

仮想空間内でのユーザの移動速度を考慮した 放送型仮想空間システムの提案

小 川 剛 史[†] 塚 本 昌 彦^{††} 西 尾 章 治 郎^{††}

本稿では、多数のユーザが広大な空間を共有して利用する仮想空間システムにおいて、空間を構成する大量のモデルデータを効率良くユーザへ配信するため、データ放送を用いた仮想空間システムを提案する。提案システムでは、利用する仮想空間を複数の部分空間に分割し、各部分空間のデータを1つのデータアイテムとしてサーバから繰り返しクライアントへ放送する。また、放送帯域幅と仮想空間内でのユーザの移動速度を考慮して、部分空間を切り替える際の待ち時間を低減する放送プログラムのスケジューリング方式についての検討を行った。

A Proposal of a Broadcast Virtual Space System Considering User's Movement Speed in Virtual Space

TAKEFUMI OGAWA,[†] MASAHIKO TSUKAMOTO^{††} and SHOJIRO NISHIO^{††}

In this paper, we propose a virtual space system using broadcast technology in order to provide users with a large volume of model data. In our system, a server divides virtual space into multiple partial spaces, and repeatedly broadcasts the model data of the partial space to clients using a broadband channel. We investigate two scheduling strategies of the broadcast program in order to reduce the average waiting time when a user migrate to a neighbour partial space considering broadcast bandwidth between a server and clients and user's movement speed in the virtual space.

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、InterSpace³⁾やPAW⁶⁾、FreeWalk⁷⁾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、NPSNET⁵⁾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[☆]やLineage^{☆☆}、Ultima_(TM) Online^{☆☆☆}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 Multi-player 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^{2),8)}、サーバが仮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、クライアントに提供していた。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。

MMORPGでは、全国各地に分散したユーザがインターネットを介してゲームに参加するが、PPPを利用しているユーザでも快適にゲームに参加できるように、クライアントからサーバへ送信するデータをユーザが操作したキャラクタの動きに関するデータなどに限定している。オブジェクトの衝突判定やステータス

[†] 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
Infomedia Education Division, Cybermedia Center,
Osaka University

^{††} 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 Engineering, Graduate
School of Information Science and Technology, Osaka
University

[☆] 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/ff11/home/index.html>

^{☆☆} <http://www.lineageonline.jp>

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

チェックなどの処理はすべてサーバ上で行い結果だけをクライアントへ送信する。この場合、仮想空間を構成するモデルデータはあらかじめクライアントが保持しておかなければならない。つまり、リアリティの高い仮想空間を利用するためには、クライアントにおいて、より多くのディスクスペースが必要になり、また、広大な仮想空間をレンダリングするための計算パワーが必要になるなど、計算機資源に対する負担も大きくなる。

これらのシステムが多数のユーザを獲得し、運用し続けるためには、安定したシステムを提供することと、ユーザを飽きさせないことが重要であり、システムのバグ修正やシナリオの追加などを定期的に行う必要がある。しかし、クライアントにシステムの一部がインストールされている場合には、各クライアントでアップデート作業をする必要がありユーザの負荷が増えることや迅速に対応できないことも問題となる。

本稿では、以下の3点を特徴に持つサイバースペースにおいて、仮想空間情報を効率良くユーザに配信するためのアーキテクチャとして**放送型サイバースペース**を提案する。

- 非常に広大かつリアルな空間である。
- 空間を構成するデータは頻繁には更新されないが、そのデータ量は莫大である。
- 仮想空間を利用するユーザ数が非常に多い。

このようなサイバースペースには、ナビゲーションシステムや地理情報システムのように、空間構造や店舗情報といったスタティックな情報を提供するシステムと、仮想空間を用いたコミュニケーション支援システムやMMORPGのように、スタティックな情報に加えて、ユーザ間の会話やインタラクションといったダイナミックに変化する情報を提供するシステムがある。放送型のデータ配信機構を用いて、リアルタイムに変化するデータをサーバからクライアントへ提供することは困難なため、放送型サイバースペースでは、従来型のデータ配信機構と放送型のデータ配信機構を統合したハイブリッド型のデータ配信機構を用いる。これにより、従来のシステムで問題となっていた、提供するデータの増大やクライアント数の増加にともなう、システム全体の負荷を低減できる。

また、ユーザが仮想空間を移動する際のシステムのレスポンスが速くなるように、仮想空間内でのユーザの移動速度とデータ配信を行う際のサーバ・クライアント間の帯域幅の関係を考慮した放送データのスケジューリング方式についても検討する。

以下では、2章で本稿で提案する放送型サイバース

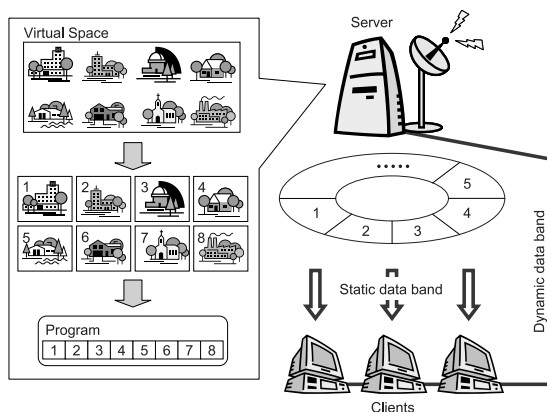


図1 放送型サイバースペース
Fig. 1 Broadcast cyberspace.

ペースの概要について述べ、3章で放送型サイバースペースにおいて、ユーザが空間を移動するときの待ち時間を最小にするモデルデータの放送時間間隔について述べる。4章でユーザの移動を考慮した放送プログラムのスケジューリング方式について述べる。5章で関連研究について述べ、最後に6章で本稿のまとめを述べる。

2. 放送型サイバースペース

放送型サイバースペースの概要を図1に示す。サーバ・クライアント間のネットワーク帯域を、静的な情報をサーバからクライアントへ配信する帯域（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）とに分割して、それぞれの帯域に従来方式と放送型方式を適用する。なお、スタティックデータ用帯域とダイナミックデータ用帯域とは同一のネットワークインフラストラクチャである必要はなく、たとえばスタティックデータ用帯域に衛星放送を用いて、ダイナミックデータ用帯域にPPPによるインターネット接続を利用してもよい。

サーバは、クライアントへ提供する仮想空間のモデルデータや仮想空間内で発生したイベントなどリアルタイムに更新される情報などのデータをすべて管理している。これらのデータの中で、空間モデルのような静的なデータをクライアントへ放送する際の基本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キャラクタの操作情報などのリアルタイムデータは、サーバ側でステータスチェックや衝突判定といった処理をした後、その結果を同じ帯域

を用いてクライアントに返信する。

以上のように、静的で大量のデータは放送を用いてサーバからクライアントへ配信し、リアルタイムデータのみを従来の方式でやりとりすることで、サーバ・クライアント間のネットワークトラフィックを低減できる。たとえば 1 GB のデータからなる仮想空間を 100 個の部分空間に分割して提供する場合、クライアントがオンデマンドに部分空間を取得すると、サーバ・クライアント間が 1 Gbps のネットワーク帯域であっても 10 Mbps のネットワークインタフェースを持つクライアントが 100 台程度接続するだけで、ネットワーク負荷が非常に大きくなる。これに対し放送型では、クライアントが増加してもネットワークトラフィックは増加しない。さらに、サーバではクライアント数が増加してもデータを放送する部分に関して変更を必要としないため、多数のクライアントが仮想空間を利用してもサーバにおけるスループットの低下は少ない。クライアントでは、放送されるデータについては、必要なデータを必要なときに取得するだけでよく、つねに放送されるデータを監視する必要がないため、クライアントにおけるオーバーヘッドはほとんどなく、大量の空間データをローカルに保持する必要もないため、ディスクリソースを有効に利用できる。たとえば、FINAL FANTASY (R) XI の仮想空間を 100 個の部分空間に分割して放送すると、クライアントに 6 GB のディスクスペースが必要であったものが 60 MB に低減される。

仮想空間において建物の追加などのデータ更新が発生した場合には、各クライアントが仮想空間のデータを保持していないため、サーバ側のデータを更新するだけでよく、仮想空間のメンテナンスコストも低減できる。

一方、放送型のデータ配信を利用する場合、サーバは多種のデータを周期的に放送するため、クライアントはつねに必要なデータを受信できるとは限らない。データを受信できなかった場合には、次にデータが放送されるまで待つ必要がある。しがたって、放送型サイバースペースでは、ユーザが部分空間をスムーズに移動できるようにする必要がある。また、実空間の人々に対して、場所に依存した情報を提示するパーソナルナビゲーションシステムのようなシステムでは、PDA などのクライアント端末に、実空間をモデルとした仮想空間を構築して、その仮想空間上に場所依存の情報を提示することが考えられるため、クライアントにおけるバッファの制限も考慮する必要がある。

3. 移動のための待ち時間

本章では、部分空間内でのユーザの平均移動速度と隣接する部分空間のモデルデータが放送される時間間隔が与えられた場合に、ユーザが隣接する部分空間へ移動するときに発生する待ち時間を求める。なお本稿では、簡単のために次のようなシステム環境を想定する。

- サーバは 1 つとする。
- サーバは仮想空間のモデルデータを定期的にクライアントへ放送する。
- 仮想空間を同じ広さの M 個の部分空間 PS_i ($i = 1, 2, \dots, M$) に分割して、各部分空間を構成するデータ D_i ($i = 1, 2, \dots, M$) を 1 つのデータアイテムとして放送する。
- 各データアイテムのサイズはすべて同じとし、1 アイテムを放送するために必要な時間を L とする。
- サーバは各アイテムを 1 周期の放送プログラムの間で 1 度だけ放送し、1 周期を放送するために必要な時間は ML である。
- クライアントの仮想空間ブラウザは、1 つのデータアイテムを受信すれば部分空間として仮想空間を表示できる。ただしデータアイテムを完全に受信するまでは空間の表示はできない。
- ユーザは幅 W の部分空間を一方方向に平均 v で移動して、部分空間を通り抜ける。

クライアントでは、ユーザが PS_i を PS_{i+1} の方向に向かって移動しているとき、 PS_i と PS_{i+1} の接続部分にユーザが到達すると部分空間の切替えが発生する。このとき、クライアントが D_{i+1} をすでに持っていれば、即座に PS_{i+1} を表示できるものとし、部分空間を表示するために必要な時間は無視する。 D_{i+1} を持っていなければ、サーバから D_{i+1} が放送されるのを待ち、データの受信が完了してから PS_{i+1} を表示する。この D_{i+1} の受信を完了するまでの時間をユーザの待ち時間 T とする。ここでは、簡単のために、放送する仮想空間は図 2 に示すようにトーラス状に広がる空間であるとし、ユーザが空間の右端に到達すれば空間の左端に出てくるといったように、空間の両端がつながっているものとする。この空間のモデルデータを空間の広がっている方向に分割して部分空間 PS_i ($i = 1, 2, \dots, M$) を構成し、サーバは各モデルデータ D_i を放送する。データアイテム D_i と D_{i+1} は時間間隔 kL ($k = 1, 2, \dots, M-1$) で放送される。

また、ユーザは一定の方向へ移動し続けるものとし、 PS_1 から $PS_2, \dots, PS_M$ へ向かう方向を順方向、

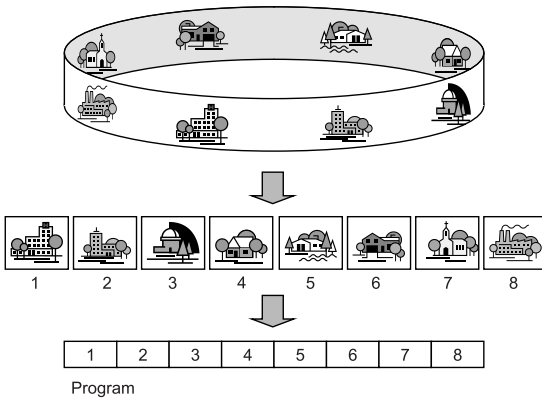


図 2 放送プログラムの作成

Fig. 2 Making a broadcast program.

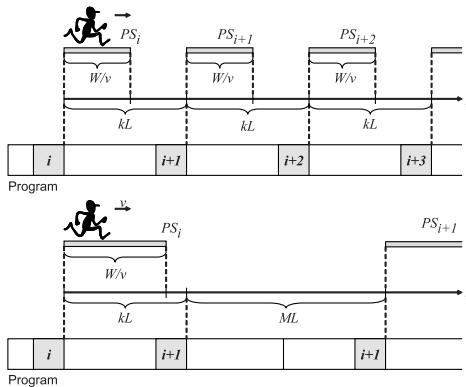


図 3 ユーザの移動速度と放送プログラムの関係 (バッファ数 1, 順方向)

Fig. 3 Relation between user's movement speed and broadcast program (buffer num. 1, sequential movement).

PS_M から $PS_{M-1}, \dots, PS_1$ へ向かう方向を逆方向と呼ぶこととする。

3.1 バッファ数 1 の場合

クライアントがバッファを 1 つだけ持ち、部分空間の表示とデータアイテムの受信に利用している場合は、ユーザが部分空間の端に到達すると次の部分空間データに対するアクセス要求が発生し、受信を開始する。

3.1.1 順方向

ユーザの移動速度と放送プログラムの関係を図 3 に示す。 D_i の放送が開始されてから、 D_{i+1} の放送が開始されるまで、 kL の時間がある。 PS_i を移動している間に D_{i+1} の放送が開始されると、次の周期で放送される D_{i+1} を受信しなければならない。したがって、 $0 < W/v \leq (k-1)L$ のとき

$$T = kL - \frac{W}{v}$$

となり、 T は $W/v = (k-1)L$ のとき、最小値 $T = L$

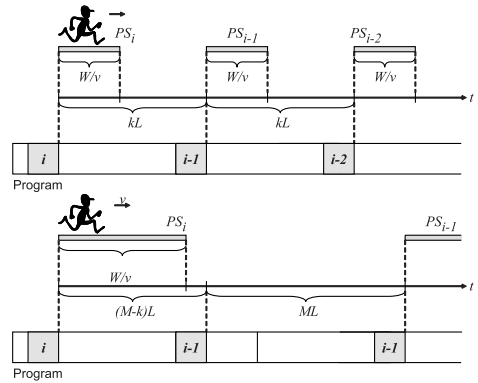


図 4 ユーザの移動速度と放送プログラムの関係 (バッファ数 1, 逆方向)

Fig. 4 Relation between user's movement speed and broadcast program (buffer num. 1, reverse movement).

をとる。同様に、 $((n-1)M + k-1)L < W/v < (nM + k-1)L$ のとき

$$T = (nM + k)L - \frac{W}{v}$$

となり、 T は $W/v = (nM + k-1)L$ のとき、最小値 $T = L$ をとる。

3.1.2 逆方向

ユーザの移動速度と放送プログラムの関係を図 4 に示す。 D_i の放送が開始されてから、 D_{i-1} の放送が開始されるまで、 $(M-k)L$ の時間がある。順方向移動と同様に PS_i を移動している間に D_{i-1} の放送が開始されると、次の周期で放送される D_{i-1} を受信することになる。したがって、 $0 < W/v \leq (M-k-1)L$ のとき

$$T = (M-k)L - \frac{W}{v}$$

となり、 T は $W/v = (M-k-1)L$ のとき、最小値 $T = L$ をとる。同様に $(nM-k-1)L < W/v < ((n+1)M-k-1)L$ のとき

$$T = ((n+1)M-k)L - \frac{W}{v}$$

となり、 T は $W/v = ((n+1)M-k-1)L$ のとき、最小値 $T = L$ をとる。

3.2 バッファ数 2 の場合

クライアントは、部分空間を表示している場合でも、サーバから放送されるデータアイテムを受信できる。たとえばユーザが順方向に移動しているとする、クライアントが PS_i を表示したとき、同時に D_{i+1} へのアクセス要求を出す。

3.2.1 順方向

ユーザの移動速度と放送プログラムの関係を図 5 に

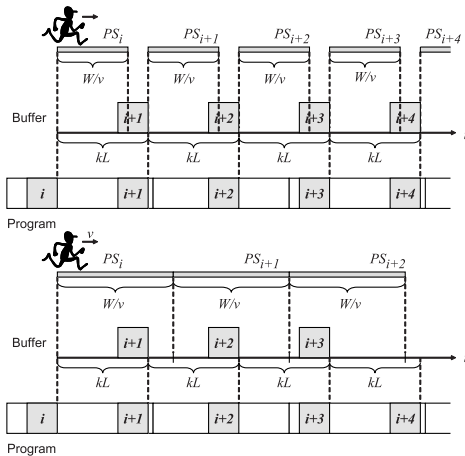


図5 ユーザの移動速度と放送プログラムの関係（バッファ数 2，順方向）

Fig. 5 Relation between user's movement speed and broadcast program (buffer num. 2, sequential movement).

示す。 D_{i+1} の放送が完了するまでに PS_i を移動するユーザが空間の端に到達すると待ち時間が生じる。 $0 < W/v \leq kL$ のとき

$$T = kL - \frac{W}{v}$$

となり、 T は $W/v = kL$ のとき、最小値 $T = 0$ をとる。

ユーザが PS_i の空間の端に到達するまでに、 D_{i+1} の放送が完了すると、クライアントはそのデータを受信バッファを用いてプリフェッチでき、ユーザは PS_i から PS_{i+1} へは待ち時間なしで移動できる。ただし、

$$n = \left\lceil \frac{(k-1)vL}{W - kvL} + 1 \right\rceil$$

で初めて $PS_{i+(n-2)}$ を移動中に D_{i+n} の放送が開始されてしまうため、 $PS_{i+(n-1)}$ を移動中に D_{i+n} を受信できない。したがって、平均待ち時間は、

$$T = kL + \frac{ML}{n} - \frac{n-1}{n} \frac{W}{v}$$

となる。

3.2.2 逆方向

ユーザの移動速度と放送プログラムの関係を図6に示す。 D_{i-1} の放送が完了するまでに PS_i を移動するユーザが空間の端に到達すると待ち時間が生じる。 $0 < W/v \leq (M-k)L$ のとき

$$T = (M-k)L - \frac{W}{v}$$

となり、 T は $W/v = (M-k)L$ のとき、最小値 $T = 0$ をとる。

ユーザが PS_i の空間の端に到達するまでに、 D_{i-1}

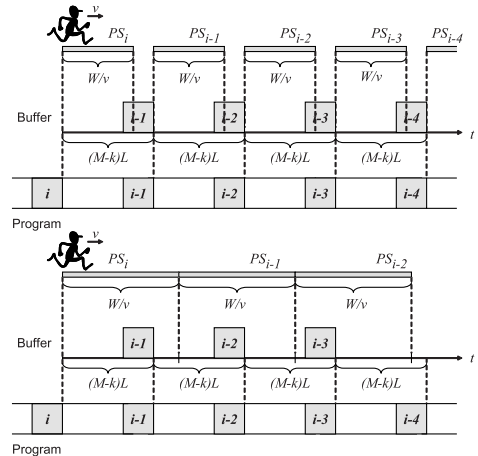


図6 ユーザの移動速度と放送プログラムの関係（バッファ数 2，逆方向）

Fig. 6 Relation between user's movement speed and broadcast program (buffer num. 2, reverse movement).

の放送が完了すると、クライアントはそのデータを受信バッファを用いてプリフェッチでき、ユーザは PS_i から PS_{i-1} へは待ち時間なしで移動できる。ただし、

$$n = \left\lceil \frac{(M-k-1)vL}{W - (M-k)vL} + 1 \right\rceil$$

で初めて $PS_{i-(n-2)}$ を移動中に D_{i-n} の放送が開始されてしまうため、 $PS_{i-(n-1)}$ を移動中に D_{i-n} を受信できない。したがって、平均待ち時間は、

$$T = (M-k)L + \frac{ML}{n} - \frac{n-1}{n} \frac{W}{v}$$

となる。

4. スケジューリング方式

前章では、ある部分空間のモデルデータが放送されてから、一定時間後にその隣の部分空間のモデルデータが放送される場合を想定して、ユーザが隣の部分空間へ移動する際に生じる待ち時間を計算した。これらの計算結果を考慮して、ユーザの待ち時間を短くする放送プログラムを作成するための k の値を決定すればよいが、実際には、ユーザが、 PS_i から PS_{i+1} へ移動する際の待ち時間を最小にするように、放送プログラムにおいて D_i と D_{i+1} を配置したとしても PS_{i+1} から PS_i へ移動する際の待ち時間は最小とならない。

そこで、本章では、ユーザの移動方向に偏りがある場合とない場合を想定して、ユーザの移動速度と各データアイテムの放送時間を考慮した放送プログラムのスケジューリング方式を提案する。

4.1 PTA 方式

クライアントがデータ受信専用のバッファを持たな

い場合、ユーザが部分空間を通過した直後に移動先の部分空間のデータが放送されれば、隣の部分空間へ移動する際の待ち時間が最も短くなる。また、データ受信専用のバッファを持っている場合は、ユーザが部分空間を移動中に次の移動先となる部分空間データを完全に受信できれば、ユーザの待ち時間は 0 となり、ユーザは即座に隣の部分空間へ移動できる。

PTA (Passage Time Arrangement) 方式では、部分空間内におけるユーザの移動速度と部分空間の幅から、ユーザが部分空間を通過する時間を算出し、この通過時間を基にデータアイテムを放送する時間間隔を決定する。

たとえばクライアントが受信専用バッファを持たない場合、順方向に移動するユーザの待ち時間を最短にする k は

$$\frac{W}{vL} - nM + 1 \leq k < \frac{W}{vL} - (n-1)M + 1$$

のとき

$$k = \frac{W}{vL} - nM + 1$$

となる。逆方向に移動するユーザの待ち時間を最短にする k は

$$nM - \frac{W}{vL} - 1 < k \leq (n+1)M - \frac{W}{vL} - 1$$

のとき

$$k = (n+1)M - \frac{W}{vL} - 1$$

となる。

PTA 方式では、特定の方向へ移動する場合の待ち時間を最短にできるが、それ以外の方向にユーザが移動する場合には待ち時間が長くなってしまふ。したがって、たとえばゲームのようにシナリオにそってユーザが仮想空間内行動する場合など、仮想空間内におけるユーザの移動方向が決まっていたり、ユーザの移動方向に偏りがあつたりする場合に、システム全体としてのユーザの待ち時間を短くでき、モデルデータを効率的にクライアントへ提供できる。

4.2 MA 方式

PTA 方式では、特定の方向に移動するユーザの待ち時間を最短にする k を用いて放送プログラムを作成したが、仮想空間内でのユーザの移動方向が決まっていなかったり、移動方向に偏りがなかったりする場合に、システムを利用する半数のユーザが、部分空間を移動するたびに長い時間待たなければならなくなる。

そこで、MA (Middle Arrangement) 方式では、どの方向に移動している場合でも、同じ時間待てば隣の

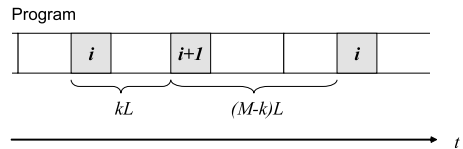


図 7 データアイテムの放送間隔

Fig. 7 Intervals of broadcasting data items.

k=1	1	2	3	4	5	6	7	8
k=3	1	4	7	2	5	8	3	6
k=5	1	6	3	8	5	2	7	4
k=7	1	8	7	6	5	4	3	2

図 8 $M = 8$ のプログラム例

Fig. 8 An example of program with $M = 8$.

部分空間へ移動できるように k を決定し、放送プログラムを作成する。

図 7 に示すとおり、 D_i が放送されてから時間間隔 kL で D_{i+1} が放送される場合、 D_{i+1} が放送されてから D_i が放送されるまでの時間は、 $(M-k)L$ となる。したがって、順方向に移動するユーザと逆方向に移動するユーザの待ち時間をできる限り等しくするため、ユーザの移動速度に関係なく、

$$\left| k - \frac{M}{2} \right|$$

を最小にする k を用いて放送プログラムを作成する。

4.3 放送間隔 k の決定方法

前節において、PTA 方式と MA 方式の各方式における k の算出方法を示したが、実際には示した式で算出した k で放送プログラムが作成できるとは限らない。たとえば、MA 方式では $|k - M/2|$ を最小にする k で放送プログラムを作成すれば PS_i から PS_{i+1} へ移動する場合と PS_{i+1} から PS_i へ移動する場合の待ち時間を等しくなることが分かっており、 $M = 8$ のときは、 $k = 4$ を使って放送プログラムを作成することになるが、周期 $8L$ の放送プログラムにおいて、時間間隔 $4L$ で隣り合う部分空間のモデルデータが放送される放送プログラムを生成することは不可能である。

D_i が放送されてから、時間間隔 kL で D_{i+1} が放送されるプログラムを作成するためには、 $k < M$ を満たす自然数の中で M と互いに素な数を用いる必要がある。図 8 に $M = 8$ の場合に生成できるプログラムの例を示す。 $M = 8$ のとき、 $k = 1, 3, 5, 7$ である。

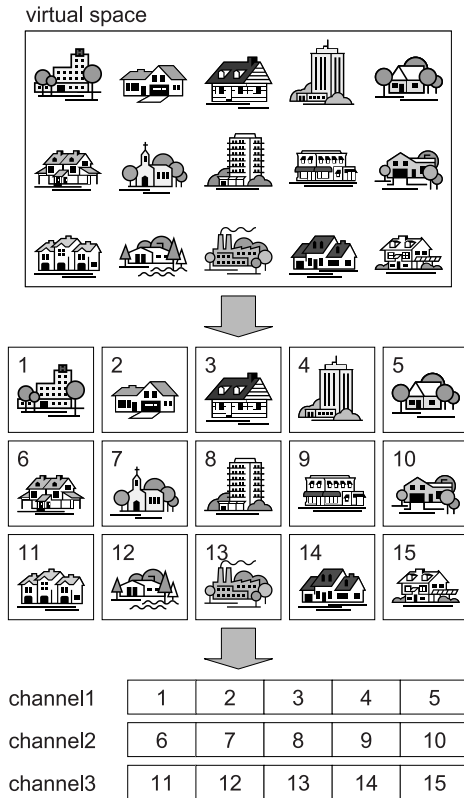


図 9 2次元方向に広がりを持つ仮想空間の放送

Fig. 9 Broadcasting virtual space with 2D expansion.

したがって、PTA方式やMA方式において k を決定する場合、全アイテム数 M と互いに素な数の中から、前節で示した式を満たす k を選択することになる。

4.4 仮想空間の分割方法

これまでの議論では、空間が1方向に広がり、両端でつながっている空間モデルを放送する場合を想定して、ユーザの待ち時間を短くする放送プログラムのスケジューリング方式について述べてきたが、2次元方向に広がりを持つ仮想空間のモデルデータを放送する場合にも同様の方式を利用することが可能である。

図9にその概要を示す。2次元方向に広がる仮想空間のモデルデータを放送する場合は、仮想空間を上から見て同じ広さの部分空間 $PS_{i,j}$ ($i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N$) に分割して、 N 個のチャンネルを用いて放送する。つまり、サーバは各部分空間を構成するデータ $D_{i,j}$ ($i = 1, \dots, M$) をチャンネル j を用いて放送することにする。

各チャンネル内では、PTA方式やMA方式を用いて放送プログラムを作成し、放送することが可能である。

本節では、チャンネル間においても、チャンネル j で

$D_{i,j}$ の放送が開始されてから、 kL 後にチャンネル $j+1$ で $D_{i,j+1}$ の放送が開始されるように、チャンネル間の放送時刻を kL ずらした場合のユーザの平均待ち時間を求める。簡単のためクライアントがチャンネルを切り替えるオーバーヘッドはないものとし、 $M = N$ であるとする。

以下では、クライアントのバッファ数が2の場合についてのみ示す。

4.4.1 $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i+1,j}$ 方向, $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i,j+1}$ 方向

$D_{i,j}$ が放送されてから、 $D_{i+1,j}$ および $D_{i,j+1}$ が放送されるまでは、 kL ある。したがって、 $0 < \frac{W}{v} \leq kL$ のとき、平均待ち時間は

$$T = kL - \frac{W}{v}$$

となり、 $kL < \frac{W}{v} < ML$ のとき

$$T = kL + \frac{ML}{n} - \frac{n-1}{n} \frac{W}{v}$$

となる。ただし、 n は以下の式を満たす数である。

$$n = \left\lceil \frac{(k-1)vL}{W - kvL} + 1 \right\rceil$$

4.4.2 $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i-1,j}$ 方向, $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i,j-1}$ 方向

$D_{i,j}$ が放送されてから、 $D_{i-1,j}$ および $D_{i,j-1}$ が放送されるまでは、 $(M-k)L$ ある。したがって、 $0 < \frac{W}{v} \leq (M-k)L$ のとき、平均待ち時間は

$$T = (M-k)L - \frac{W}{v}$$

となり、 $(M-k)L < \frac{W}{v} < ML$ のとき

$$T = (M-k)L + \frac{ML}{n} - \frac{n-1}{n} \frac{W}{v}$$

となる。ただし、 n は以下の式で表される。

$$n = \left\lceil \frac{(M-k-1)vL}{W - (M-k)vL} + 1 \right\rceil$$

4.4.3 $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i+1,j+1}$ 方向

$D_{i,j}$ が放送されてから、 $D_{i+1,j+1}$ が放送されるまでは、 $2kL$ ある。したがって、 $0 < \frac{W}{v} \leq 2kL$ のとき、平均待ち時間は

$$T = 2kL - \frac{W}{v}$$

となり、 $2kL < \frac{W}{v} < ML$ のとき

$$T = 2kL + \frac{ML}{n} - \frac{n-1}{n} \frac{W}{v}$$

となる。ただし、 n は以下の式で表される。

$$n = \left\lceil \frac{(k-1)vL}{W - 2kvL} + 1 \right\rceil$$

4.4.4 $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i-1,j-1}$ 方向

$D_{i,j}$ が放送されてから, $D_{i-1,j-1}$ が放送されるまでは, $(M-2k)L$ ある. したがって, $0 < \frac{W}{v} \leq (M-2k)L$ のとき, 平均待ち時間は

$$T = (M-2k)L - \frac{W}{v}$$

となり, $(M-2k)L < \frac{W}{v} < ML$ のとき

$$T = (M-2k)L + \frac{ML}{n} - \frac{n-1}{n} \frac{W}{v}$$

となる. ただし, n は以下の式で表される.

$$n = \left\lceil \frac{(M-2k-1)vL}{W - (M-2k)vL} + 1 \right\rceil$$

4.4.5 $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i+1,j-1}$ 方向, $PS_{i,j} \rightarrow PS_{i-1,j+1}$ 方向

$D_{i,j}$ が放送されてから, $D_{i+1,j-1}$ および $D_{i-1,j+1}$ が放送されるまでは, ML ある. したがって, $0 < \frac{W}{v} \leq ML$ のとき, 平均待ち時間は

$$T = ML - \frac{W}{v}$$

となる.

以上の結果から, k を決定すれば同一チャンネルで放送されている空間を移動する場合に限らず, 異なるチャンネルで放送される空間を移動する場合にも, PTA 方式や MA 方式が適用できる. また, 同一放送周期内においてアイテム間の放送間隔を決定する k は, 自然数でなければならなかったが, チャンネル間の放送間隔を決定する場合は, 自然数である必要がない. したがって, チャンネル間で MA 方式を利用する場合には,

$$k = \frac{M}{2}$$

なる k を用いて放送間隔を決定する.

5. 関連研究

放送型のデータ配信機構を用いた放送型情報システムに関する研究が多数行われており, その性能向上を目的として, サーバ側の放送データのスケジューリング戦略や, クライアント側のキャッシュ戦略, プッシュ型とプル型の融合戦略などさまざまな研究が報告されている^{1),4)}.

UFL 方式⁹⁾では, サーバから放送される各データ間に相関性がある場合, 各データに対してある時間間隔で連続してアクセス要求を起こすことに着目し, アイテム間の最適な放送時間間隔の計算値を用いて放送プログラムをスケジュールすることで各アイテムへの平均応答時間を低減している. 放送型サイバースペースでは, ユーザが部分空間を順番に移動するため, 隣

の部分空間のデータアイテムへは必ずある時間後にアクセスすることが予想できる. したがって, UFL 方式を放送型サイバースペースに適用することが可能である. しかし, UFL 方式では, 特に関連性の高いアイテムの放送時間間隔が優先的に最適値に近くなるよう放送プログラムを構築しているのに対し, 仮想空間においては, 隣接する各部分空間の関連の度合いを定義することは困難であり, 検討が必要である.

CBS 方式¹⁰⁾では, サーバから放送される複数のデータに対して同時にアクセス要求が生じる場合に, それらのデータアイテムを放送プログラム内に隣接して配置することで平均応答時間を短縮している. 放送型サイバースペースでは, クライアントのバッファ数が2つ以上の場合, ユーザの進行方向にある複数のモデルデータに対してアクセス要求が生じるため, CBS 方式を適用できる. また, Yajima らは, クライアントにおけるキャッシング方式についても議論しており, 次回放送されるまでの時間が長いアイテムをキャッシュに保持することで, 平均待ち時間低減する PT 方式と PT 方式においてさらにアイテム間の相関性を考慮した CB-PT 方式が提案されている. 放送型サイバースペースにおいても同様の方式が採用でき, ユーザの空間内での移動がスムーズになる. ただし, CB-PT 方式は待ち時間が最悪のケースにならないようにキャッシュするアイテムを決定しているが, 放送型サイバースペースでは全体としての待ち時間が最悪になったとしても, ユーザの行き先のモデルデータを保持するようなユーザの移動方向を考慮してキャッシングする必要がある.

このように放送するデータ間の相関性を考慮してサーバにおける放送プログラムのスケジューリング方式やクライアントにおけるキャッシング方式が提案されており, 従来の方式を放送型サイバースペースに適用して性能を向上させることが可能であると考えられる. しかし, 放送するデータが空間情報に関するデータであるため, 空間トポロジに基づくアクセス要求の発生や, 空間の連続性からすべてのデータ間に相関性があるなど, 考慮すべき点が多数存在するため, 今後の検討が必要である.

6. ま と め

本稿では, 広大な仮想空間を多数のユーザが共有して利用する仮想空間システムにおいて, 空間を構成する大量のデータを効率良くユーザへ配信するために, データ放送を用いた放送型サイバースペースを提案した. また, 放送型サイバースペースにおいて, ユーザ

が仮想空間内を移動する際の待ち時間を低減し、できる限りスムーズな移動を可能にするための放送プログラムのスケジューリング方式の提案も行った。提案手法では、空間データを配信する際の放送帯域幅と空間内を移動するユーザの速度を考慮して、クライアントがデータアイテムへアクセスするときの平均待ち時間を短くしている。

今後は、効果的な仮想空間の分割方法に関する検討やユーザのランダムな移動に対応した放送プログラムのスケジューリング方式を考案する予定である。また、クライアントにおけるユーザの移動速度を考慮したモデルデータのプリフェッチング方式やキャッシング方式についても考える予定である。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））「大規模な仮想空間システムを構築する放送型サイバースペースに関する研究」（プロジェクト番号：15300033）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) Acharya, S., Franklin, M. and Zdonik, S.: Balancing Push and Pull for Data Broadcast, *Proc. ACM SIGMOD Conference*, pp.183-194 (1997).
- 2) Greenhalgh, C.M. and Benford, S.D.: MAS-SIVE: A Virtual Reality System for Teleconferencing, *ACM Trans. Computer-Human Interaction*, Vol.2, No.3, pp.239-261 (1995).
- 3) 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に推移に関する考察, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.10, pp.2670-2678 (2000).
- 4) Lin, L. and Xingming, Z.: Heuristic MultiDisk Scheduling for Data Broadcasting, *Proc. Int'l Workshop on Satellite-Based Information Services (WOSBIS'97)*, pp.1-5 (1997).
- 5) Macedonia, M. and Zyda, M.: NPSNET: A network software architecture for large-scale virtual environments, *Presence*, Vol.4, No.5, pp.265-287 (1994).
- 6) 松田晃一, 三宅貴浩: パーソナルエージェント指向仮想社会 PAW (第2版) の構築と評価, *情報処理学会論文誌*, Vol.41, No.10, pp.2698-2707 (2000).
- 7) Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T. and Ishida, T.: FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network, *Proc. International Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW-96)*, pp.308-314 (1996).
- 8) 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).
- 9) Yajima, E., Hara, T., Tsukamoto, M. and Nishio, S.: Scheduling Strategies of Correlated Broadcast Data in Push-Based Systems, *Information Systems and Operational Research (INFOR)*, Vol.39, No.2, pp.152-173 (2001).
- 10) Yajima, E., Hara, T., Tsukamoto, M. and Nishio, S.: Scheduling and Caching Strategies for Correlated Data in Push-Based Systems, *ACM Applied Computing Review (ACM ACR)*, Vol.9, No.1, pp.22-28 (2001).

(平成 15 年 5 月 20 日受付)

(平成 15 年 11 月 4 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となり、現在に至る。グループウェア、バーチャルリアリティ、オーグメンティッドリアリティ、モバイルコンピューティングに興味を持つ。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。



塚本 昌彦 (正会員)

1987年京都大学工学部数理工学科卒業。1989年同大学院工学研究科修士課程修了。同年、シャープ(株)入社。1995年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻講師、1996年同専攻助教授となる。2002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助教授となり、現在に至る。工学博士。ウェアラブルコンピューティングおよびユビキタスコンピューティングに興味を持つ。ACM, IEEE等8学会の会員。

**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 年より同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を併任。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，ACM Trans. on Internet Technology, Data & Knowledge Engineering, Data Mining and Knowledge Discovery, The VLDB Journal 等の論文誌編集委員。情報処理学会フェローを含め，ACM, IEEE 等 9 学会の会員。
