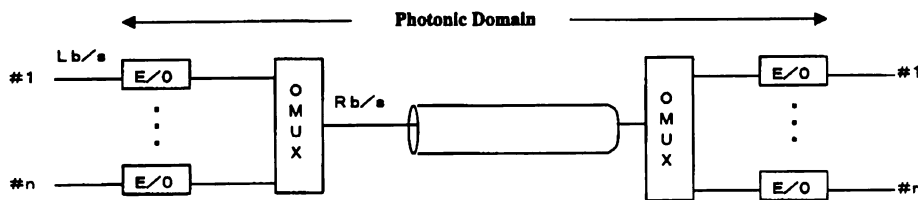
インターネットの爆発的な拡大によって必要となるネットワーク帯域の増加は、図4に示すように、産業の米であるLSI技術の進歩を示す「Mooreの法則」をはるかに上回るといわれている。これは将来の帯域拡大はLSIの進歩では追いつかず、別のデバイス技術に頼る必要があることを物語っている。それは光デバイスであり、それによって実現される Photonic Network (PN) が次世代インターネットには必須である。図5 (a) において入力速度と多重度が拡大し、転送速度  $R$  が  $100\text{Gb/s}$  程度になると、電子デバイスの動作限界を上回り電子回路では実現できなくなる。そこで同図 (b) のように光デバイスで多重化回路を構成することを考える。光多重化 (OMUX : Optical Multiplex) として複数の波長を用いて多重化、多重分離する方法を WDM (Wavelength Division Multiplex) と呼ぶ。現在、16 ~ 32 の波長を用いる WDM 伝送方式が米国では導入されつつある。近い将来、ファイバー1本で  $64 \text{波長} \times 10 \text{ Gb/s} = 640 \text{ Gb/s}$  程度の容量の WDM が導入さ

れると予想され、さらに  $1 \text{ Tb/s}$  に達する容量の WDM が研究されている。WDM は多重化の機能を光で処理することによって電子デバイスの速度限界を克服する技術であるが、このように転送機能 (多重化/多重分離、クロスコネク、スイッチング、ルーチングなど) を光で処理するネットワークを PN と呼ぶ (7)。

インターネットの容量が拡大するとルータからの IP パケットトラフィックが1波長を占有することになる。こうなると、ルータと WDM を直結し既存の電話網を構成するネットワーク装置をバイパスしてネットワークの経済化を図ることが考えられる。その場合 IP パケットを光波長にのせる方法が図6に示すようにいろいろ研究されている。これを総称して IP over WDM と呼ぶが、これは PN の一形態である。さらにインターネットのトラフィックが増加するとルータ出力がファイバー1本を占有することになる。こうなるとルータに WDM 機能を含み、ルータとルータがファイバー (+ 光増幅器) で直結されることになる



(a) 光強度変調 (PN タイプ0)



(b) 光多重化 (PN タイプ1)

図5 フォトニックネットワークの例

が、ルータのスループットはテラビット/秒のオーダーとなり、いずれ電子回路での実現が困難となる。したがってルータのルーティング機能の一部を光処理で実現する光・電子ハイブリッド構成のテラビットルータが必要になる。

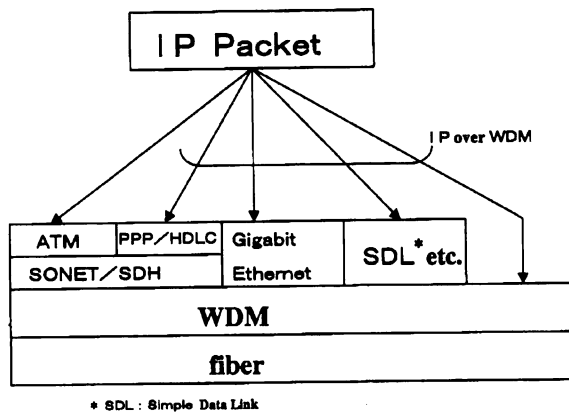


図6 IP over WDMにおけるレイヤ構造

(6) 柔軟なインターネット (Active Network)

21世紀の情報インフラとしての次世代インターネットでは多種多様なトラフィックを効率的にサポートする必要がある。また、ユーザはどのような環境にいてもインターネットのサービスを受受したい。このような要求条件を満足する柔軟なネットワークの構築を目指してアクティブネットワーク(8)の研究が行われている。アクティブネット

ワークはIPパケットにルータで処理する命令を搭載して転送し、ルータではその命令に従った処理を実行する。このようなプログラマブルなルータを導入し、ホストからの指令にしたがってネットワークのパラメータを制御あるいは規定することによって、例えば、ユーザが利用可能なネットワーク帯域に応じ映像符号化速度の変更、ワイヤレス/ワイヤード環境への適応、新しいサービスの素早い追加、などの柔軟性を実現する。アクティブネットワークはまだリサーチ段階にあるが、次世代の柔軟なネットワークの実現には重要な課題である。

3. 次世代インターネットプロジェクトとギガビットネットワーク

インターネットで世界をリードした米国は情報通信のパラダイムの変化を先導してきたが、さらに次世代インターネットをリードする者が21世紀の覇者となる、との認識のもとに、米国政府のプロジェクトであるNGI (Next Generation Internet) Initiative、および大学連合で次世代インターネットの研究を推進するInternet2プロジェクトがそれぞれ活発な研究開発を展開している。

Internet2は米国の主要な大学百数十校が参加するコンソーシアムであり、プロジェクトを運営するUCAID (University Consortium for Advanced Internet Development) という団体を設立した。Internet2はvBNS(9)およびAbilene(10)

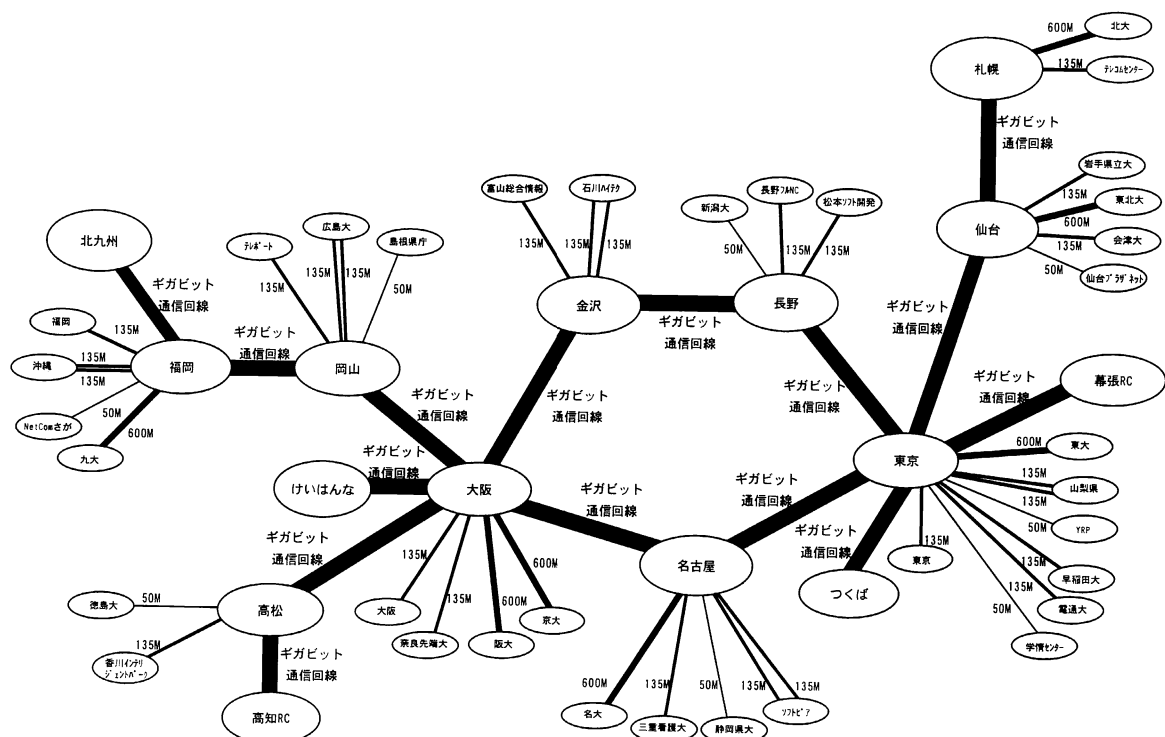


図7 ギガビットネットワーク(JGN)の接続構成

という高速ネットワークをテストベッドとして利用している。

一方、日本では郵政省の1998年度補正予算で構築されたギガビットネットワーク (JGN: Japan Gigabit Network) が稼動し始めたところである。JGNは図7に示すように北海道から沖縄までをカバーする全国規模のネットワークテストベッドである。そのバックボーンは最大2.4 Gb/sであり、米国の次世代ネットワークテストベッドであるvBNSやAbileneと遜色のないテストベッドである。10個所にATMコアスイッチ、35個所にATMエッジスイッチが設置され、ユーザはATMネットワークとして、あるいはIPネットワークとして利用することができる。筑波、京阪奈、北九州に共同利用施設が設置され、また幕張と高知に通信・放送機構 (TAO) が保有するギガビットリサーチセンターが設置された。JGNは、TAOに研究提案を行い認められればだれでも利用することができる。ただし、35個所に設置されたATMエッジスイッチまでのアクセス回線は利用者が手当てしなければならない。現在、研究提案が行われており、また、2個所のJGNリサーチセンターによる研究も開始されている。図8にJGNの構成を示す。

<b>Bandwidth</b>	<b>≥ 1. 2Gb/s (OC-48 max)</b>
<b>Physical Layer:</b>	<b>Single Wavelength (Back Bone) WDM(2 Local Loops)</b>
<b>UNI:</b>	<b>ATM (155/622Mb/s) PVP/PVC/SVC CBR/UBR, VBR/ABR/GFR(Step 2) IP (over ATM), LANE, MPOA</b>
<b>ATM Core Switch:</b>	<b>NS8000/GX550</b>
<b>Edge Switch:</b>	<b>ATOMIS7/ASX1000</b>
<b>Router:</b>	<b>CISCO 7513/7507</b>
<b>LAN:</b>	<b>Fast Ethernet/Fiber Channel/Wireless LAN</b>

図8 ギガビットネットワークの主要構成

米国の2つのネットワークテストベッドvBNS、AbileneとJGNを比較すると、vBNSとJGNはレイヤ2にATMを利用し、その上でIPパケットを転送するIP over ATMタイプのネットワークであるが、AbileneはATMを用いず、SONETの多重化フレームにIPパケットをマッピングして転送するIP over SONETタイプのネットワークである。これに対してカナダのネットワークテストベッドであるCA\*net3<sup>(11)</sup>は上記の2(5)で述べたIP over WDM型のネットワークを構築すると称している。日本においても早急にIP over WDMのネットワークテストベッドの構築が望

まれる。

#### 4. 全天周型3次元VRスペースのネットワーキング

図1のように遠隔のユーザ同士が同じ仮想空間を共有して、会話したり仕事をしたりする環境を実現するサービスは従来より多くの研究が行われてきた。例えば臨場感テレビ会議はこちら側の実空間と相手側の仮想空間を結合して、あたかも同一の場所で会議をする環境を実現するものである。また、例えばNTTが開発したインタースペースはWSやPCの画面上に仮想空間を表示し、その空間にアクセスしたユーザのアバターを仮想空間上に表示し、そのアバターが自分の分身として仮想空間に入り込んで仮想モルでショッピングをしたり、他のアバターと街頭で出会って会話したりする環境を実現している。

一方、より高度な仮想空間を実現する手段としてイリノイ大学のDeFantiらがCAVE<sup>(12)</sup>を開発した。2m四方程度の部屋の各面 (CAVEでは4面) にステレオ画像を投射し、中にいるユーザはシャッター眼鏡を用いて3次元CG画像で構成された空間の中に没入する感覚が得られる。このような全天周型バーチャルリアリティ空間をDeFantiらはimmersiveな環境とよび、これをネットワークで結合し、遠隔のimmersive空間を共有するアプリケーションをTele-immersion<sup>(13)</sup>と命名した。このような形式の全天周型VR空間はその後多くの研究機関で開発、導入されている。東京大学にはCABIN<sup>(14)</sup>と呼ばれる5面構成の大型装置が設置されており、これを用いて理工系研究者ばかりでなく心理学など文科系の研究者もバーチャルリアリティおよびその応用の研究を行っている。このCABINとイリノイ大学のCAVEを図9に示すように高速回線で結合し、tele-immersionを実現するプロジェクトN\*VECTOR (Networked Virtual Environment Trans-Oceanic Research)<sup>(15)</sup>がスタートしている。N\*VECTORプロジェクトは東京大学、イリノイ大学および日米回線を提供しているNTT3者の共同研究プロジェクトであり、そのねらいは以下の通りである。

- (1) CAVE用コンテンツとCABIN用のそれを互いに表示できるように共通化すること。
- (2) 共通化したコンテンツデータを高速転送するプロトコルの開発。
- (3) 3次元CG画像に、実写映像人物像をマージして遠隔の空間にいる人物があたかも同じ空間に存在する環境の実現。
- (4) ネットワークで結合された全天周型VR環境のアプリケーションの開発。

- Interconnection of remote 3D-VR spaces
- Evaluation of new transfer protocols
- Experiments of collaborative works using a connected virtual space

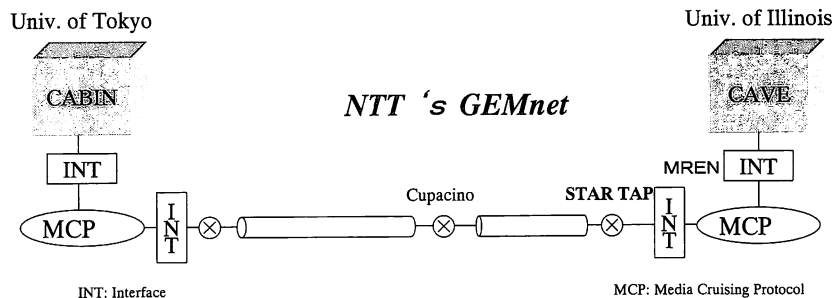


図9 Networking Virtual Spaces

本プロジェクトの特徴は、VRの研究者、ネットワーク研究者およびアプリケーションの研究者が一体となって研究を推進することにある。筆者のようなネットワーク研究者の立場からは、全天周型VR空間をネットワークする場合にネットワークはどのような性能を要求されるかに興味がある。図10に示すように転送すべきデータは、

- 3次元CGデータ：大容量データの非リアルタイム転送
- コントロールデータおよび位置情報データ：リアルタイム転送
- 実写映像データ：リアルタイム転送
- 音声、オーディオデータ：リアルタイム転送

であり、各々のデータ容量、リアルタイム/非リアルタイム、要求される転送品質、などが異なっている。このうち最も厳しい要求条件は(c)に対するものであり、これに対する定量的なリクワイアメントを明らかにすることがN\*VECTORプロジェクトの重要な課題である。

3次元空間およびそこに存在する物体や人物が移動し、かつそれを見る視点が動くときその動的な3次元シーンをどのようにサンプリングしてデジタル化し、再合成して表示するかはバーチャルリアリティ研究者のホットトピックであり、活発な研究が行われている。(16) それに必要なマルチアレイカメラの開発や、その多数のカメラから出力する映像データを出来るだけ削減して符号化する手法の研究が行われている(17)。しかし、それらをリアルタイム転送する研究や実験はこれからである。N\*VECTORで用いる新しいプロトコルのMedia Cruisingは帯域予約によるリアルタイムデータの転送(上記b, c, d)と予約した帯域をフルに利用し、大容量ファイルの高速転送(上記a)を可能にするので、このようなアプリケーションに適するプロトコルと考えられ、実証実験を予定している。

動的な3次元シーンのレンダリングに必要なコンピュータ性能と、発生する膨大な映像データをリアルタイムに転送するネットワーク性能は、次世代のコンピュータとネットワークに必要とされる技術の研究をドライブする

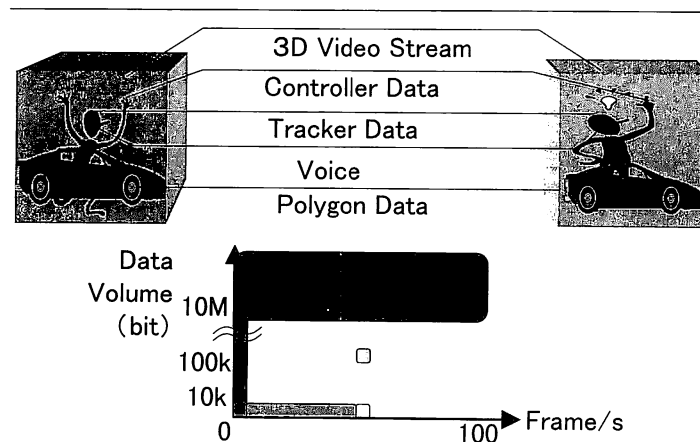


図10 実写映像を含む3次元VR空間のネットワークに必要なデータ

重要なテーマと考えることができ、ギガビットネットワークを用いて実験する良いアプリケーションと考えている。

## 5. むすび

ここでは次世代インターネットの技術課題を概観するとともに、それらをテストする次世代ネットワークテストベッドを紹介した。さらに、遠隔のバーチャルリアリティ空間を高速ネットワークで接続し、それを用いて互いに離れた者が協調して知的活動を行う環境を提供する技術の開発プロジェクトについて述べた。仮想空間をネットワークキングするためには異なる性質の多種類のデータを高品質で転送する必要がある、将来のネットワークが満たさねばならない要求条件を与える高度でかつ難しい技術課題である。これを研究することによって新しいネットワーク技術が生み出されることが期待される。

## 参考文献

- (1) P. White, "RSVP and Integrated Services in the Internet: A Tutorial," IEEE Communication Magazine, Vol. 35, No. 5, pp. 100-106, May 1997
- (2) 山下、田中、内海、塩野崎, "AMInetにおける資源予約を用いたレート制御型トランスポートプロトコル", 電子情報通信学会, 信学技報, IN90-103, pp.31-36, 1997
- (3) V. Kumar, T. Laksman & D. Stiliadis, "Beyond Best Effort: Router Architecture for the Differentiated Services of Tomorrow's Internet," IEEE Communication Magazine, Vol. 36, No. 5, pp. 152-164, May 1998
- (4) <http://www.6bone.net/>
- (5) <http://www.mbone.com/>
- (6) C. Perkins, P. Bhagwat & S. Tripathi, "Network Layer Mobility: An Architecture and Survey," IEEE Personal Communication, Vol.3, No. 3, pp. 54-64, June 1996
- (7) 青山, "フォトリックネットワークの展望," 小特集: フォトリックネットワーク用光デバイス, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.7, July 1999 掲載予定
- (8) D. Tennenhouse, et al., "A Survey of Active Network Research," IEEE Communication Magazine, Vol. 35, No. 1, pp. 80-86, January 1997
- (9) <http://www.vbns.net/>
- (10) Ailene Project Summary, <http://www.ucaid.edu/abilene/>
- (11) <http://www.canarie.ca/>
- (12) C. Cruz-Neira, D. Sandin & T. DeFanti, "Surround Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and

- Implementation of the CAVE," Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'93), pp. 135-142, August 1993
- (13) J. Leigh, T. DeFanti, A. Andrew, E. Jonson, M. Brown & D. Sandin, "Global Tele-Immersion: Better Than Being There," Proceeding of ICAT'97, Tokyo, December 1997
  - (14) M. Hirose, "CABIN- A MultiScreen Display for Computer Experiments," Proceedings of International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM'97), pp. 78-83, September 1997
  - (15) 林, "3次元遠隔協調環境を支える次世代通信プロトコル: Media Cruising," NTT R&D, Vol.48, No.2, pp.183-188, February 1999
  - (16) P. Rander, "A Multi-Camera Method for 3D Digitization of Dynamic, Real World Event," Ph.D Thesis, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-98-12, May 1998
  - (17) T. Naemura & H. Harashima, "Real-Time Video-Based Rendering for Augmented Spatial Communication," Proceedings of SPIE, Visual Communication and Image Processing'99, pp. 620-631, January 1999

## 【略歴】

青山友紀 (あおやまともりのり)

1967年東京大学工学部電子工学科卒業、1969年同大学院電気工学科修士課程修了、同年日本電信電話公社入社、以来電気通信研究所において通信システムやネットワークの研究、例えばデータモデム、PCM 端局、音声符号化、デジタル信号処理、デジタル網、ATM ネットワーク、光通信システムなどの研究実用化に従事。1973年より1974年まで客員研究員としてMITに滞在し、デジタル信号処理の研究に従事。

1994年にNTT光エレクトロニクス研究所長に就任、さらに1995年、NTT光ネットワークシステム研究所長に転ずる。1997年3月、NTTから東京大学に転職し、現在同大学院工学系研究科電子情報工学専攻教授。

電子情報通信学会、IEEE 会員。同学会主催のいくつかの国際会議の実行委員長や、IEEE Journal on Selected Areas of Communications (JSAC) のゲストエディターを務める。著書としては、「デジタル信号処理の基礎 (1998)」、「シグナルプロセッサ (1990)」、「広帯域 ISDN と ATM 技術 (1995)」、「Super-High-Definition Images (1995)」、「光通信工学 (1998)」、「やさしい ATM (1998)」(共著または監修) などがある。