

# 千人規模の利用者のための 3 次元仮想空間コミュニケーション環境

箕浦大祐<sup>†</sup> 石橋 聡<sup>†</sup>

これまでのグループウェアでは、遠隔会議や遠隔教育などのシステムとして小～中規模の利用者数の遠隔コミュニケーションを実現してきた。大規模の利用者数を想定したマルチユーザ仮想環境の実現によって、劇場のように多くの人々が集まる空間をサイバースペースに実現するなど、今後のグループウェアに新たな適用分野が期待できる。本論文では、千人規模の利用者を収容し、講演のような非対称型コミュニケーションを可能とする 3 次元仮想空間を共有するコミュニケーション環境の分散管理サーバのアーキテクチャと、これを用いたコミュニケーションシステムについて述べる。このシステムにおいて、擬似利用者端末プログラムを用いて実際に千人程度の利用者がサーバに収容された状態を作り、サーバとネットワークの負荷状態について評価実験を行った。実験結果をもとに、サーバの耐久性と、利用者数に応じたサーバの分散運用方法について考察する。

## A 3-D Virtual Communication Environment for Thousands of Users

DAISUKE MINOURA<sup>†</sup> and SATOSHI ISHIBASHI<sup>†</sup>

Groupware systems have realized remote communication in a small- or middle-size user group on multi-user systems such as teleconference and distance learning systems. We can expect to create innovative groupware applications such as a virtual theater by realizing a multi-user environment for a large number of users. This paper describes a 3-D virtual communication system for thousands of users. The system realizes asynchronous communication and adopts a distributed server structure. We evaluated the server operability in overload tests with dummy client programs. Based on the evaluation, this paper also describes the design of server operation arrangement that meets the size of user body to be accommodated.

### 1. はじめに

遠隔地の利用者間のグループワークやコミュニケーションを目的としたマルチユーザ仮想環境に関する研究はこれまでにさかんに行われている。我々もこれまでに 3 次元仮想空間を利用者間で共有するコミュニケーション空間の研究開発を進めてきており<sup>1)</sup>、デスクトップ型会議システムや遠隔教育のプラットフォーム・システムへの適用を通して利用実験および製品化を行ってきた<sup>2),3)</sup>。このシステムでは、数百人までの利用者を同時収容可能ではあったが、利用者は複数の仮想空間に割り振って収容されるため、実際に同時にコミュニケーションが可能な人数は数十人程度であった。このようなシステムのニーズや計算機とネットワークの性能限界から、利用範囲は小～中規模のグループワークがほとんどであった。

一方で、劇場のような利用を想定した、数百～数千

人がコミュニケーション可能なマルチユーザ 3 次元仮想環境の実現が長らく期待されている<sup>4),5)</sup>。劇場のようなコミュニケーションの形態は、舞台上の少人数の役者が大人数の観客に対する方向のコミュニケーションが主であるため、これまでに実現されている 2 次元映像の放送的な配信によって、ある程度は実現可能であろう。しかし、演劇では演技に対する観客のリアルタイムな反応を得ることが重要な要素の 1 つである<sup>6)</sup>。映像配信では、役者と観客の間にコミュニケーションのない映画の上映は実現できても、演劇での利用は難しい。大人数を収容可能、かつインタラクティブ・コミュニケーションが可能なマルチユーザ仮想環境の実現によって、これからのグループウェアにおける新たな、参加者の多寡にとらわれない幅広い適用範囲が期待できる。

本論文は、劇場のような用途を想定した千人規模の利用者間でコミュニケーションを行うための分散管理サーバの設計、および 3 次元仮想空間を共有するコミュニケーションシステムのプロトタイプ実装について述べる。ダミークライアントプログラムにより、実

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所  
NTT Cyber Space Laboratories, NTT Corporation

表 1 マルチユーザ 3 次元仮想環境  
Table 1 3-D multi-user virtual environments.

System	Purpose	Number of users	Text chat	Audio	Video
SIMNET	Military training	850	No	No	No
NPSNET	Military training	> 1000	No	No	No
DIVE	Collaboration, Conference	20	Yes	Yes	No
MASSIVE-2	Collaboration	60	Yes	Yes	Yes
InterSpace	Collaboration, Conference	32	Yes	Yes	Yes

際に千人程度の利用者が参加した状態を作り出してサーバとネットワークの負荷測定実験を行った。実験結果から本システムの耐久性と分散運用方法について考察する。

## 2. マルチユーザ 3 次元仮想環境

### 2.1 外部動向

コンピュータグラフィックス (CG) で描かれた 3 次元空間を利用したマルチユーザ仮想環境は、これまでにさまざまなシステムが実現されている。表 1 は代表的なシステムとそれぞれの特徴について示している。SIMNET<sup>7)</sup> や NPSNET<sup>8)</sup> では、大規模の利用者を収容可能なシステムを実現している。しかし、軍事演習という状況の創出が主な目的であるため、コミュニケーションに関する機能は実装されていない。一方、DIVE<sup>9)</sup> や MASSIVE-2<sup>10)</sup>, InterSpace<sup>1)</sup> などのシステムでは、コミュニケーションの機能が充実している。しかし、軍事演習の場合と異なり、音声やビデオ情報などを扱う点や、協調作業の場合には操作対象となる仮想物体を同期的に表示させるなどの点から、扱う情報量が增大する。ネットワークの帯域幅や計算機負荷の限界から、同時にコミュニケーションが可能な利用者数は数十人の規模のシステムとなっている。

このように、コミュニケーション機能を充実させることと大人数の利用者を収容することを両立させることは単純には困難である。しかし、数百数千の利用者が仮想空間でコミュニケーションを行う状況は、これまでの全員が同等の権限を有してコミュニケーションを行うことが必要となる用途とは異なると思われる。

この問題点を解決する方法として、多人数が参加する仮想空間を小規模のグループに分割して管理する方法に locales という概念が提案されている<sup>11),12)</sup>。この概念は主に、大量の仮想物体データからなる大規模な仮想空間を分割管理するための概念であり、また複数利用者からの操作に対するそれらのデータに対する更新の整合性を保つための概念である。利用者間のコ

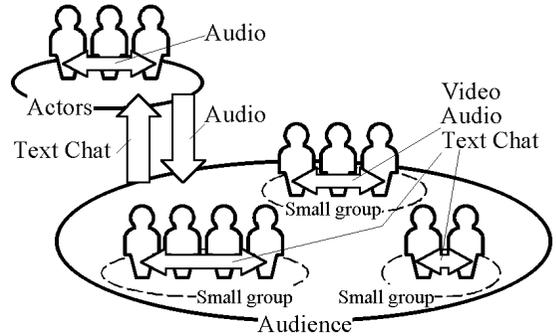


図 1 非対称コミュニケーション環境の概念図  
Fig. 1 A concept diagram of asynchronous communication environment.

ミュケーションデータについても locales の概念により、利用者が空間的に適切に分散できる場合は数多くの利用者をサーバに収容可能ではある。講演や演劇などの大規模な人数が参加するアプリケーションでは、講師や役者のように利用者全員とのコミュニケーションを必要とする利用者が想定されるが、その場合でも locale を超えて全員とリアルタイムコミュニケーションを行える利用者は許容されていない。

本論文で提案するシステムは、大人数が参加したときのコミュニケーション形態の中でも広い用途が想定できる、講演のように限られた利用者から全員に対してコミュニケーションを行うことが主となる非対称型コミュニケーションを実現することを目的としている。

### 2.2 提案システムのコミュニケーション環境

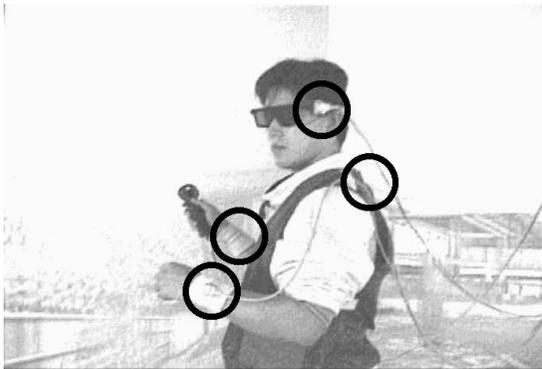
自分の周囲に存在する人を一度に把握できない規模の人数が集まる環境では、全員が互いに同時にコミュニケーションを行う必要が生じる用途は少ないと考える。むしろ、存在が把握できる範囲の周囲の人々と小規模のグループの中でコミュニケーションを行うか、あるいは演劇やコンサートのように特定の人物から大人数の観客に向けられるメッセージ量が多い状況、いわば非対称型のコミュニケーションが行われる状況が大半の場合であると思われる。本論文で提案するシステムでは、このような状況を想定して、図 1 に示するようなコミュニケーションが可能となるような設計を行った。利用者は大きく分けて 2 種類の利用者に分かれる。便宜上、これらを役者型ユーザおよび観客型ユーザ (それぞれ図中の Actors, Audience) と呼ぶ。役者型ユーザはすべての利用者に対して音声でメッセージ伝達が可能であるが、観客型ユーザは役者型ユーザに対してテキストチャットのみでのメッセージ伝達が可能である。ただし、同じ small group に属する観客型ユーザは、互いに音声と顔画像、テキストチャットで



(a) 役者側の環境  
(a) Actor's environment.



(c) 観客側の環境  
(c) Audience's environment.



(b) ジェスチャデータ取得用センサ  
(b) Magnetic sensors for obtaining gesture data.



(d) 観客側端末画面  
(d) Audience's display.

図2 クライアント環境

Fig. 2 Client environments.

コミュニケーションが可能である。観客型ユーザは顔画像の配信によって表情を伝達できるが、役者型ユーザは次章で述べる、採用したアバタの表現方法の都合で顔画像を配信しないことにした。

以上のコミュニケーション形態を実現するシステムおよびそのアーキテクチャについて次章で述べる。

### 3. 千人規模の利用者のための3次元仮想空間共有コミュニケーション環境

#### 3.1 システムの全体構成

図2にクライアント環境を示しながら全体の構成について説明する。劇場のような利用を想定した場合、役者が利用する端末では、役を演じる環境に没入できることが重要であると考えた。没入型仮想環境の表示方法としては、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)やCAVE<sup>13)</sup>のような多面大画面の利用が考えられる。本システムでは、現実空間の周囲の状況も把握できる

ように考慮して、役者型ユーザの端末は4面の大画面(1面が3m×3mの背面投影スクリーン)に囲まれた環境とした。仮想空間は、各画面につき2台のプロジェクタによって描画され、偏光フィルタ眼鏡によって立体視が可能である。

また、役者型ユーザの動作の伝達方法については、体の動きを取得してCGで描かれたアバタにジェスチャとして反映させる方法と、Video Avatar<sup>14)</sup>を利用する方法が考えられる。CGアバタにジェスチャをさせる方法は、能や狂言のように衣装や面を演劇中に変更することが容易に行える利点がある。Video Avatarを利用する場合には、アバタを動作させることでは伝わりにくい細やかな動作や表情を伝えることができる。このように双方利点があり、演じる内容によって効果は変わる。本システムでは、アバタに仮想ならではの演出をさせることを想定して、図2(b)のマルで囲まれた位置の役者型ユーザの体に取り付けた磁気センサ

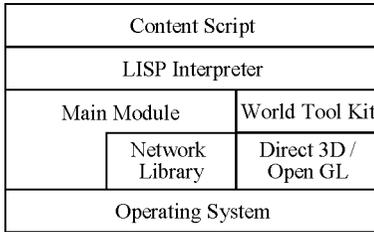


図3 クライアントアーキテクチャ  
Fig.3 Client program structure.

から得た関節データを CG アパタに反映させることによる動作伝達を行っている<sup>15)</sup>。

観客型ユーザのクライアント端末には PC を利用した。観客型ユーザの動作は、ブラウザ上に表示されたボタンをマウスクリックすると、ファイルに格納された決められた動作データを実行する方法で実現している。

音声は役者側、観客側の端末ともに 3 次元音場を実現している。役者側端末では 4 台のスピーカ、観客側端末ではヘッドフォンないし 4 台のスピーカが利用可能である。テキストチャットは、観客側端末で専用ウィンドウに入力された文字が役者側端末の正面画面下部に表示される。

### 3.2 クライアントアーキテクチャ

役者側クライアント端末では、表示用計算機に ONYX2 IR2, OS は IRIX64 Release 6.5 を利用し、観客側クライアント端末では DOS/V PC, OS は Windows<sup>®</sup> 2000 を利用している。それぞれのクライアント端末は、利用する計算機と OS は異なるが、図 3 に示すように同じプログラムのアーキテクチャを有する。CG の描画は、IRIX では OpenGL 版の、Windows<sup>®</sup> 2000 では Direct 3D 版の WorldToolKit<sup>®</sup> を用いて行っている。Main Module 部は、C および C++ 言語で記述されており、自端末での命令の実行および他端末との命令の送受信を行う。Network Library 部は、IP 上の TCP および UDP プロトコルをベースにした、サーバとのメッセージ通信ライブラリを有する。

表示される 3 次元仮想空間内のコンテンツの属性や動作の記述は LISP 言語で行われる。LISP の記述によって自端末の命令実行、他端末への命令送受信、センサ制御、および CG 空間とのインタラクションが行えるので、コンテンツ開発者は LISP 解釈部より下位

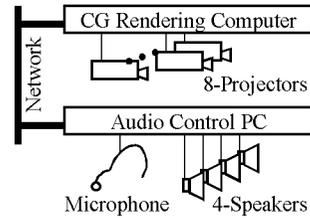


図4 役者側端末の構成  
Fig.4 Actor's client structure.

層を意識せずに開発を行える。また、別のコンテンツを読み込むときやデバッグ時に、下位層のプログラムを再起動する必要がないので、コンテンツの扱いが容易となるうえ、用途に応じて端末ごとに別々のコンテンツ・スクリプトを実行させることも可能である。実際に役者側端末では、図 4 に示すように専用のコンテンツ・スクリプトを搭載した PC を音声制御専用計算機として使用している。会話音声および環境音は、Windows<sup>®</sup> 2000 上で Direct Sound を利用して 3 次元音場を実現している。この音声制御用計算機が、表示用計算機が把握する利用者の仮想空間内の位置と方向をつねに追従して、仮想空間内の周囲の音源との位置関係に応じた音の再生を行っている。観客側端末では、この音声制御も表示用と同一の計算機で行っている。

InterSpace の実現では、電話並みの音質と相手が識別でき表情が把握できる顔画像の画質を、実現するコミュニケーションの品質として目指し、一般利用者に対する公開実験で良好な評価を得てきた<sup>16)</sup>。

本研究で実現したシステムでは、利用者さらなる臨場感を提供したいと考えた。そこで、既述の 3 次元音場に加え、音声については、これまで検討してきた GSM 符号化方式による 10 人までの音声データを受信側クライアント端末でソフトウェア的にミキシングして再生が可能である音声コミュニケーション方式<sup>17)</sup>を、ADPCM によって符号化することで高品質化を図った。一方、顔画像については、役者側利用者に対して観客の表情を一定以上の品質で提供しても演技中の必要性は低いと考えた。観客側端末間が送信する顔画像は、従来どおり 80 × 60 の大きさの JPEG 圧縮された画像で表示され、毎秒平均 6 フレーム程度の頻度で更新される品質とした。この顔画像は、相手の顔が見える位置にいるときだけ、要求に応じて送信される。

### 3.3 分散型サーバアーキテクチャ

サーバは、複数の計算機を用いて分散稼働が可能な設計になっている。図 5 にプログラムのアーキテクチャを

Windows<sup>®</sup> は米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国の商標です。

WorldToolKit<sup>®</sup> は米国 SENSE8 社の商標です。

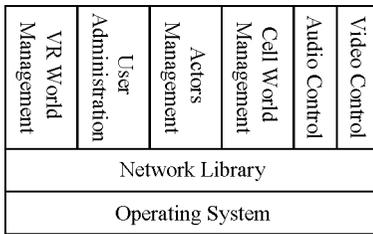


図5 サーバアーキテクチャ

Fig.5 Server program structure.

示す．サーバプログラムは，VR World Management 部，User Administration 部，Actors Management 部，Cell World Management 部，Audio Control 部，Video Control 部の，ネットワーク上で独立に稼動可能なモジュールで構成される．User Administration 部，Cell World Management 部，Video Control 部の主なデータ処理アーキテクチャは，InterSpace に由来する．今回提案する大規模な利用者を扱う分散サーバの設計のために，VR World Management 部に分散サーバの管理を行わせるようにした．また，役者型ユーザのコミュニケーションデータを扱うために Actors Management 部を新たに設け，Cell World Management 部に変更を加えた．Audio Control 部は，ADPCM に符号化方法を変えただけでなく，サーバ処理負荷および配信遅延を減らすために，InterSpace のサーバによる音声ミキシングをクライアント側で行うように設計からやり直した．

VR World Management 部は，初期設定ファイルからサーバモジュールのネットワーク上の配置構成や運用する仮想空間および small group の個数を取得して，各モジュールを連動させて分散サーバとして動作させる．図6にこの初期設定ファイルの構成を示す．図中の〈〉で囲まれた部分には，個別の名称や数値が入る．また，\*にはゼロ以上の整数値が，ゼロから順に入る．設定は，まず分散したサーバモジュールのネットワーク上の位置の指定から行う．〈サーバモジュール名①〉には，分散サーバで1つ起動すればよいモジュールである，VR World Management，User Administration，Actors Management のいずれかが入り，それぞれのモジュールが稼動する計算機のホスト名と使用するポート番号が規定される．次に，このサーバが管理する仮想空間名を明記しておく．この仮想空間名は，部屋のように空間的に区切られている単位ごとに名づける．名づけられた仮想空間ごとの設定が次に続く．各仮想空間の設定は，そこに含まれる small group 名を明記する．各 small group の設定では，そこに含むべき利用者の行動可能範囲と最大収容数が規定され

```
[WorldCluster]
<サーバモジュール名①>=<host 名> <ポート番号>
:
World*=<仮想空間名>
:

[<仮想空間名>]
SubWorld*=<この仮想空間が持つ small group 名>
:
[<仮想空間名>/<small group 名>]
MaxAvatars=<この small group の収容人数上限値>
Range=<X1> <Y1> <Z1> <X2> <Y2> <Z2>
<サーバモジュール名②>=<host 名> <ポート番号>
:
[<仮想空間名>/<次の small group 名>]
:

[<次の仮想空間名>]
:
```

図6 分散サーバ管理のための初期化ファイルの構成

Fig.6 Composition of initialization file for distributed server modules management.

る．複数の small group で同じ行動可能範囲を指定してもよい．この場合，一方の small group が最大収容数の利用者に達した場合に同じ行動可能範囲を規定している他の small group を探し，そこに割り当てる．〈サーバモジュール名②〉には，small group 単位ごとに担当を定義できるために分散サーバで複数起動可能なモジュールである，Cell World Management 部，Video Control 部，Audio Control 部のそれぞれが稼動する計算機のホスト名と使用するポート番号が明記される．

User Administration 部は，利用者の仮想空間への参加/退出処理と利用者リストの管理を行う．Cell World Management 部は，利用者の仮想空間内位置情報やクライアントから送信されるテキストチャット，および仮想物体やアバタの動作を記述したスクリプト通信を，small group 内の他の利用者に同報する．1つの Cell World Management 部で最大36個の small group を管理可能である．また，このモジュールは，Audio Control 部と Video Control 部の制御も行う．Audio Control 部と Video Control 部は Cell World Management 部と一対をなすように起動され，それぞれ small group で音声とビデオ映像の配信制御を行う．ただし，Audio Control 部が扱える音声と Video Control 部が扱える顔映像は，いずれも256人分までが限度であるので，small group 数と各 small group で定義した最大参加者数の積が256を超えて定義したい場合は，複数の計算機に分散させて Cell World Management 部および Audio Control 部，Video Control 部を配置するように調節する必要がある．1つの small

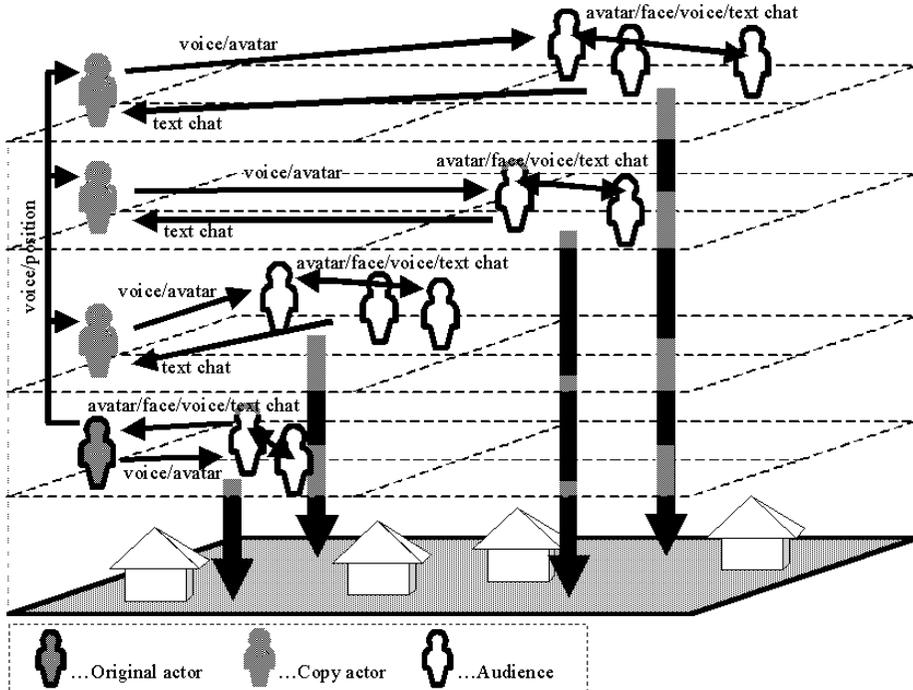


図7 ユーザ間コミュニケーションの模式図

Fig. 7 A diagram of communication among users.

group で、32 人までの利用者が管理可能である。Actors Management 部は、役者型ユーザ用の利用者 ID を使用して参加した利用者がすべての利用者に対してコミュニケーションを行うことを可能にする。この役者用 ID を利用して参加した利用者も、まずいずれかの small group に割り振られる。Actors Management 部は、この small group を管理する Cell World Management 部から役者の情報を取得し、他のすべての small group を管理する Cell World Management 部にこれらの情報を同報する。情報を受信した Cell World Management 部は、この情報に基づいて、すべての small group の利用者から役者アバタが見えるように、役者のコピーアバタを作成し、オリジナルのアバタと同じ配置を行い、同じ声の再生を行わせる。このときのユーザ間コミュニケーションと small group の関係を図 7 に示す。役者のコピーアバタの位置は、各 small group で規定されるアバタの行動可能範囲の制限を受けない。また、役者型ユーザから見えるアバタは、そのオリジナルが所属する small group に属する利用者だけである。役者として参加する利用者は最大 8 人まで収容できるように設計している。以上のサーバの動作を、Cell World Management 部を 3 つ起動した例で図 8 に示す。

これらのサーバプログラムモジュールは C あるいは

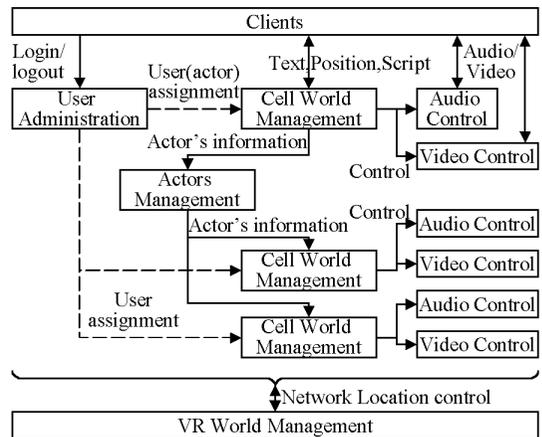


図 8 サーバの動作概略図

Fig. 8 Server operation outline.

は C++ 言語で記述されており、SunOS Release 5.7 の UNIX 計算機で稼動する。

#### 4. 評価実験と考察

##### 4.1 評価実験の目的と方法

本システムの耐久性を調べ、収容利用者数に応じたサーバモジュールの分散運用方法を知るために、ダミークライアントプログラムを併用して、大規模な利用者数が参加した状態を作り出し、このときのサーバ



図9 ダミークライアントが参加した様子

Fig.9 Example of dummy users.

負荷およびネットワークトラフィックを測定する実験を行った。サーバは、5台の計算機にモジュールを散在させた。ダミークライアントプログラムは適当な間隔で、実際の観客用の利用者IDを用いて参加するクライアントプログラムがサーバに送信する種類のデータを作り出す。音声と顔画像は、ファイルに格納されたデータを利用する。位置情報と顔画像は、通常のクライアントプログラムと同量のデータを同じ頻度で送出する。音声とスクリプトについては、経験的にはあるが、実際の利用と同等かそれ以上の頻度で送出されるように設定した。このダミークライアントは、Windows<sup>®</sup> NT ないし Windows<sup>®</sup> 2000 上で稼動する。多数のダミークライアントが参加した様子を図9に示す。384MBのメモリを搭載するDOS/V PC1台につき、最大91プログラムが同時起動可能である。ダミークライアントのためのPCは12台、観客側端末は6台、役者側端末は2台用意した。これらの計算機は100BASE-TのLANで接続されている。以上の実験環境を表2および図10に示す。サーバは、参加するクライアントのハードウェアに関せず動作する。すなわち観客側端末の利用者であっても、役者用の利用者IDで参加すれば、すべての利用者に対して音声伝達が可能となる。そこで以下のサーバ耐久試験では、役者が4人あるいは8人参加する状態を作り出すために、適宜観客側端末として用意した6台の端末で役者用の利用者IDを使って参加させた。ただしこの場合、ジェスチャデータは役者側端末のように自動的に送信されないで、決められた動作データを連続して手動で送った。

#### 4.2 サーバ負荷

図11にサーバ負荷に関する測定結果を示す。図の縦軸は、UNIXのシステムの負荷状態を調べるコマ

表2 実験条件

Table 2 Experimental conditions.

(a) サーバモジュールの配置

(a) Server modules arrangement.

Server name	Hardware specification	Executed modules	Number of communicable unit
Server1	Clock speed: 300MHz	-VR World Management	8
		-User Administration	
Server2	Memory: 784MB	-Cell World Management	8
		-Audio Control	
Server3	Clock speed: 200MHz, Dual CPU	-Video Control	4
		-Cell World Management	
Server4	Memory: 384MB	-Audio Control	8
		-Video Control	
Server5	Clock speed: 200MHz, Dual CPU	-Cell World Management	8
		-Audio Control	
Server5	Memory: 384MB	-Video Control	8
		-Cell World Management	

(b) ダミークライアントの性能

(b) Dummy client performance.

Data	Sending data and its frequency (bytes/msec)	Remark
Position	5/200	3-D position and orientation
Audio	9,768/60,000	6-second speech in 60-second
Video	1,676/167	80 x 60 size JPEG, 6 frames per second
Chat Script	60/10,125	Text in ASCII code

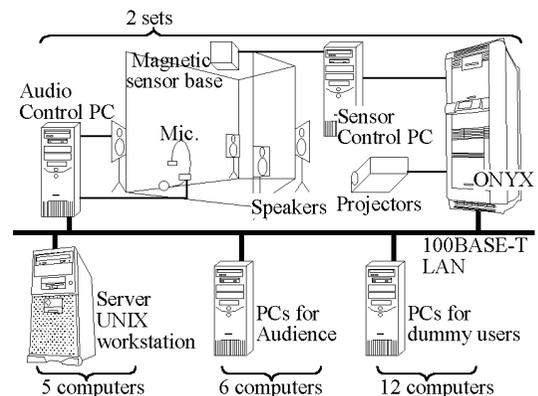


図10 実験環境

Fig.10 Experimental environment.

ド iostat を使って1分ごとに20回測定したCPU負荷量の平均値である。横軸は、サーバ全体にログインしている利用者数を示す。各値は、ダミークライアントが8, 32, 128, 512, 1,024人の参加に対して、役者用IDによる利用者が1, 2, 4, 8人参加したときの負荷値を調べた。役者用IDによる利用者が4および8人のときは、このサーバモジュール配置では負荷が高く、512人までの測定となっている。利用者は各

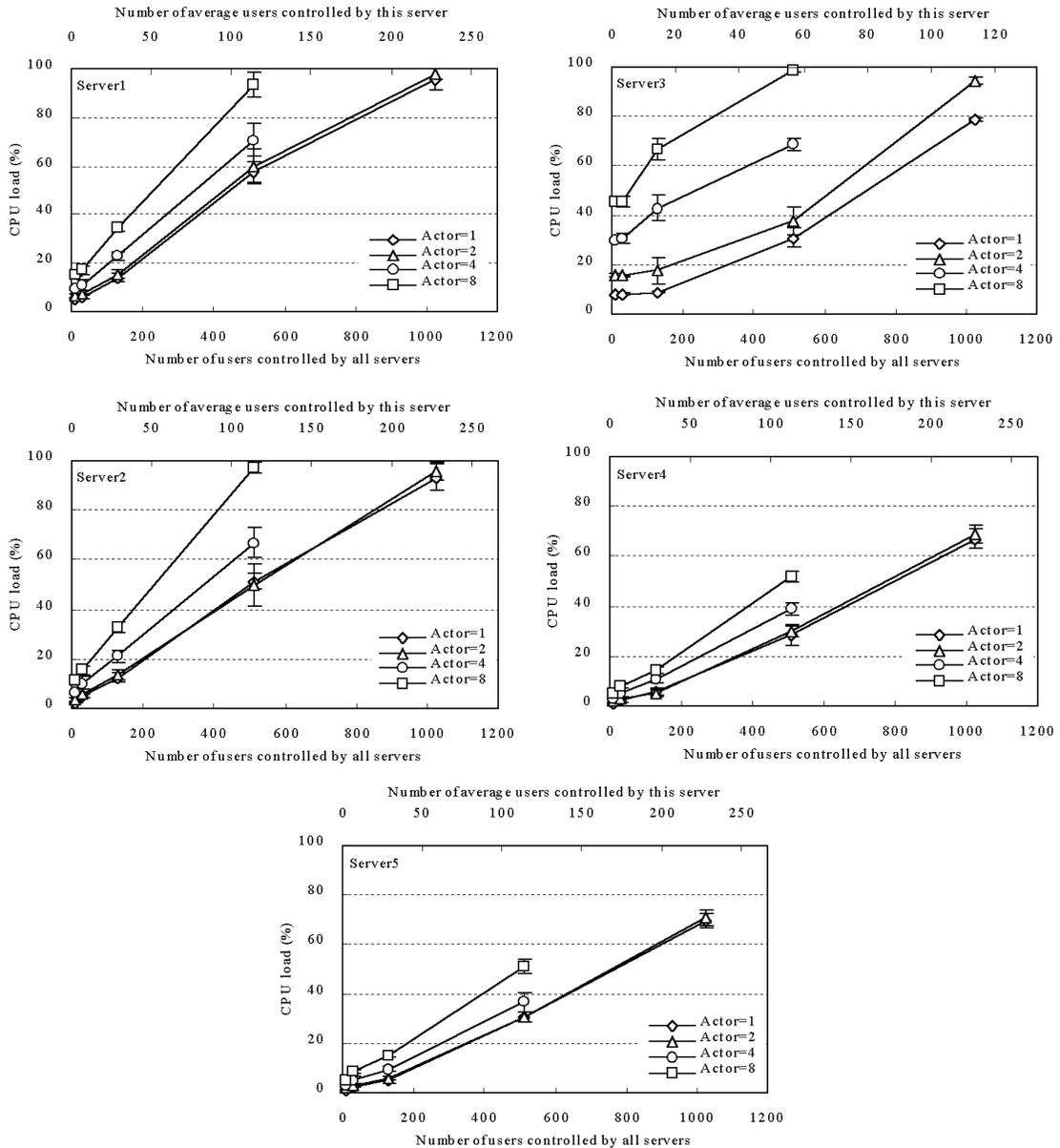


図 11 サーバの CPU 負荷

Fig. 11 Servers CPU load.

small group に順番に割り振られるため、実際にあるサーバ計算機が管理する平均利用者数  $N_1$  は、全利用者数を  $N$ 、このサーバ計算機が管理する small group 数を  $G_1$ 、設定されている全 small group 数を  $G_{all}$  とすると、

$$N_1 = N \frac{G_1}{G_{all}} \quad (1)$$

で算出される。この値を図の上側の横軸として表している。図を見ると、役者用 ID の利用者が 2 人かつ観

客用 ID の利用者が 1,024 人、あるいは役者用 ID の利用者が 8 人かつ観客用 ID の利用者が 512 人のときには、Server1, 2, 3 の負荷は処理限界に近い値となっている。そこで、これらの状況でサーバが処理限界を超えていないか調べるために、クライアントから受信した要求が滞留していないか調べた。

図 12 はコマンド ipcs を使って 5 分おきに各サーバハードウェアのメッセージ滞留量を調べたものである。横軸は経過時間を示し、滞留量の測定開始時刻は、

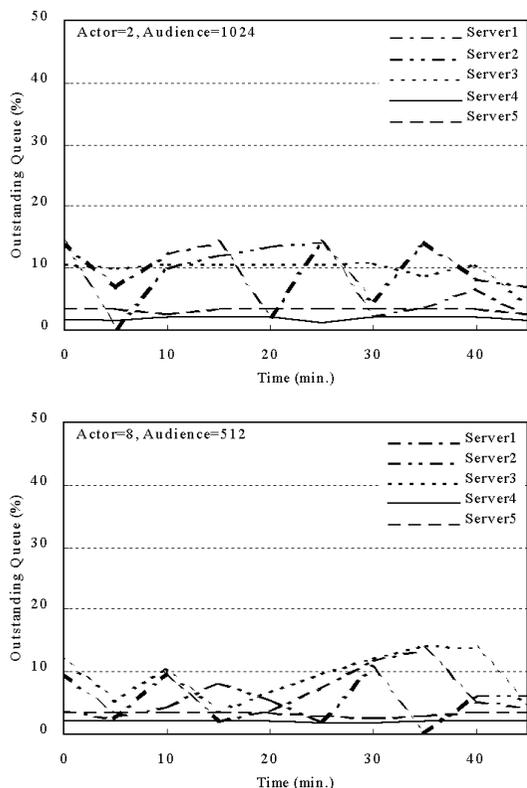


図 12 メッセージ滞留量

Fig. 12 Outstanding message queue.

図 11 のサーバ負荷の測定開始時刻と同じ時刻である．縦軸は滞留メッセージの割合  $M_{wait}$  を示す．ここで  $M_{wait}$  は、ipcs で得られる値である滞留メッセージ量 CBYTES と許容メッセージ量 QBYTES を用いて、次式から得られる．

$$M_{wait} = \frac{CBYTES}{QBYTES} \quad (2)$$

滞留メッセージは、一時的には発生しているがすぐに解消されており、累積している様子は観察されなかった．クライアント端末の利用中でも特に音声を通じなかったり、相手の位置が移動しなかったりするなどの様子は観察されなかったので、この状態は処理限界を超えていない状態と考えられる．Server2 と Server4 ないし Server5 の負荷を比較すると、同じサーバモジュール配置でも計算機の処理性能によって負荷値が改善される．したがって、さらに収容可能な利用者数を増やすためには、サーバ用計算機の台数を増やすか、あるいはより高い処理性能の計算機を導入する必要がある．

#### 4.3 ネットワーク負荷

図 13 にネットワーク上で配信されるデータ量を示す．測定は、測定専用を用意した PC にネットワーク

トラフィック測定ソフトウェアをインストールして行った．各データ値は、30 秒間の測定 5 回の平均である．縦軸は単位時間の受信データ量を示す．横軸はサーバが管理する利用者の数であるが、図 13 (b) ~ 図 13 (d) のグラフ上部の横軸は図 11 と同じ平均利用者数を、図 13 (e) と (f) のグラフ上部の横軸はこのクライアント端末からコミュニケーション可能な観客用 ID を用いた利用者数を示す．測定は役者用 ID を用いた利用者数が 1, 2, 4, 8 人の場合で行った．

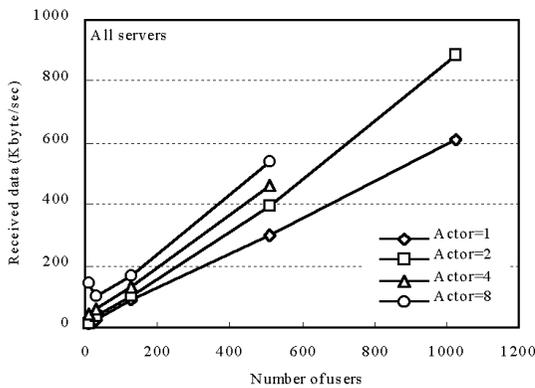
図 13 (a) は、サーバが全クライアントから受信するデータの総計である．図 13 (b) ~ 図 13 (d) は各サーバが他のサーバから受信するデータである．表 2 から分かるように、Server2, 4, 5 は同じサーバモジュール配置になっている．そのため、これらのサーバでの測定においてほぼ同様の結果を得られた．ここでは Server2 の測定結果をこれら 3 台のサーバの代表とするので、Server1, Server2, Server3 に関するグラフを示す．これらの結果から、図 13 (a) の観客用 ID を用いた利用者が 1,024 人の場合のサーバクライアント間トラフィック、あるいは図 13 (b) の Server1 と図 13 (c) の Server2 の役者用 ID を用いた利用者が 8 人の場合のサーバ間トラフィックで、毎秒 1 メガバイト前後のトラフィックが見られる．したがって、サーバ間およびサーバクライアント間の基幹部分のネットワークは、10 Mbps のネットワークでは十分とはいえず、実験で使用した 100 Mbps のような広帯域のネットワークが推奨される．

図 13 (e) は観客の利用者 ID を用いて参加した 1 台のクライアント端末がサーバから受信するデータ量である．受信データは最大でも毎秒 6 キロバイト程度であり、送信データは会話の頻度にもよるが、表 2 のゲームクライアントの送信データと同程度と考えれば、観客としての利用者は、64 Kbps の ISDN によるダイヤルアップ接続でも利用が可能であると思われる．

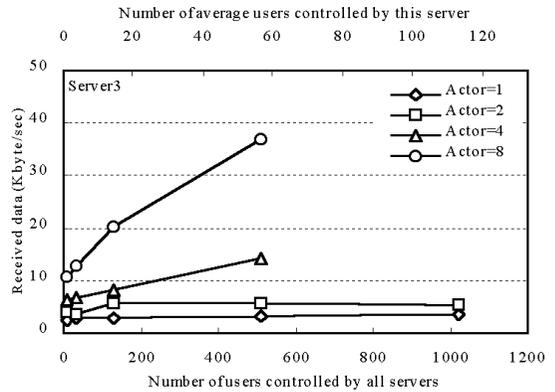
図 13 (f) は役者用 ID を用いて参加した 1 台のクライアント端末がサーバから受信するデータ量である．自分以外の役者用 ID を用いた利用者がもう 1 人までであれば、観客としての利用者と同様の帯域のネットワークで参加可能であるが、それより多い役者用 ID を用いた利用者が存在する場合は、さらに広い帯域のネットワークが必要となる．

#### 4.4 今後の課題

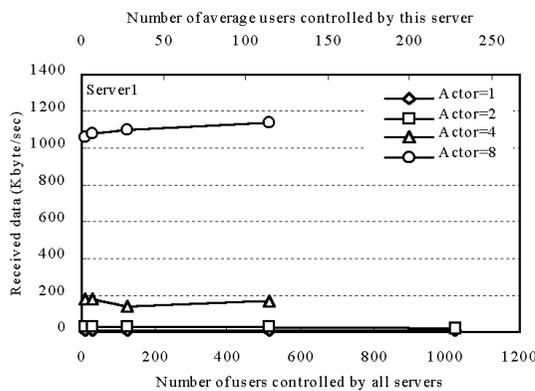
以上のサーバ負荷試験を通して、本システムのサーバ性能およびネットワークトラフィックを明らかにした．この試験では、サーバの分散運用によって千人規模の利用者を収容してコミュニケーションを行うため



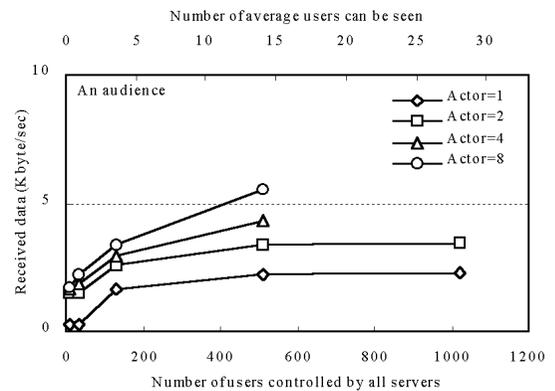
(a) サーバ全体が全クライアントから受信するデータ量の総計  
(a) Amount of servers receiving data from all clients.



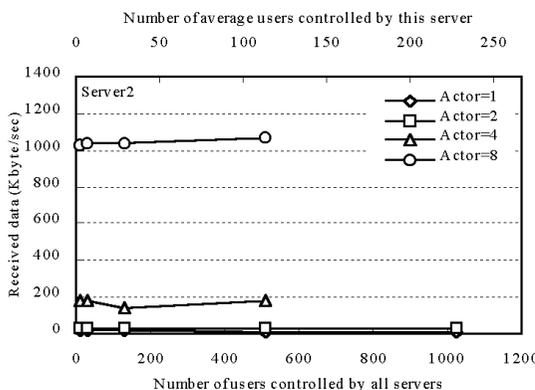
(d) サーバ間通信データ量  
(d) A server receiving data from other servers.



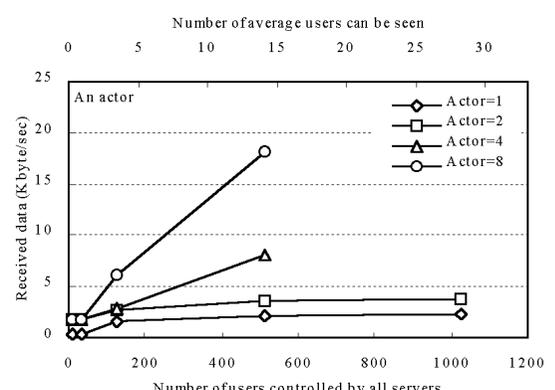
(b) サーバ間通信データ量  
(b) A server receiving data from other servers.



(e) 観客用 ID のクライアントがサーバから受信するデータ量  
(e) An audience client receiving data from servers.



(c) サーバ間通信データ量  
(c) A server receiving data from other servers.



(f) 役者用 ID のクライアントがサーバから受信するデータ量  
(f) An actor client receiving data from servers.

図 13 ネットワークトラフィック量

Fig. 13 Network traffic.

のシステムにおけるサーバ構築の実現性を主に評価したが、これからのネットワークに対応したシステム設計や実際のサービスを想定した仕組みの検討も重要である。以下にこれらの点に関する考察を述べる。

マルチキャストの利用 マルチユーザシステムのサーバがクライアントに対して通信を行う方法として、マルチキャストはネットワークトラフィック量を削減する非常に魅力的な方法である。ただし、マルチ

キャストは信頼性が保証されていないなどの課題もかかっている。最近では信頼性確保のための方法も検討されている<sup>18),19)</sup>が、音声コミュニケーションのように信頼性と即時性が厳しい要求への対応は難しい。3次元空間内の利用者の位置情報やジェスチャデータのよう、多少データの消失が生じてもかまわない種類のデータ通信から対応していくことも検討したい。

参加人数に応じた臨場感の提供 本システムの観客用 ID を用いた利用者間のコミュニケーションは、同じ small group に管理される利用者同士、すなわち 32 人までである。役者用 ID を利用した場合でも自分の存在を千人の相手に伝えることはできるが、相手の存在はテキストチャットでしか伝わらず、アバタの姿と音声は観客用 ID を利用する場合と同じだけしか伝わらない。したがって、千人の利用者が存在する場合でも、視覚的な存在感やざわめきなどの聴覚的な臨場感をこれだけの人数に相当する分だけ伝えるまでに至っていない。視覚的な存在感については、仮想空間をいくつかの部分領域に区切り、その部分領域どうしの境界に仮想のスクリーンを設けて、隣接部分領域に存在する利用者のアバタの姿を画像としてこのスクリーンに投影する方法が提案されている<sup>20),21)</sup>。この方法を利用することによって、スクリーンに投影される画像の受信データの増加分だけで実際の参加人数を視覚的に体感することは可能である。このような手法の採用により「見える」利用者のアバタが増えれば、そのスクリーンに映る利用者との音声コミュニケーションも行えるように、small group を動的に切り替える方法も検討する必要がある。一方、聴覚的な臨場感については、意味を持つ音声と雰囲気との創出としての音声を利用者がどのように分けて感受しているかといった、感覚面の基礎的な検討もシステム設計とあわせて行わなければならないと考える。以上のような視覚的な臨場感を提供できるシステムを構築し、役者側端末の没入感やアバタのジェスチャの表現力とあわせて、コミュニケーションシステムとしての利用評価を行いたい。

## 5. おわりに

本論文では千人規模の大規模な人数の利用者がコミュニケーションを行える仮想空間を提供することを目指した、マルチユーザ 3 次元仮想環境システムについて述べた。

本システムの分散型サーバは、特別な利用者 ID を用いて参加する 8 人までの利用者から 512 人ないし 1,024 人までの通常の利用者に対して、アバタを表示

し音声コミュニケーションを行える耐久性を備えていることを確認した。InterSpace では、著名人を招き 80 人程度の聴衆が仮想空間に集まった講演会を企画した経験がある<sup>22)</sup>。このときは 4 つの仮想の部屋に聴衆が分かれて参加し、講演者の前にはそれぞれの部屋にログインした端末を 4 台設置した。講演者が複数の端末を扱うのは煩雑であり、さらに聴衆が増えれば講演者の端末も増やさざるをえず、すべてを操作することは不可能になる。locales のようなコンセプトを採用しているシステムでも 1 つの locale の許容人数を超えた利用者とのコミュニケーションを実現しようとする、上記の講演会と同様の方法を採らざるをえないだろう。今回開発したシステムを用いれば、講演者の操作端末は 1 台で十分であるうえに、さらに多い聴衆に集まってもらうことが可能となる。

ただし、今回開発したシステムにおける観客型利用者間のコミュニケーションは、同じ small group に割り当てられた利用者に限定される。今後、別のサーバに割り当てられた利用者ともコミュニケーションを行えるように動的に割り当てを切り替えられるシステム設計を検討していきたい。また、異なるサーバモジュールに割り当てられた利用者の姿は見えないため、本当に千人規模の人数が参加しているような視聴覚上の臨場感を創出することもこれからの課題である。これらの課題に臨み、これから充実するであろうマルチキャストなどの有効な技術への対応も検討しながら、実際にコンテンツを開発して耐久試験を重ねて、最終的には劇場のような実際に大規模な人数が集まる仮想空間サービスへの適用を考えている。

## 参考文献

- 1) Sugawara, S., Suzuki, G., Nagashima, M., Matsuura, M., Tanigawa, H. and Moriuchi, M.: InterSpace: Networked virtual world for visual communication, *IEICE Trans.*, Vol.E77-D, No.12, pp.1344-1349 (1994).
- 2) 松浦宣彦, 松本敏宏, 清末悌之, 菅原昌平, 正木茂樹: 簡易型多地点テレビ会議システム NetForum の開発と評価, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.11, pp.3142-3151 (2000).
- 3) Minoura, D., Kato, Y., Masaki, S. and Ichinose, S.: A Shared Distance Learning Environment in 3-D Cyber Space with 2-D Teaching Material Integration, *Journal of IEEEJ*, Vol.29, No.3, pp.197-213 (2000).
- 4) Walker, G.: The Mirror-Reflections on Inhabited TV, *British Telecommunications Engineering*, Vol.16, No.1, pp.29-38 (1997).

- 5) Walser, R.: Elements of a Cyberspace Playhouse, *Proc. National Computer Graphics Association '90*, pp.403-411 (1990).
- 6) 佐々木健一: せりふの構造, 講談社学術文庫 (1994).
- 7) Miller, D.C. and Thorpe, J.A.: SIMNET: The advent of simulator networking, *Proc. IEEE*, Vol.83, No.8, pp.1114-1123 (1995).
- 8) Macedonia, M.R., Zyda, M.J., Pratt, D.R., Barham, P.T. and Zeswitz, S.: NPSNET: A network software architecture for large scale virtual environments, *Presence*, Vol.3, No.4, pp.265-287 (1994).
- 9) Hagsand, O.: Interactive multiuser VEs in the DIVE system, *IEEE Multimedia*, Vol.3, No.1, pp.30-39 (1996).
- 10) Greenhalgh, C. and Benford, S.: A multicast network architecture for large scale collaborative virtual environments, *Proc. ECMAST'97*, pp.113-128 (1997).
- 11) Barrus, J.W., Waters, R.C. and Anderson, D.B.: Locales: Supporting Large Multiuser Virtual Environments, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.16, No.6, pp.50-57 (1996).
- 12) Greenhalgh, C., Purbrick, J. and Snowdon, D.: Inside MASSIVE-3: Flexible Support for Data Consistency and World Structuring, *Proc. ACM Collaborative Virtual Environments 2000*, pp.119-127 (2000).
- 13) Cruz-Neira, C., Sandin, D.J. and DeFanti, T.A.: Surrounding-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *Proc. SIGGRAPH'93*, pp.135-142 (1993).
- 14) Hirose, M., Ogi, T. and Yamada, T.: Integrating Live Video for Immersive Environments, *IEEE Multimedia*, Vol.6, No.3, pp.14-22 (1999).
- 15) 山本憲男, 河野隆志, 石橋 聡: 没入型コミュニケーション環境における動作伝達手法の検討, 信学総大, A-16-29, p.333 (2000).
- 16) 小西孝明, 井上雅之, 清末悌之, 正木茂樹, 菅原昌平: 3次元仮想空間における音声と顔画像によるコミュニケーションと仮想社会の展開, VR学会仮想都市研究会, CVCS98-9, pp.19-24 (1998).
- 17) 小長井俊介, 森内万知夫, 石橋 聡: 共有仮想空間における音声コミュニケーション方式の検討, 信学技報, MVE99-73, pp.61-66 (2000).
- 18) Yavatkar, R., Griffioen, J. and Sudan, M.: A Reliable Dissemination Protocol for Interactive Collaborative Applications, *Proc. ACM Multimedia'95*, pp.333-344 (1995).
- 19) Broll, W.: DWTP—An Internet Protocol for Shared Virtual Environments, *Proc. VRML'98*, pp.49-56 (1998).
- 20) 箕浦大祐, 山名岳志, 正木茂樹, 一之瀬進: 多人数参加型3次元仮想空間における大規模人数表示方法, 信学論 D-II, Vol.J81-D-II, No.5, pp.962-971 (1998).
- 21) Ensor, J.R., Carraro, G.U. and Edmark, J.T.: Accommodating performance limitations in distributed virtual reality systems, *Computer Communications*, Vol.23, No.3, pp.199-204 (2000).
- 22) 親方, 出番です—仮想講演会を主婦企画, 朝日新聞 1998年8月21日朝刊社会面, p.39 (1998).

(平成 13 年 3 月 13 日受付)

(平成 13 年 9 月 12 日採録)



箕浦 大祐 (正会員)

平成 5 年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 平成 7 年同大学院修士課程修了. 同年日本電信電話株式会社入社. ヒューマンインタフェース研究所入所. サイバースペースシステムにおけるシステム設計およびヒューマンインタフェースの研究開発に従事. 現在, NTT サイバースペース研究所メディア通信プロジェクト社員. 電子情報通信学会会員.



石橋 聡

昭和 55 年徳島大学工学部情報工学科卒業, 昭和 57 年同大学院修士課程修了. 同年日本電信電話公社入社. 電気通信研究所入所. 動画像符号化および映像通信システムの研究開発に従事. 現在, NTT サイバースペース研究所メディア通信プロジェクト主幹研究員. 工学博士. IEEE, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, パーチャルリアリティ学会各会員.