

# ネットワークバーチャルリアリティ システムの構成法

清川 清

通信総合研究所 通信システム部  
kiyo@crl.go.jp

竹村 治雄

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科  
takemura@is.aist-nara.ac.jp

## はじめに

これまで見てきたように、ネットワークバーチャルリアリティ (NVR) システムはさまざまな用途に対して多種多様なシステムが開発されている。こうしたシステムの内部はどのような仕組みになっているのだろうか。また、新たにNVRシステムを開発するにはどのような点に留意すればよいだろうか。本稿では、いくつかの事例を紹介しながらNVRシステムの歴史を簡単に振り返り、多くのシステムに共通する要素技術や注意事項、手法ごとの利点や欠点を解説する。

## NVRシステムの歴史

### 黎明期のNVRシステム

1980年代のNVRシステムは、低速なネットワーク上で比較的単純なネットワークトポロジを用い、その中で安定にシステムを稼働させることを最大の目的としていた。初の本格的なNVRシステムは、1983年に米国防省のDARPA向けに開発された低コストな軍用シミュレーションシステムSIMNETである<sup>1)</sup>。1984～85年には、設立間もないSGIが2台の計算機を接続できるフライトシミュレータFlightや対戦型ゲームDogfight<sup>2)</sup>を開発した。これらは実時間3次元CGを用いたNVRシステムの先駆けといえる。1986年頃には、米国海軍大学院 (Naval Postgraduate School) が大規模戦場シミュレーションシステムNPSNETの開発を開始した<sup>3)</sup>。

### 発展期のNVRシステム

1990年代初頭には、その後のNVRシステムの基礎となる技術が開発される。特に1993年には多くの動きがあった。まず、SIMNETのプロトコルを拡張したDISプロトコルがIEEE1278として標準化され<sup>4)</sup>、NPSNET-IVに採用された<sup>5)</sup>。NPSNET-IVはトラフィックを軽減し柔軟なグループ通信を実現するIPマルチキャストも採用し、1,000人規模で同時に利用できた。

NVRシステムの多くが静的な環境とその中を動き回れる少数のオブジェクトで構成されるにとどまるのに対し、同じく1993年にSICS (Swedish Institute of Computer Science) が発表したDIVE<sup>6)</sup>は、信頼性のあるマルチキャストを用いて共有環境の動的な変更を可能にした。また、簡単にアプリケーションを変更できるように、オブジェクトの振舞いを記述する言語DIVE/Tclを提供した。ラピッドプロトotypingに有利なこうしたスクリプト言語は、その後数多くのシステムで提供されている。

同年ATRが開発した臨場感通信会議システム<sup>7)</sup>は、表情認識やCGなどの技術を駆使して2～3名の参加者があたかも直接対話しているような空間を作り出すことを目的としていた。また、1993年末には、ネットワーク対戦型3次元アクションゲームDoomが登場した<sup>8)</sup>。大流行したこのゲームは、通常のPCにも高性能なグラフィクスとネットワークが必要であると認識させた点で後に与えた影響は大きい。

1994年には、シンガポールISS (Institute of System Sciences) のBrickNetが発表された<sup>9)</sup>。BrickNetでは、広大な仮想空間を1つのデータベースサーバでまかなうには限界があるとの考えから、分散協調サーバによってデータを分割管理する機構が導入されている。後継システムで

ある1996年のNetEffectでは<sup>10)</sup>、不要パケットの抑制や動的負荷分散などの工夫によってBrickNetのポトルネットワークであった分散サーバ間のトラフィックを軽減し、ローエンドのPCとモデムでも数百人以上で同時に利用できる。

1995年には、ノッティンガム大学が100人から1,000人の同時利用を想定したバーチャル会議システムMASSIVEを発表した<sup>11)</sup>。MASSIVEは、実世界のコミュニケーション形態を模した独自の空間インタラクションモデルによって通信範囲を自然に限定し、パフォーマンスを向上している。たとえば、参加者Aは自分のフォーカス（注意範囲）が参加者Bのニバス（気付かれ得る範囲）と交差したとき、初めてBの存在に気付いて対話が可能になる。

### 最近のNVRシステム

1990年代後半に入ると、インターネットの爆発的發展に伴って新たな動きが出てきた。まず、1994～96年にはウェブ上の3次元オブジェクトの幾何形状や挙動を記述するための言語VRMLおよびVRML2.0が制定された<sup>12)</sup>。HTTPやVRMLの特性上実時間処理や大規模データの動的変更などには向かないが、簡易にウェブ上でNVRシステムを作ることができる。これに対し1995年ごろから、ストリームデータの実時間配信やデータの粒度に応じた複数のプロトコル選択などの特徴を持ち、よりNVRシステムに適したvrtp (virtual reality transfer protocol) というプロトコルが開発されている<sup>13)</sup>。また、近年はギガビット級の超高速ネットワークが利用できるようになり、これを用いてハイパフォーマンスな共有3次元空間を創る動きも盛んになっている。代表的なプロジェクトにはイリノイ大を中心としたiGridがあるが<sup>14)</sup>、同プロジェクトについては本特集2「ビデオアバタと空間通信」を参照されたい。

以上、NVRシステムの歴史をごく簡単に振り返った。一般にNVRシステムでは、データベースの一貫性とインタラクションの実時間性を高いスケラビリティで提供することが必要であり、用途に適したシステムを開発するにはさまざまなネットワークの構成法や共有データ管理手法について知る必要がある。次章以降では、次の3つの要素について、順に代表的な手法を解説する。

- デバイスハンドリング
- ネットワークの通信路とプロトコル
- ネットワークトポロジと共有データ管理

### デバイスハンドリング

NVRシステムに限らず多くのバーチャルリアリティシステムでは3次元位置センサや力覚フィードバック装置などの特殊なデバイスがよく用いられる。これらのデバイスをNVRシステムに導入する際は、対話性を損なわないようにデータの更新レートを維持するよう留意する必要がある。本章では、デバイスハンドリングのための代表的な接続方法と、効率的なデータ転送のための注意事項を述べる。

### デバイスの接続インタフェース

シリアル通信は、データ転送量が比較的少ない場合は現在でもよく使われる。VRシステムの周辺装置の多くは比較的低速な規格であるRS-232CやRS-422などに対応している。ただし、力覚や触覚などのフィードバックを提供するには数百Hzから数kHzの更新頻度が必要とされ、RS-232Cなどでは速度的に不足するので注意する。今後は、より高速なUSBやIEEE1394へと急速に移行するだろう。

一方、メインの計算機と周辺機器の間をLAN接続することが増えている。LAN接続により、高速化や負荷分散、ポート数の限界の打破などが可能となる。通常はLAN内の他の計算機に機器を接続するが、本体に直接IPアドレスを付与できる機器も増えている。TCP/IPによるソケット通信のデフォルト設定では、累積データがTCPの最大セグメントサイズを超えるか遅延ACKタイマが終了するまでデータが停留されてしまい、受信側の実効処理レートが落ちてしまうので注意を要する。この場合は、ライブラリからパケット送出手の遅延を禁止するオプション(TCP\_NODELAY)を設定する<sup>15)</sup>。

### デバイスのデータ管理

3次元位置センサなどの周辺装置の多くはそれぞれ固有の周期でデータを送出するため、この周期を考慮してシステムサイクルを構成しなければ、容易にシステム全

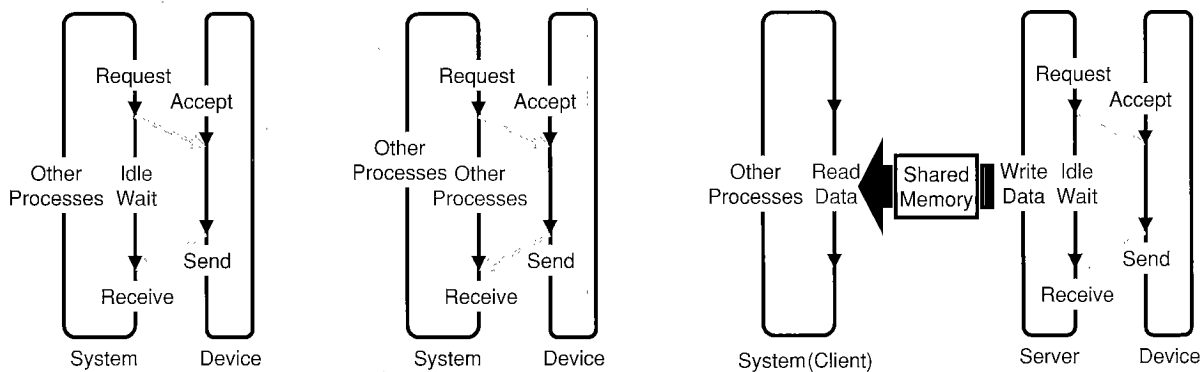


図-1 単純なデバイスループ

図-2 遅延を考慮したデバイスループ

図-3 サーバ・クライアント式デバイスループ

体のパフォーマンスが劣化する。たとえば、図-1のようにデバイスにデータの送信を要求した直後にその受信データを利用する単純な実装では、データの到着を待つ間システムがアイドル状態になり効率が悪い。図-2のように、データ転送の遅延を考慮し、データの到着まで他の処理をして到着とともに即座に読み出せば待ち時間もなく最新のデータが利用できる。しかしそれでも最も遅いデバイスのデータ送出レートがシステムサイクルのボトルネックとなることに変わりない。

そこで現在多くのシステムでは、図-3に示すようなサーバ・クライアント方式やマルチスレッド方式を採用している。すなわち、独立した専用のサーバプロセス（もしくはスレッド）がデバイスデータを読み取り、個々のクライアントアプリケーションは共有メモリを介して非同期にデータを得る。このような機構により、システムサイクルがデバイスサイクルと独立して最適な処理が可能となる。

## ネットワークの通信路とプロトコル

NVRシステムでデータをやりとりする場合は、絶対に欠けてはいけないデータなのか、それとも欠けてもよいのであるべく頻りに送りたいデータなのかなどを考慮して、データの性質に合った通信手段を用いる必要があ

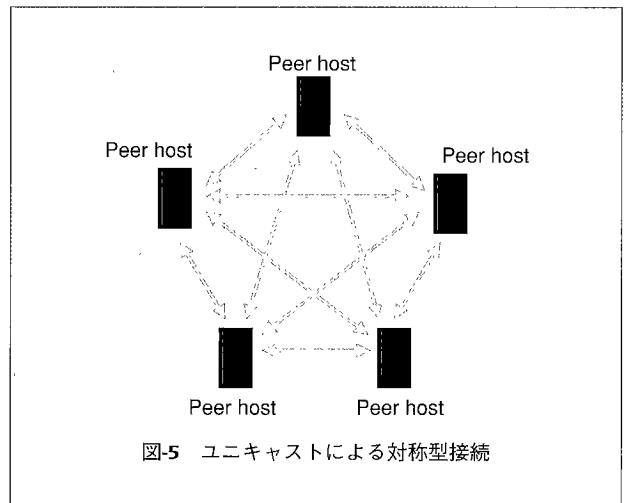
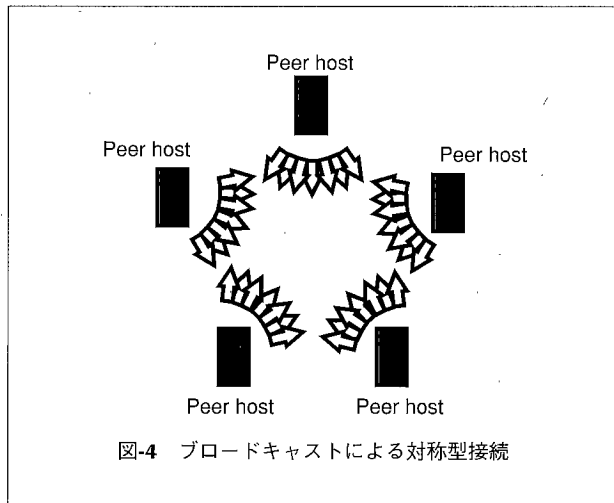
る<sup>16)</sup>。本章では、NVRシステムで一般的に用いられる通信路や通信形態の特徴と、それらをNVRシステムに適用した場合の問題点を述べる。

## ネットワークの通信路

LANが普及する以前は、シリアル通信を用いたVPL社のRB2システムや初期のSGI Flight、パラレル通信を用いたSense8社のWorldToolKitなどがあった。近距離の計算機2台を接続するには簡便であるが、拡張性や通信速度に問題がある。なお、SLIPやPPPを使えばLANの場合と同様の実装が可能である。

一方、LANでは物理ポートによる通信と比較して、比較的容易にプログラミングが行え、通信速度が速いといった利点がある。現在では、Ethernet上でTCP/IPもしくはUDP/IPを用いるLANが大半であり、その通信速度は多くの場合10Mbpsから100Mbpsであるが、1Gbpsの規格も使われ始めている。ルータを経由しない小さなLANでは遅延やパケット損失の影響を無視できる場合が多い。

また、加入電話やN-ISDNなどの広域回線交換網は、帯域や遅延が保証され、プロトコルを任意に選べるといった利点があり、インターネットが普及する以前は遠隔地間を直接接続する有力な手段であった。現在ではPPPを用いてインターネットへの入り口に利用されるにとどまることが多いが、この場合は帯域や遅延の保証は得ら



れない。

ルータを経由するようなWANやインターネットによる通信では、そのバックボーンの通信速度がATMやWDMなどの技術により急激に向上してきており、基本的にはLANの場合と同様の感覚でWANを利用できるようになりつつある。ただし、一般的に次のような点に留意する必要がある。

- 1) 経路中1カ所でも遅いと全体が遅くなる。
- 2) ルータを通過する度にパケットの伝送遅延が起きる。
- 3) 特殊なパケットはルータを通らないことがある。
- 4) 信頼性がLANよりは低くなる。

## ネットワークのプロトコル

NVRシステムでは、規模や用途により適切な通信プロトコルを選択する必要がある。以下では、IP上で用いられる3種の通信プロトコルの特徴とNVRシステムにおける利用のポイントを述べる。

### ユニキャスト通信

1対1の通信であるユニキャストでは、通信路はノード間で明示的に確保する。この方法は簡便であり、ノード数が多い場合にはよく用いられる。また、TCPを用いれば信頼性が確保できる。しかし、すべての参加ノードでデータを交換するには、N個のノードについてN×(N-1)本の通信路を確保し、各ノードが同一内容のパケットをN-1回再送する必要がある。参加者が比較的少なくパケット数が爆発しない場合はWANでも有効な方法であり、高速WANを用いた分散協調システムでは多く

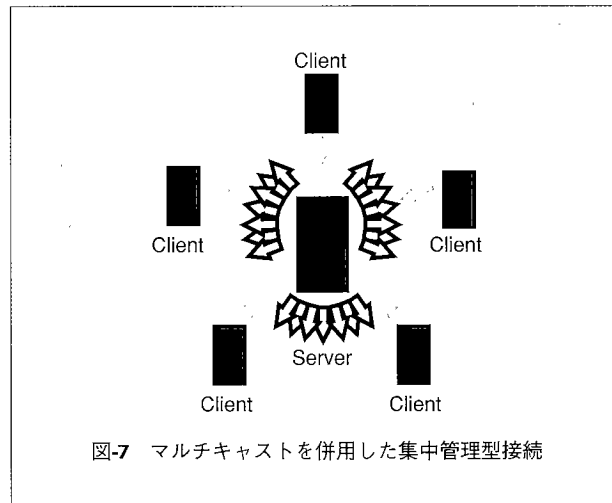
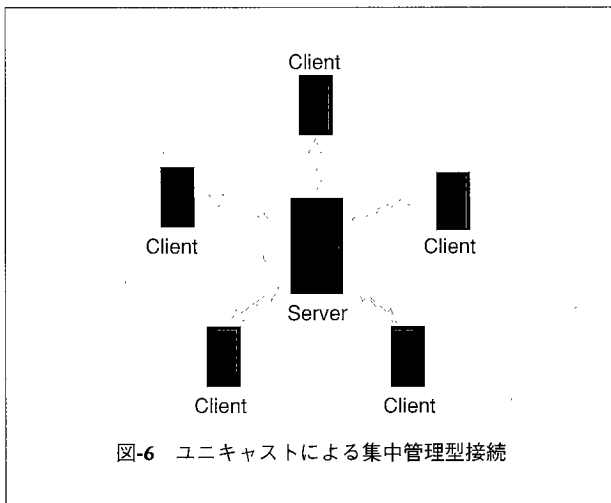
採用されている。

### マルチキャスト通信

特定多数への1対多通信であるマルチキャストは、あるノードから1度だけ特定のマルチキャストグループに対してデータを送信すれば他のすべての参加ノードにデータを配布できるため、大規模なシステムに適している。また、参加ノード全体を複数のマルチキャストグループに分け、関与するグループ内のみで効率的にデータを交換することもできる。一般に、IPマルチキャストはUDPを用いるためデータの信頼性が保証されないが、NACKや木構造ACK、前方向誤り訂正などの機構を組み合わせて、信頼性のあるマルチキャストを実現する研究も進んでいる。ただし、一般にこれらの機構は低速化を招くため、NVRシステムへの適用には注意を要する。

### ブロードキャスト通信

不特定多数への1対多通信であるブロードキャストはネットワーク上のすべてのノードに一斉にデータを配布する。信頼性を確保しない単純なプロトコルであり一斉通信が可能のため、他の方法に比べるとノード数のスケーラビリティは高く、SIMNETなどの初期の大規模NVRシステムには多く採用されている。しかし、データを望まないノードにもパケットを配信するためにトラフィックが無駄に大きくなり、各ノードがパケットの必要性を調べるためにOSレベルで負荷がかかる。また、一般にはブロードキャストパケットはルータを超えられないので注意する。



## ネットワークポロジと共有データマネジメント

NVRシステムにおいては、参加者が共有するデータを効率良く保持・配布することが重要である。本章では、いくつかのネットワークポロジの構成法やNVRシステムに特有の共有データ管理手法について述べる。

### データ共有のためのネットワークポロジ

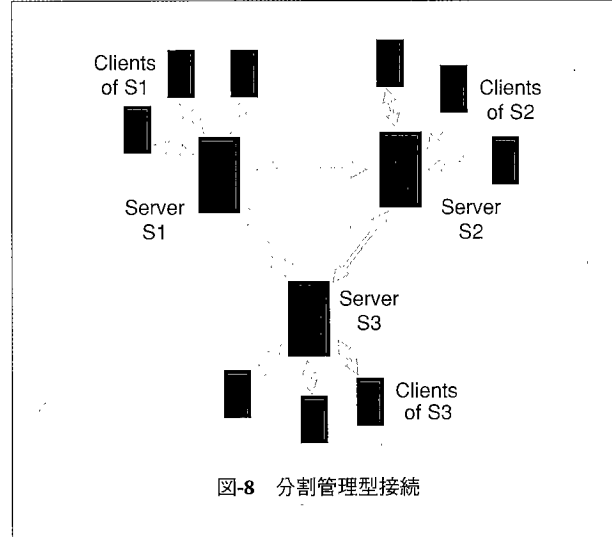
以下では、NVRシステムのネットワークポロジを4種類に分類し、それらを順に解説する。

#### ➡信頼性を確保しない対称型接続

この形態では、初期状態で各ノードが完全に同一のデータを共有しておき、通常UDPを用いて変更点のみを通知し合う。アルバータ大が開発したMR Toolkitのようにユニキャストを用いる場合もあるが、多くは図-4のようにブロードキャストや信頼性のないマルチキャストを用いた一斉通信を利用する。いずれにせよ、基本的に信頼性がないため、パケットが損失したりパケットの到着順序が送信順序と異なったりするため、特別な配慮をしなければ時間の経過とともにデータの一貫性が失われる。実装が簡便なため、SIMNETなどの初期のNVRシステムではよく用いられた。

#### ➡信頼性を確保する対称型接続

この形態でも各ノードは完全に同一のデータを共有するが、各ノードはTCPや信頼性のあるマルチキャストを用いて変更点を通知し合うので、データの一貫性を確保しやすい。ただし、複数のノードが同時にパケットを



出して受信ノードによってそれらの到着順が異なれば一貫性がくずれることがある。TCPを用いる場合は通常図-5のような完全グラフ型接続となるため、接続数やパケット数の爆発が起きないように注意する。基本的に信頼性を確保しない手法よりも遅延量や通信速度の点で不利なため拡張性は劣るが、データベースを動的に大きく変更するような用途には適している。DIVEなどはこのタイプである。

#### ➡データを集中管理する非対称型接続

この形態では、最新のデータベースを管理するサーバを1つ設ける。非対称型では、更新要求はまずサーバに送られ、そこで直列化された後に全クライアントに再送される。クライアントからサーバへの要求はユニキャストが用いられ、サーバからの再送にはユニキャスト(図-6)やマルチキャスト(図-7)が用いられる。各クライアント

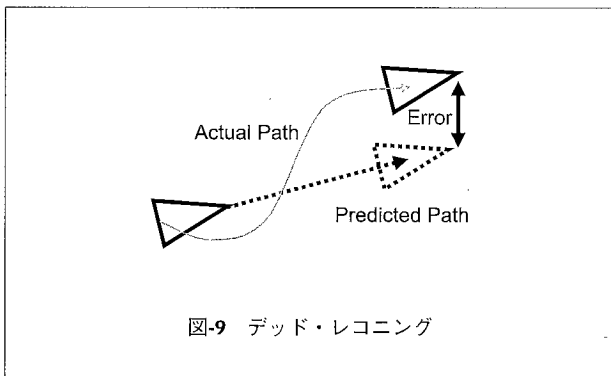


図-9 デッド・レコニング

では、要求の到着順に更新処理を行うため、データの一貫性を確保しやすい。一方、この手法ではサーバにデータが集中して、容易にシステム全体のパフォーマンスを下げってしまうので注意が必要である。ATRの臨場感通信会議システムなどはこのタイプである。

#### ④ データを分割管理する非対称型接続

この形態では、データベースを複数のクライアントが分割して管理し、サーバは分割されたデータベース間の通信を仲介する。大規模な地形データをウォークスルーする場合などは、データを一極に集中するとボトルネックとなるため、このような方法がとられることが多い。たとえば図-8では、計9カ所のクライアントに地形データが分割されている。ユーザが地形データ中を移動するに従い、データベース更新の要求が発生すると、各サーバが連携して必要なデータベースを保持するクライアントと自動的に通信し、データベースの更新を行う。BrickNetやNetEffectはこのタイプである。

### ネットワーク遅延への対処

共有データのマネジメントにおいてネットワークに不可避である通信遅延の問題は重要である。特にWANのようにサイト間の距離が長くなると遅延の影響は深刻であり、データの一貫性やシステムの対話性が損なわれてしまう。TCPを諦めてUDPを用いる(遅延量は1ケタ小さい)、ルータや計算機を高速化する、帯域予約の可能な専用線を使う、といった対処は可能であるが、通信路上に存在するパケットの処理や輻輳制御などを考慮すると、帯域幅の増大は必ずしも問題を解決しないことが分かる。

遅延の問題を緩和する有力な手法にデッド・レコニングがある。これは、図-9のように他のユーザの現在位

置などを、各ローカルサイトでは過去のデータから予測して求めておき、実際に予測時刻のデータが到着したときに誤差を補正する手法である。この手法を活用すれば、無駄なパケット送信を抑制することもできる<sup>16)</sup>。すなわち、送信サイトと受信サイトで共に予測を行い、誤差が蓄積するまで新規データの送信を省略する。デッド・レコニングはWANを使用するNVRシステムにおいて一般的な手法であり、SIMNETなどでも採用されている。

### おわりに

すべての技術分野の中でも、通信とCGは近年最も飛躍的に発展した2大技術といえるだろう。それらを共に要素技術とするネットワークバーチャルリアリティシステムも、要素技術の発展に呼応して大きな飛躍を遂げてきた。本稿では、データ共有のためのネットワーク構成法を中心にネットワークバーチャルリアリティシステムの仕組みを述べたが、こうしたシステムに適した高速なCG描画手法や衝突判定手法など取り上げられなかった話題も多い。興味のある読者はぜひ参考文献を辿ってみて欲しい。

#### 参考文献

- 1) Calvin, J., Dickens, A., Gaines, B., Metzger, P., Miller, D. and Owen, D.: The Simnet Virtual World Architecture, In Proc. of IEEE VRAIS '93, pp.450-455 (1993).
- 2) ftp://ftp.sgi.com/sgl/Iris3000/dog/ からソースコードが入手できる。
- 3) Zyda, M.J. and Pratt, D.R.: NPSNET: A 3D Visual Simulator for Virtual World Exploration and Experience, In Visual Proc. of ACM SIGGRAPH '91, p.30 (1991).
- 4) IEEE Standard for Information Technology — Protocols for Distributed Simulation Applications: Entity Information and Interaction, IEEE Standard 1278-1993, IEEE Computer Society (1993).
- 5) Macedonia, M.R.: A Network Software Architecture for Large Scale Virtual Environments, Ph.D. Dissertation, Naval Postgraduate School (1995).
- 6) Carlsson, C. and Hagsand, O.: DIVE — A Multi-user Virtual Reality System, In Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.394-400 (1993).
- 7) 岸野文郎, 宮里 勉: 人周主体の知的通信システムを目指して — 臨場感通信会議一, 電子情報通信学会技術報告 MVE 95-44 (1995).
- 8) ftp://ftp.idsoftware.com/idstuff/source/doomsrc.zip からソースコードが入手できる。
- 9) Singh, G., Serra, L., Prg, W. et al.: BrickNet: A Software Toolkit for Network-Based Virtual Environments, PRESENCE 3(1), pp.19-34 (1994).
- 10) Das, T.K., Singh, G., Mitchell, A., Kumar, P.S. and McGee, K.: NetEffect: A Network Architecture for Large-Scale Multi-User Virtual Worlds, In Proc. of ACM VRST '97, pp.157-163 (1997).
- 11) Greenhalgh, C. and Benford, S.: MASSIVE: A Distributed Virtual Reality System Incorporating Spatial Trading, In Proc. of IEEE DCS '95, pp.27-34 (1995).
- 12) http://www.vrml.org/
- 13) http://www.stl.nps.navy.mil/~brutzman/vrtp/docs/vrtpResearchUpdateBrownFraunhoferCrcglune1999/ppframe.htm
- 14) http://www.isoc.org/inet2000/igrnd.shtml
- 15) Stevens, W.R. (著), 篠田陽一 (訳): UNIXネットワークプログラミング第2版, Vol.1, トッパン (1999).
- 16) Singhal, S. and Zyda, M.: Networked Virtual Environments, Addison Wesley (1999).

(平成13年1月16日受付)