

放送型サイバースペースのためのオブジェクトの人気度と距離を考慮したスケジューリング方式

小川 剛史^{†1} 永石 博憲^{†2}
原 隆浩^{†3} 西尾 章治郎^{†3}

大規模な仮想空間システムでは、クライアント数の増加にともなうサーバへの負荷の増大が問題となる。そこで筆者らの研究グループでは、サーバにおける負荷を削減するために放送型サイバースペースを提案し、これまでに空間モデルデータのスケジューリング方式、およびクライアントにおけるプリフェッチ方式を提案してきた。本論文では、オブジェクトの属性情報や移動データを放送する環境を想定し、これらのデータを効率良く提供するために、仮想空間におけるオブジェクトの人気度の偏り、オブジェクトの閲覧者であるアバタとオブジェクトの距離、およびデータの放送時間間隔を考慮したスケジューリング手法を提案する。また、提案手法の性能を評価するためにシミュレーション実験を行い、有効性を確認した。

A Scheduling Method Based on Object Popularity and Distance between Objects for a Broadcast-based Cyberspace

TAKEFUMI OGAWA,^{†1} HIRONORI NAGAISHI,^{†2} TAKAHIRO HARA^{†3}
and SHOJIRO NISHIO^{†3}

In large-scale networked virtual environments, excessive load on the server occurs due to an increase of clients. In order to reduce the server load, we previously proposed the broadcast-based cyberspace, methods of scheduling spatial data at the server, and prefetching methods at clients. In this paper, we assume an environment where the information on positions and properties of objects is broadcasted as data items and propose a scheduling strategy for improving broadcast efficiency. Our scheduling strategy considers the object popularity, distance between objects and avatars which observes the object, and the broadcast period. Moreover, we also show the results of simulation experiments regarding the performance of our proposed method.

1. はじめに

近年のネットワーク技術とコンピュータ技術の発展にともない、ネットワークからアクセスできる大規模な仮想空間を大勢の人々が利用するシステムが多数登場している。研究の分野では、InterSpace¹¹⁾ や PAW¹³⁾、FreeWalk¹⁵⁾ のように仮想社会を構築して人々のコミュ

ニケーション支援や行動解析に利用されている。また、実用化された例としては、NPSNET⁴⁾ のように軍事シミュレーション環境を構築して軍事訓練を支援するシステムや、FINAL FANTASY_(R) XI^{*1} や Lineage^{*2}、Ultima_(TM) Online^{*3}などに代表される多人数型オンラインロールプレイングゲーム (Massively Multiplayer Online Role-Playing Game: MMORPG) がある。

従来システムの多くは、サーバ・クライアント型のアーキテクチャを用いて構成され^{9),19)}、サーバが仮

†1 東京大学情報基盤センターキャンパスネットワークング研究部門
Campus Networking Division, Information Technology Center, The University of Tokyo

†2 日本アイ・ビー・エム株式会社 GBS 事業アプリケーション・サービス AIS 第三ビジネス・コンピテンシー
AIS. Business Competency Center No.3, Application Services IBM Global Business Services, IBM Japan, Ltd.

†3 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻
Department of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

*1 FINAL FANTASY は (株) スクウェア・エニックスの登録商標です。

<http://www.playonline.com/#f11/home/index.html>

*2 <http://www.lineageonline.jp>

*3 Ultima はエレクトロニック・アーツ (株) の商標です。
<http://www.jp.uo.com/>

想空間を構成するモデルデータや、仮想空間内で発生するイベントに関するデータをすべて管理し、クライアントが必要なデータを要求した際にサーバがデータを提供する仕組みとなっている^{3),5),6),20)}。そのため、MMORPGのように、1つの仮想空間に数千人が同時に参加するようなシステムでは、クライアント数の増加にともなうサーバ負荷の増大や、クライアントが大規模でリアリティの高い仮想空間のデータをサーバから取得する際のネットワーク負荷の増大などが問題となる。従来システムではサーバにおける処理を仮想空間の更新処理に特化させたり¹⁾、サーバを多重化したりして、負荷分散を行っている。複数のサーバを用いる場合、どのサーバがどのクライアントの処理を担当するかを決定する必要があるため、仮想空間におけるアバタの位置¹⁰⁾や、ネットワークにおけるクライアントの位置⁴⁾に基づく選択手法、および両者を考慮した選択手法^{8),22)}が提案されている。

これらの問題を解決するため筆者らの研究グループでは、仮想空間を構成するデータをプッシュ型の放送型配信を用いてクライアントへ提供する、放送型サイバースペースを提案している¹⁶⁾。これまでは、比較的更新が頻繁には行われない仮想空間のモデルの配信に注目し、仮想空間を複数の部分空間に分割して、部分空間ごとのモデルをデータアイテムとする放送スケジューリング手法¹⁷⁾を提案した。提案手法では仮想空間内を行動するアバタの移動に基づいてスケジューリングすることで、必要なモデルデータをクライアントが受信するまでの待ち時間を削減している。

仮想空間を構成するデータには、空間構造を決定するモデルデータと、ユーザが操作するアバタの位置や属性、アバタどうしの会話に関するデータなどユーザのインタラクションによるデータが存在する。このようなインタラクションに関するデータは、仮想空間における一貫性を保持するためにも、即座に全クライアントへ配信される必要があるが、これまでに提案している手法ではこれらのデータを対象としていなかった。本論文では、放送型サイバースペースにおいて、アバタの位置など更新頻度の高いデータをプッシュ型放送を用いて提供するためのスケジューリング方式について提案する。提案手法では、多くのアバタ（ユーザ）に閲覧されている人気度の高いオブジェクト、ならびにアバタとの距離が近いオブジェクトに関する情報をデータアイテムとして頻繁に放送することで仮想空間内の円滑なインタラクションを実現する。

以下、2章では、放送型サイバースペースの概要を述べ、3章において提案手法の詳細について説明する。

4章でシミュレーションによる提案手法の評価結果を示し、提案手法の有効性について議論し、5章では、仮想空間を実現する関連システムについて述べる。最後に6章で本論文のまとめを述べる。

2. 放送型サイバースペース

放送型サイバースペースは以下の4点の特徴を持つサイバースペースにおいて、プッシュ型放送配信を用いることで仮想空間情報を効率良くクライアントへ提供するアーキテクチャである。

- リアルで広大な仮想空間を有する。
- 仮想空間を構成するデータ量は莫大である。
- 非常に多くのユーザがシステムにアクセスし、同一の空間を複数のユーザが体験している。
- 他のユーザのインタラクションが、ユーザのビューに反映される。

放送型サイバースペースの概略を図1に示す。サーバ・クライアント間のネットワーク帯域を、静的なデータをサーバからクライアントへ提供する帯域（スタティックデータ用帯域）と、リアルタイム情報をサーバ・クライアント間で交換する帯域（ダイナミックデータ用帯域）とに分割し、それぞれの帯域においてプッシュ型の放送配信方式と従来方式を適用している。サーバは、管理している仮想空間の空間モデルといった頻繁には更新されないデータを放送の単位となるデータアイテムに分割し、スタティックデータ用帯域を用いて一定の周期で繰り返し放送する。一方、ダイナミックデータ用帯域を用いてクライアントから随時送信されてくるアバタの操作情報といったリアルタイムデータは、サーバ側でのステータスチェックや衝突判定などの処理を行った後、その結果を同じ帯域を用いてクライアントに転送する。クライアントでは、ユーザに一

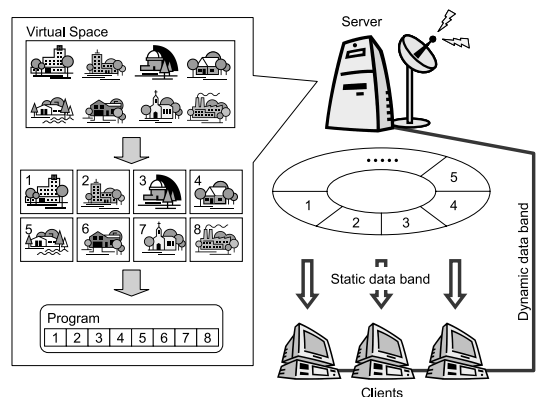


図1 放送型サイバースペース
Fig. 1 Overview of the broadcast-base cyberspace.

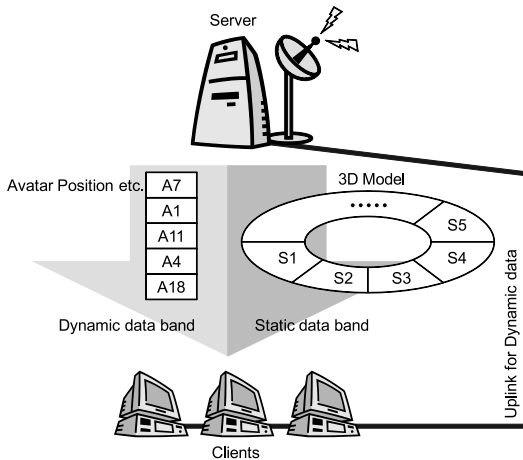


図 2 放送型サイバースペースの拡張

Fig. 2 Extended broadcast-base cyberspace.

人称視点で仮想空間のビューを提供し、マウスやキーボードなどの入力機器を用いて、ユーザが自身のアバタを操作する。

これまでのシステムでは、同一の場所を表示しているクライアント間での不整合を生じさせないために、それらのクライアント全体へ処理結果を配信しなければならなかった。したがって、たとえば、展示会や舞台などのように多数のユーザに注目されているオブジェクトやアバタが存在した場合、処理結果を配信すべきクライアントが多数存在するため、その配信コストが増大するという問題があった。本論文では、これまでの放送型サイバースペースを拡張し、リアルタイムデータの配信にも、同報性、即時性に優れたプッシュ型放送配信を利用することを考える。

図 2 に、拡張後の放送型サイバースペースの概要を示す。空間モデルはこれまでと同様の方式を利用することとし、リアルタイムデータ放送用の帯域は別に用意する。放送するリアルタイムデータとしては、オブジェクトの座標や、形状、テクスチャといった実データもしくはその差分データを想定する。オブジェクトがアバタの場合には、テキストや音声による会話データも含まれる。これらのデータをオブジェクトごとにデータアイテムとしてまとめ、リアルタイムデータ放送用の帯域を用いて全クライアントへ放送することによって、配信コストを低減させる。

3. オブジェクトの人気度と距離に基づくスケジューリング方式

システム全体で考えた場合、多数のクライアントのビューに投影されるオブジェクトのデータを配信する

と、1回の放送で多数のクライアントのビューを更新できるため、多くのアバタ（ユーザ）から見られているオブジェクトの更新頻度を上げることが、システム全体での更新頻度向上につながる。また、クライアントでは、アバタ（ユーザ）の近くに存在するオブジェクトは、移動させたり、話しかけたりといったインタラクションが発生する可能性が高いため、一貫性を保つためにもつねに最新の状態で表示される必要がある。また、近くのオブジェクトは、ビュー内でも大きく表示されるため、視覚的にも重要なオブジェクトである。本論文では、以上の点に注目してオブジェクトの重要度を算出し、その重要度に基づいて放送するオブジェクトを決定するスケジューリング方式を提案する。

3.1 オブジェクトの重要度

各オブジェクト O_i ($i = 1 \dots M$) の重要度 I_i を下記の式で表す。

$$I_i = \frac{P_i}{D_i} \quad (1)$$

P_i , D_i はそれぞれオブジェクトの人気度とアバタからの距離であり、 I_i が大きなオブジェクトほど、アバタの近くに存在し、多くのアバタ（ユーザ）から見られているオブジェクトとなる。

オブジェクトの人気度 P_i オブジェクトを視野におさめているアバタ（ユーザ）数。

アバタからの距離 D_i オブジェクトに最も近い位置にいるアバタ（ユーザ）との距離。オブジェクト O_i とアバタ A_j ($j = 1 \dots N$) 間の距離を d_{ij} とすると $D_i = \min(d_{ij})$ となる。

3.2 PIDR (Popularity/Distance regarding Remaining time) 方式

本節では、提案するスケジューリング方式について述べる。提案方式で着目するオブジェクトの人気度とアバタからの距離は時間とともに変化するため、空間モデルの配信で行っているような、あらかじめ確定した放送スケジュールに基づいて繰り返しデータを配信する方式は適さない。

提案方式では、随時、式 (1) で算出されるオブジェクトの重要度を用いて放送すべきオブジェクトを決定する。具体的には、次の手順によって放送プログラムのスケジューリングを行う。

- (1) 各オブジェクト O_i の重要度 I_i を式 (1) で計算する。
- (2) 各オブジェクト O_i について、次に放送しなければならない時刻（デッドライン）までの残り時間 R_i を計算する。デッドラインの詳細については 3.2.1 項に示す。

- (3) オブジェクト重要度 I_i と残り時間 R_i を用いて, I_i/R_i を暫定的な放送優先度とする.
- (4) 特定のオブジェクトに関するデータアイテムが連続して放送されるのを防ぐため, 暫定的な放送優先度に *balancer* をかけて, 最終的な放送優先度 $Priority_i$ とし, 最も放送優先度の大きいオブジェクトのデータアイテムを放送する. *balancer* については 3.2.2 項に示す. オブジェクトの人気度 P_i とアバタからの距離 D_i を用いると放送優先度は以下の式で表される.

$$Priority_i = \frac{P_i}{D_i R_i} \cdot balancer \quad (2)$$

- (5) 手順 (1)~(4) を繰り返し実行する.

3.2.1 オブジェクトのデッドライン

人気度が高く, アバタから近距離に存在するオブジェクトを選択することによって, サイバースペースを利用する多くのユーザにとって重要なオブジェクトのデータを配信することが可能である. しかし, 少数のアバタだけが見ている人気度の低いオブジェクトは放送間隔が長くなるために, それらのアバタ (ユーザ) のビューの更新頻度が著しく低下する可能性がある.

提案手法では, 各オブジェクトに関して維持されるべき最低限の更新頻度 (要求更新頻度と呼ぶ) がアプリケーションによって決定されるものとし, この要求更新頻度を下回らないように放送するオブジェクトを決定する. オブジェクト O_i の要求更新頻度を毎秒 f_i 回とすると, 少なくとも $1/f_i$ 秒に 1 回放送されなければならないこととなる. ここで, $1/f_i$ を放送時間間隔の上限と呼び, U_i とすると, オブジェクト O_i のデッドラインは前にオブジェクト O_i のデータを放送した時刻 t_i を用いて $t_i + U_i$ となる. したがって, 残り時間 R_i は現在時刻を t とすると $t_i + U_i - t$ となる.

式 (2) から分かるように, オブジェクト O_i の残り時間 R_i が小さくなるとそのオブジェクトの放送優先度は大きくなる. なお, デッドラインを越えた場合, つまり R_i が負の値となった場合には, タイムアウトとしてデータアイテムを放送せず, デッドラインであった $t_i + U_i$ に U_i を加えて, 新たなデッドラインを設定する. そのため, タイムアウトしたオブジェクトは更新頻度が減少することとなる.

3.2.2 *balancer* について

各オブジェクトの残り時間に余裕がある場合, 放送優先度をオブジェクトの人気度とアバタからの距離のみを考慮して決定すると, 特定のオブジェクトだけが低い優先度となり, 同じオブジェクトのデータアイテムが連続して放送されるという問題が発生する.

balancer はこのような現象を回避するためのパラメータである.

オブジェクト O_i の *balancer_i* は, データアイテムが最後に放送されてからの経過時間 E_i と, 放送時間間隔の上限 U_i を用いて次式で表される.

$$balancer_i = \frac{E_i}{U_i}$$

balancer_i は, データアイテムの放送直後は低い値をとり, デッドライン近づくに従って大きくなるため, 同一のデータアイテムが連続して放送されることを防いでいる.

4. シミュレーション実験

本章では, 提案したスケジューリング手法の性能を評価するために行ったシミュレーション実験について述べる. 評価環境としては, 仮想社会のシミュレーションや 3 次元仮想空間を用いたショッピングモールなど, ユーザが自由に活動する空間を想定する. このような仮想空間では, 現実空間と同様, ユーザの行動は自身の興味に加え, 周囲の状況にも影響を受けると考えられる. 具体的には, 人が集まっている場所を発見するとその対象に関心を持ち, 同調して自分も近づくといった行動である. シミュレーション実験では, ユーザの操作するアバタの行動特性として同調行動を仮定し, 仮想空間におけるオブジェクトの人気度に偏りがある環境を設定した.

以下では, まずアバタの行動特性について説明し, 続いて提案したスケジューリング手法の性能評価について述べる.

4.1 アバタの行動特性

アバタの同調行動をシミュレートするため, アバタは以下に示す行動をとることとした.

- (1) 視野内の全オブジェクトに関して人気度をチェックし, 人気度が v_a 以上のオブジェクトを注目対象とする. ただし, 過去に注目したオブジェクトのうち新しいものから v_b 個のオブジェクトは除く.
- (2) 手順 (1) で注目対象となるオブジェクトが複数ある場合, 人気度が最大のオブジェクトを注目対象とする.
- (3) 注目対象となるオブジェクトがない場合, ランダムな地点に移動しながら, 注目対象となるオブジェクトが存在するかどうかを判定する.
- (4) 注目対象となるオブジェクトが存在する場合, そのオブジェクトに向かって直線的に移動し, v_c の距離まで接近する. その後, v_d 秒間は距

離 v_c を維持し、対象が移動している場合も追従する。

- (5) v_d 秒間が経過した後、確率 p_c で手順 (1) に戻る。 $(1 - p_c)$ の確率で、周囲のオブジェクトの状況を見捨ててランダムな地点に向かって移動し、その地点に到着後、手順 (1) に戻る。

4.2 シミュレーション環境

評価に用いた環境は以下のとおりである。

- 仮想空間は上下、左右が接続された 1 辺 2,500 メートルの正方形領域とする。
- 仮想空間内のオブジェクトはすべてアバタとし、その総数は 2,000、初期位置はランダムとする。
- サーバは 1 つとし、各アバタの座標を 1 つのデータアイテムとして 1.9 Mbps もしくは 1.0 Mbps で放送する。前者はアバタの要求更新頻度を満たすことが容易な環境、後者は比較的困難な環境を想定している。
- 各データアイテムのサイズはすべて等しく 20 バイトとする。
- アバタの視野はアバタを中心とする半径 50 メートルの円とする。
- アバタの移動速度は、毎秒 2.5 メートル以上 10 メートル以下で指数分布に従う乱数とした。
- 各アバタは 1 メートル移動するごとに最低 1 回の更新が要求されることとする。つまり、単位移動距離あたり 1 回の更新という条件から、要求更新頻度は移動速度と同じ値となる。たとえば、毎秒 10 メートルで移動するアバタの要求更新頻度は毎秒 10 回である。
- $v_a = 5$ 、 $v_b = 10$ 、 $v_d = 10$ 秒とし、 v_c は 1 秒間の移動距離とする。 p_c は同調行動を継続する確率を意味し 0.95 とする。アバタどうしは 1 メートル以上近づかないこととした。

シミュレーションで得られたオブジェクトの人気度の分布を図 3 に示す。横軸は人気度の降順に並べたオブジェクト ID を、縦軸は人気度を表す。図 3 より、オブジェクトの人気度に偏りのある環境となっていることが分かる。

4.3 評価基準

各データアイテムについて、単位移動距離あたりの更新頻度およびデッドラインの超過率を測定した。超過率とは要求更新頻度に対してデッドラインを超過した割合を示す。たとえば要求更新頻度が 10 のアバタに関して、タイムアウトが 1 回発生した場合、超過率は 0.1 となる。これらの値をアバタからの距離でクラス分けし、その平均値を評価値とした。

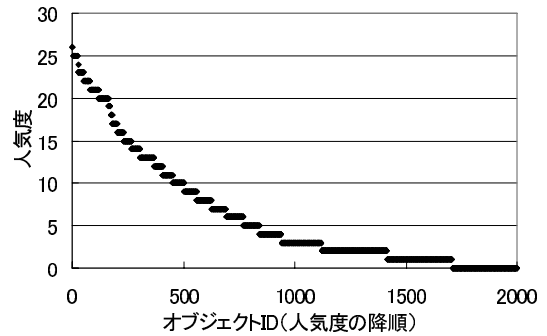


図 3 人気度の分布

Fig. 3 Object popularity distribution.

比較手法として、CycRnd 方式、LRF 方式、IDR 方式、ならびに PIR 方式を適用した場合の結果を測定した。これらの方式の概要を次に示す。なお、IDR 方式および PIR 方式はそれぞれ優先度 $Priority'$ 、 $Priority''$ を用い、優先度の大きなデータアイテムを逐次放送する。各変数は提案手法 (PIDR 方式) と同じ意味で用いる。

CycRnd (Cyclic Random) 方式

1 周期に 1 度ずつデータアイテムを放送するようなプログラムをランダムに作成する。プログラムは 1 周期ごとに更新する。

LRF (Least Remaining time First) 方式

デッドラインまでの残り時間が最小のオブジェクトのデータを選択して放送する。

IDR (1 / Distance / Remaining time) 方式

次式の優先度 $Priority'$ に基づき、デッドラインを満たす範囲内で、近い位置にアバタが存在するオブジェクトのデータアイテムを選択して放送する。

$$Priority' = \frac{1}{DR} \cdot balancer$$

PIR (Popularity / Remaining time) 方式

次式の優先度 $Priority''$ に基づき、デッドラインを満たす範囲内で、人気度の大きなオブジェクトのデータアイテムを選択して放送する。

$$Priority'' = \frac{P}{R} \cdot balancer$$

以下では、単位移動距離あたりの更新頻度および平均超過率の計測結果と放送するデータの種類とそれらの関係について議論する。

4.3.1 単位移動距離あたりの更新頻度

オブジェクトの更新頻度を示す評価項目として、オブジェクトの単位移動距離あたりの更新頻度を用いる。

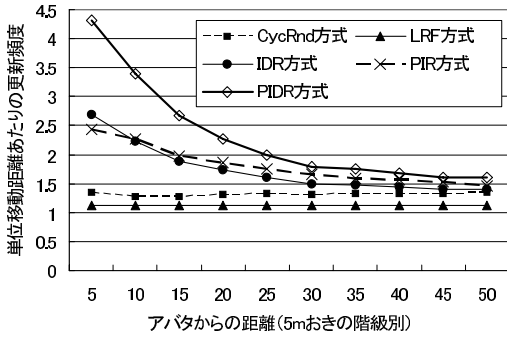


図 4 単位移動距離あたりの更新頻度

Fig. 4 Average update frequency per one meter movement.

この値が大きいほど、アバタ（ユーザ）が閲覧しているオブジェクトのデータが頻繁に更新されることを示し、値が 1.0 を下回る場合、要求更新頻度を満たしていないことを示す。単位移動距離あたりの更新頻度をアバタからの距離に応じて評価するために、アバタからの距離を 10 個のクラス C_i ($1 \leq i \leq 10$) に分け、クラスごとに単位移動距離あたりの更新頻度を平均する。アバタの視野を半径 50 メートルの円としているため、それぞれのクラスの幅は 5 メートルとなる。よって、クラス C_i では、アバタからの距離が $5(i - 1)$ を超え $5i$ 以下のオブジェクトの更新頻度を集計している。たとえば、2 つのアバタの視野に入っているオブジェクトがあり、オブジェクトとアバタの距離がそれぞれ 5 メートル、11 メートルのとき、このオブジェクトの更新頻度はクラス C_1 と C_3 に算入される。

放送帯域幅を 1.9 Mbps とした場合の単位移動距離あたりの更新頻度を図 4 に示す。横軸はクラスを示し、値が大きくなるに従ってアバタからの距離が大きくなる。図 4 より、PIR 方式、IDR 方式ならびに PIDR 方式を適用した場合、LRF 方式や CycRnd 方式に比べて更新頻度が向上しており、アバタからの距離が近いオブジェクトほど値の増加が大きい。これより、優先度 *Priority* において距離 D を作用させることにより、アバタに近いオブジェクトの更新頻度を向上させることができることが分かる。一方、 D を作用させない PIR 方式においても IDR 方式とおおむね同程度の更新頻度の増加が確認できるが、これは、アバタの行動モデルにおいて、人気度 P が大きいことと D が小さいことが類似した意味を持つためと考えられる。また、PIDR 方式を適用することにより、人気度および距離のみを考慮した PIR 方式や IDR 方式に比べて更新頻度が向上し、アバタからの距離が近いほど大幅に増加する。このことから、提案手法を適用することに

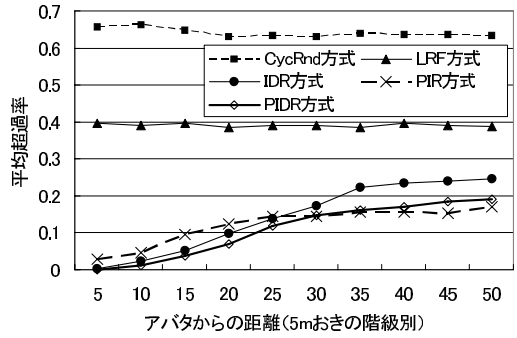


図 5 平均超過率

Fig. 5 Average over ratio.

より、アバタ（ユーザ）が閲覧しているオブジェクトの更新頻度を全体として向上させることができ、同時にアバタからの距離が近く視覚的に重要と考えられるオブジェクトほど頻繁に更新できることが分かる。

4.3.2 超過率

超過率が小さいほど、放送時間間隔の上限を満たせる可能性が高く、アバタが閲覧しているオブジェクトのデータについて十分な更新頻度が保たれることを表す。また、単位移動距離あたりの更新頻度と同様に、アバタからの距離に基づくクラスごとに超過率の平均を集計した。なお、人気度が 0 のオブジェクトはいずれのアバタからもアクセスされておらず、デッドラインを越えても問題とならないため、人気度が 0 のオブジェクトのデータアイテムは超過率に算入していない。

放送帯域幅を 1.0 Mbps とした場合の平均超過率を図 5 に示す。横軸は階級を示し、左からアバタからの距離が小さい順に並ぶ。図 5 より、PIR 方式、IDR 方式ならびに PIDR 方式を適用した場合、CycRnd 方式や LRF 方式に比べて超過が大幅に抑制されており、優先度を決定する際に各データアイテムのデッドラインを考慮することが有効であるといえる。さらに、PIR 方式、IDR 方式ならびに PIDR 方式を適用することにより、アバタからの距離が小さいオブジェクトほど低い超過率を実現でき、アバタにとって重要と考えられるオブジェクトほど十分な更新頻度を得ることができる。また、図 5 から、PIR 方式、IDR 方式、PIDR 方式の順に、アバタから遠いオブジェクトよりも近いオブジェクトの超過を優先して抑制する傾向が強いといえるが、PIDR 方式ではアバタから遠くに位置するオブジェクトについても超過を十分に抑制できることが分かる。

4.3.3 放送データの種類と放送頻度，超過率との関係

シミュレーション実験では，簡単化のため，アバタの座標のみを放送することとした．図 4 は，アバタの近くに存在するオブジェクトのデータアイテムが頻繁に放送されることを示している．つまり，ビューに表示されるオブジェクトのなかでアバタの近くに存在するオブジェクトほど，滑らかに移動することとなる．提案手法では，データアイテムに含まれるデータの種類は規定しておらず，オブジェクトの座標や形状，テクスチャなどの実データもしくは差分データを想定している．座標値だけでなくこれらのデータをデータアイテムに含む場合にはデータアイテムのサイズが大きくなるため，それにともない放送帯域幅も広くする必要があると考えられるが，アバタの近くのオブジェクトのデータアイテムが頻繁に放送される傾向は保たれると予想され，ビューに表示されるオブジェクトは近くのものほど，滑らかに変形したり，滑らかに色が変化したりすることとなる．詳細な検証は，追加のシミュレーション実験や実システムを構築するなどして行う必要があるが，今後の課題である．

超過の発生が，オブジェクト間のインタラクションに与える影響について考察する．例としてアバタからの距離が 0 から 5 メートルの領域と 20 から 25 メートルの領域にある要求更新頻度 10 のオブジェクトについて考える．要求更新頻度 10 のオブジェクトは，1 メートル移動する間に 10 回データが更新されなければならない．つまり，平均して 0.1 メートル移動するごとのデータ更新が要求されているオブジェクトである．PIDR 方式では，図 5 より，0 から 5 メートルの領域では平均超過率が 0 であり要求更新頻度が満たされている．一方，20 から 25 メートルの領域では平均超過率が 0.1 であり，1 回デッドラインを越えることになるので，1 メートルの移動する間に 9 回データが更新され，8 回は 0.1 メートルずつ，1 回は 0.2 メートルオブジェクトが移動する．しかし，オブジェクトが同じ距離を移動した場合でも，近くのオブジェクトよりも遠くのオブジェクトは，ビューの中ではあまり移動しないことや，遠くのオブジェクトに対して直接移動させるなどのインタラクションが発生する可能性は低いことから，このような超過の影響は大きくないと考えられる．

また，データアイテムに発言に関するデータ（テキストや音声）といったユーザのインタラクションによるデータが含まれている場合，要求更新頻度が 10 であれば 0.1 秒ごとにデータアイテムが配信されるた

め，そのデータアイテムには，たとえば 0.1 秒分の音声データが含まれる．超過が発生するとそのデータが失われることとなるが，上述の議論と同様に，20 から 25 メートルに領域にいるアバタの 0.1 秒分の音声データを失ってしまったとしても大きな影響は受けないと考えられる．音声データを配信に関しては，文献 23) などの従来研究を参考にして，データアイテムの構成方法をより詳細に検討する必要があり，今後の課題である．

5. 関連研究

大規模 3 次元仮想空間の実現に関する研究がこれまでに多数行われている．本章では，本研究と従来研究との関係について議論する．

5.1 マルチサーバによる負荷分散

文献 2) および文献 21) では，仮想空間を複数の領域に分割し，各領域を異なる複数のサーバで管理することで，サーバの負荷を低減する手法を提案している．どちらの研究においても，仮想空間の場所によってアバタの密度が異なることに着目しており，文献 2) では，あらかじめアバタの存在密度を予想して，空間を不均衡に分割し，管理すべきクライアント数を平均化することで，サーバの負荷を平均化している．また，クライアント数の増加とともに通信量が爆発的に増加するため，各管理領域でクライアントによるマルチキャストグループを設けクライアント同士で更新情報を交換することでサーバの通信負荷を低減している．文献 21) では，管理領域のアバタの密度が高くなってくるとその領域を分割し，一部の領域の管理を別のサーバに依頼することで，負荷分散を行っている．

放送型サイバースペースは，プッシュ型放送配信を用いることで，同一データを同時に全クライアントへ提供し，クライアントの保持するデータの整合性を保ち，仮想空間における一貫性を維持している．また，クライアント数が増大してもサーバにおける通信のオーバーヘッドが増加しない．提案手法では，オブジェクトの人気度に基づいて放送するデータアイテムを決定しているが，人気度の高いオブジェクトの周りには多くのアバタが存在することになるため，アバタの密度に着目しているという点では文献 2)，21) と類似している．しかし，これらの研究が仮想空間の分割にアバタの密度を利用しているのに対し，本研究では放送するデータアイテムを決定するために利用しており，利用目的が異なる．

5.2 ユーザの興味に基づく QoS 制御

文献 14) では，大規模 3 次元仮想空間においてオ

プロジェクトの配信効率を高めるためにユーザの興味に基づく QoS 制御手法を提案している。オブジェクトに対するユーザの興味は、ユーザが直接入力する各オブジェクトに対する好奇心と仮想空間内のユーザの行動から決定しており、ユーザの行動による興味の決定には、仮想空間におけるユーザの位置を利用している。プロトタイプシステムでは、オブジェクトに対するユーザの行動を「デフォルト(特に何もしない)」「近づく」「選択する」の3つに分類し、「近づく」「選択する」といった行動をとった際にそのオブジェクトに対する興味が高くなったと判断し、当該オブジェクトの評価値を高くしている。

本論文における提案手法も、放送するオブジェクトを決定する際に、アバタとの距離を考慮している点で類似している。仮想空間を表示するビューでは、近い距離に存在するオブジェクトほど、表示サイズが大きくなる傾向が強く、ビューを構成するうえで重要となる可能性が高い。また、距離の近いオブジェクトほどインタラクションを行う可能性が高いという点でも重要度であるといえる。シミュレーション実験で比較手法としてあげた IDR 方式が、アバタとの距離に基づく手法であり、文献 14) と同様の考え方となる手法である。シミュレーション実験の結果では、オブジェクトの人気度とアバタとの距離の双方を考慮した提案方式が IDR 方式よりも良い性能を示している。

5.3 リアリティやアウェアネスを考慮した仮想空間
文献 12) では、バーチャルモールでのショッピングを対象として、商品の写実性と、顧客と店員のスムーズなやりとりを実現するためのアウェアネスおよび応答時間を考慮したシステムが提案されている。文献 12) では、仮想空間の大規模化に関する記述はないが、バーチャルモールでは、たとえば新商品紹介の展示エリアなど、多数のユーザが集まる場所が存在すると考えられるため、本論文で提案する PIDR 方式が利用できると考えられる。特に文献 12) で注目しているアウェアネスは、ユーザの近くが重要となるため、ユーザとの距離を考慮した提案手法は適していると考えられる。

また、システムのメモリ量の制約を考慮し、商品データのすべてを保持するのではなく、ウォークスルーしながら別店舗に移動した際に、サーバから必要なデータをダウンロードすることが想定されており、文献 18) の手法が適用できると考えられる。

6. ま と め

本論文では、大多数のユーザがアクセスし、リアル

で広大な仮想空間を実現する放送型サイバースペースにおいて、サーバがオブジェクトの位置情報や属性情報といったモデルデータよりも更新頻度の高いデータを放送する環境を想定し、オブジェクトの人気度およびアバタとオブジェクト間の距離を考慮した PIDR 方式を提案した。PIDR 方式では、人気度の高いオブジェクトのデータが頻りに放送されるため、多くのアバタが閲覧するオブジェクトを滑らかに表示できると同時に、アバタの視野において、アバタの近くに存在するオブジェクトのデータが頻りに更新される。

今後は、PIDR 方式の拡張として、視覚的な重要度のモデル⁷⁾に基づきオブジェクトの重要度を算出する方法について考案する予定である。また、本論文では円形としたアバタの視野の範囲の一般化などが今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(A)(2)(17200006)、科学研究費補助金若手研究(B)(19700092)および特定領域研究(2)(16016260)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Aarhus, K.H.L. and Kirkengen, M.: Generalized Two-tier Relevance Filtering of Computer Game Update Events, *ACM Network and System Support for Games*, pp.10–13 (2002).
- 2) 相原玲二, 豊国浩平, 西村浩二: 複数サーバを用いた大規模仮想空間の分散管理, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.12, pp.3214–3221 (2000).
- 3) Capps, M.: The QUICK Framework for Task-Specific Asset Prioritization in Distributed Virtual Environments, *Proc. 2000 IEEE Virtual Reality Conference (VR'00)*, pp.143–150 (2000).
- 4) Capps, M.V., McGregor, D., Brutzman, D.P. and Zyda, M.: NPSNET-V: A New Beginning for Dynamically Extensible Virtual Environments, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.20, No.5, pp.12–15 (2000).
- 5) Chan, A., Lau, W.H.R. and Ng, B.: A Hybrid Motion Prediction Method for Caching and Prefetching in Distributed Virtual Environments, *Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'01)*, pp.135–142 (2001).
- 6) Chim, H.P.J., Lau, W.H.R., Si, A. and Leong, V.H.: Multi-Resolution Model Transmission in Distributed Virtual Environments, *Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'98)*, pp.25–34 (1998).
- 7) Chim, J., Lau, R., Leong, H.V. and Si, A.:

- CyberWalk: A Web-based Distributed Virtual Walkthrough Environment, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.5, No.4, pp.503–515 (2003).
- 8) Fujikawa, K., Hori, M., Shimojo, S. and Miyahara, H.: A Server Selection Method based on Communication Delay and Communication Frequency, *Proc. 7th Asian Computing Science Conference*, pp.125–139 (2002).
 - 9) Greenhalgh, C.M. and Benford, S.D.: MASSIVE: A Virtual Reality System for Teleconferencing, *ACM Trans. Computer-Human Interaction (CHI'95)*, Vol.2, No.3, pp.239–261 (1995).
 - 10) Hori, M., Fujikawa, K., Iseri, T. and Miyahara, H.: CittaTron: A Multiple-server Networked Game with Load Adjustment Mechanism on the Internet, *Proc. 2001 SCS Euro-media Conference*, pp.253–260 (2001).
 - 11) 井上雅之, 宇佐美潔忠, 清末悌之, 石橋 聡, 長谷雅彦: 3次元仮想社会 InterSpace におけるコミュニティ形成過程とコミュニケーションメディア利用推移に関する考察, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.10, pp.2670–2678 (2000).
 - 12) 片山昭宏, 内山晋二, 熊谷 篤, 田村秀行, 苗村 健, 金子正秀, 原島 博: Collaborative CyberMirage: リアリティと相互アウェアネスを追求した仮想空間共有体験システム, *情報処理学会論文誌*, Vol.39, No.5, pp.1484–1493 (1998).
 - 13) Matsuda, K.: Evaluation of Personal Agent-oriented Virtual Society PAW, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.10, No.2, pp.170–184 (2001).
 - 14) 中井優志, 柴田義孝: 大規模 3次元仮想空間における利用性向上のための興味解析手法の提案, *情報処理学会研究報告 DPS-123*, Vol.2005, No.58, pp.117–122 (2005).
 - 15) Nakanishi, H.: FreeWalk: A Social Interaction Platform for Group Behavior in a Virtual Space, *International Journal of Human Computer Studies*, Vol.60, No.4, pp.421–454 (2004).
 - 16) Ogawa, T., Tsukamoto, M. and Nishio, S.: Virtual Space Broadcasting Based on the Speed of Avatar Movement, *Proc. IASTED International Conference on Internet and Multimedia Systems and Applications (EuroIMS A 2005)*, pp.311–317 (2005).
 - 17) 小川剛史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 放送型サイバースペースにおけるアバタの移動速度を考慮した放送スケジューリング手法, *情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2003)*, pp.325–328 (2003).
 - 18) 小川剛史, 塚本昌彦, 西尾章治郎: 仮想空間内でのユーザの移動速度を考慮した放送型サイバースペースの提案, *情報処理学会論文誌*, Vol.44, No.2, pp.276–284 (2004).
 - 19) 大輪卓之, 三宅貴浩, 松田晃一, 賀川能明: 3次元仮想空間サービス「virtorn hills」の実装と考察, *日本バーチャルリアリティ学会研究報告*, Vol.7, No.1, pp.1–6 (2002).
 - 20) Park, S., Lee, D., Lim, M. and Yu, C.: Scalable Data Management Using User-based Caching and Prefetching in Distributed Virtual Environments, *Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'01)*, pp.121–126 (2001).
 - 21) 清水孝一, 山本 潮, 小野里好邦: 仮想空間の空間分割型分散管理における管理領域の動的変更, *情報処理学会研究報告 DPS-94*, Vol.1999, No.56, pp.59–64 (1999).
 - 22) Ta, D.N.B., Zhou, S. and Shen, H.: Greedy Algorithms for Client Assignment in Large-scale Distributed Virtual Environments, *Proc. 20th Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS'06)*, pp.103–110 (2006).
 - 23) Yoshihisa, T., Tsukamoto, M. and Nishio, S.: A Scheduling Scheme for Continuous Media Data Broadcasting with a Single Channel, *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol.52, No.1, pp.1–10 (2006).

(平成 19 年 5 月 17 日受付)

(平成 19 年 11 月 6 日採録)



小川 剛史 (正会員)

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。2000 年同研究科博士後期課程中退後、大阪大学サイバーメディアセンター情報メディア教育研究部門助手、2007 年東京大学情報基盤センターキャンパスネットワークング研究部門講師、現在に至る。博士 (情報科学)。グループウェア、ヒューマンインタフェース、仮想現実感、拡張現実感に興味を持つ。ACM, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。



永石 博憲

2005年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2007年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。現在、日本IBM。仮想空間ならびに放送コンピューティングに興味を持つ。

興味を持つ。



原 隆浩（正会員）

1995年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997年同大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科博士後期課程中退後、同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手、2002年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手、2004年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻准教授となり、現在に至る。工学博士。1996年本学会山下記念研究賞受賞。2000年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003年本学会研究開発奨励賞受賞。データベースシステム、分散処理に興味を持つ。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本データベース学会の各会員。



西尾章治郎（フェロー）

1975年京都大学工学部数理工学科卒業。1980年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手、大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授、大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て、2002年より大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり、現在に至る。2000年より大阪大学サイバーメディアセンター長、2003年より大阪大学大学院情報科学研究科長、その後2007年より大阪大学理事・副学長に就任。この間、カナダ・ウォータールー大学、ビクトリア大学客員。データベース、マルチメディアシステムの研究に従事。現在、Data & Knowledge Engineering等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。電子情報通信学会フェローを含め、ACM, IEEE等8学会の各会員。