

# 大规模虚拟场景渐进式传输的研究进展

王 伟<sup>1</sup> 贾金原<sup>2</sup> 张晨曦<sup>2</sup> 江 峯<sup>2</sup>

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)<sup>1</sup> (同济大学软件学院 上海 201804)<sup>2</sup>

**摘 要** 随着网上三维虚拟场景的急剧扩张,来自用户端的即时下载请求和有限带宽之间的矛盾亦变得日益突出。现已有大量研究者致力于通过“渐进式传输”来实现网上大规模虚拟场景的快速下载,因此有必要对现有研究成果进行综述。首先介绍了渐进式传输的基本原理和过程,给出了一个用于评价不同传输策略的公式,接下来分别从(1)潜在可视场景集及潜在可视场景集增量的判定,(2)三维物体模型的简化技术和流式编码,(3)不同体系结构的分布式虚拟环境中的场景传输机制,(4)虚拟场景的预下载策略等方面论述了针对大规模虚拟场景的渐进式传输策略,最后展望了网上大规模虚拟场景渐进式下载技术的未来研究方向。

**关键词** 大规模虚拟场景,渐进式传输,潜在可视场景集,分布式虚拟环境,场景预下载

**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A

## Survey on Progressive Transmission Strategy of Large-scale Virtual Scenes

WANG Wei<sup>1</sup> JIA Jin-yuan<sup>2</sup> ZHANG Chen-xi<sup>2</sup> JIANG Yin<sup>2</sup>

(School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)<sup>1</sup>

(School of Software Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)<sup>2</sup>

**Abstract** With the rapid enlargement of 3D virtual scenes on internet, the contradiction between the requirement of fast downloading from user and limited bandwidth is more seriously. Now many researchers have been working on fast downloading of large scale virtual scenes form internet by progressive transmission strategy, so it is necessary to give an overview of existed works. This paper introduced the principle and main processes of progressive transmission with a formula to evaluate different transmission strategies firstly, then described the progressive transmission strategy of downloading large scale virtual scenes from: (1) the determination of PVS(Potential Visible Scenes) and the Incremental PVS, (2) the predigestion techniques and streaming encoding of 3D object model, (3) the transmission mechanisms of virtual scenes in different DVE (Distributed Virtual Environment), (4) the polices of prefetching virtual scenes. The technical prospect on progressive transmission of large scale virtual scenes on internet is given at last.

**Keywords** Large scale virtual scenes, Progressive transmission, PVS, DVE, Scene prefetching

分布式虚拟现实(DVR, Distributed Virtual Reality)<sup>[1]</sup>是虚拟现实<sup>[2]</sup>和网络技术结合而产生的学科,物理上分布在不同地域的多个用户通过网络,能够在分布式虚拟环境(DVE, Distributed Virtual Environment)中的实时交互。DVR已经在军事训练的仿真、大规模多用户在线游戏(MMOG, Massively Multiplayer Online Games)、虚拟博物馆、虚拟城市等诸多等领域得到了广泛应用<sup>[3,36-40]</sup>。DVR应用是在模拟现实世界的虚拟场景中开展的,因此在用户终端上构建本地虚拟场景就成为首要解决的问题。传统方式是用户首先将存储于服务器上的场景数据通过网络一次性下载到本地,经过重构、渲染等生成本地虚拟场景。用户在场景数据量较小时尚可接受这种一次性完全下载的方式,但随着虚拟场景复杂度和规模的急剧增加<sup>[4]</sup>(例如现在广为流行的MMOG-World of Warcraft,其场景数据量已超过6GB并且持

续增加),大规模虚拟场景的网络传输已成为制约 DVR 进一步发展的“瓶颈”问题,其主要体现在:

(1)海量虚拟场景的下载即时性与带宽之间的矛盾。虚拟场景的复杂度和规模都在急剧增加,用户要求快速从网上下载海量场景,但可用于下载的带宽有限。

(2)海量场景与移动终端较小存储空间之间的矛盾。DVE中的用户终端设备已从PC扩展到PDA、手机等存储空间,但其远小于PC的移动终端,针对这类设备,本地存储空间饱和之后带来的数据更新问题应得到有效的解决。

## 1 渐进式传输策略的提出

### 1.1 渐进式传输的原理及过程

由此可见,开展关于大规模虚拟场景快速传输的研究在学术上和实际应用中都具有重要意义。为满足用户端的快速

到稿日期:2009-03-11 返修日期:2009-05-25 本文受上海市科委重点科技攻关项目基金(08511501000)资助。

王 伟(1983-),男,博士生,主要研究方向为虚拟现实和对等式网络;贾金原(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为虚拟现实和计算机图形学, E-mail: jiyuan@gmail.com;张晨曦(1960-),男,博士,教授,主要研究方向为计算机体系结构和对等式网络;江 峯(1985-),男,硕士生,主要研究方向为对等式网络。

下载需求,可以考虑从增加用户端带宽着手,但当前互联网带宽增长有限,且远不能跟上场景数据量的增长;研究者注意到虽然虚拟场景所占据的空间尺寸越来越大,但DVE中的用户受限于视野范围、物体之间的遮挡等因素,在空间上任何位置都只能观察到局部场景,因此只需下载当前潜在可视场景集(CPVS, Current Potential Visible Scenes, 位于用户化身视野范围内、但尚未下载的场景),经渲染可视化生成本地场景后就可以开始活动。随着用户化身(在虚拟场景中用于代表用户的虚拟人)视点的变化,再逐渐下载潜在可视场景集增量(IPVS, Incremental Potential Visible Scenes, 新落入视点变化后的CPVS中的场景),在空闲时间内,则可进一步下载未来潜在可视场景集(FPVS, Future Potential Visible Scenes, 用户未来将要访问的场景)。这种下载策略被称为渐进式下载(传输),其基本过程如下:

(1)判定CPVS 通过初始视点判定CPVS;

(2)确定下载优先级 判定所需下载场景中每个下载对象的最佳分辨率模型及其下载优先级,形成模型传输队列;

(3)下载物体模型 依次下载模型传输队列中每个物体相对于当前视点的最佳分辨率模型;若在下载过程中视点移动到新位置,则中断下载进程,转步骤(4);若下载完毕后视点驻留,转步骤(5);

(4)求IPVS 判定新视点的IPVS及实际IPVS(尚未被下载的IPVS),若存在实际IPVS,则转步骤(2),而对于无实际IPVS又有两种可能:i)本次判定的实际IPVS已经被下载;ii)整个场景已经被完全下载;若为后者,结束下载过程;

(5)预下载FPVS 利用空闲时间预下载FPVS,若在预下载过程中视点移动到新位置则转步骤(4)。

## 1.2 渐进式传输的优点

渐进式传输大大减少了对用户存储空间的需求:由于是随着视点的平移而逐渐下载IPVS,因此那些在漫游过程中尚未被访问的场景就无需被立即下载;对于存储空间较少的用户终端,可以通过不断剔除那些长时间不被访问的场景来容纳新场景<sup>[41]</sup>。本文针对通过网络下载虚拟场景的不同传输策略给出的评价公式如下:

$$P=1/T=1/(T_1+T_2+T_3)=1/(k*S/W+T_2+T_3) \quad (1)$$

$P$ 为传输效率, $T$ 为用户从向场景提供者发送下载请求到能够观察到最初场景这个过程所耗费的时间,具体而言, $T$ 又有场景的网络传输时间 $T_1$ ( $T_1=k*S/W$ , $k$ 表示为观察到初始场景所需的最少场景数据(本文将其定义为最小可视单元)占整个场景的比例, $0<k\leq 1$ , $S$ 为整个虚拟场景, $W$ 为当前可用于下载的带宽),最小可视单元的本机渲染时间 $T_2$ 和用于建立传输连接等开销的时间 $T_3$ 。

在比较一次性完全下载策略和渐进式传输策略时,通常情况下,其各自的 $T_2, T_3$ 均远小于 $T_1$ ,故主要比较各自的 $T_1$ 。由于一次性完全下载策略的最小可视单元即整个虚拟场景 $S$ ,其远大于渐进式下载过程中的最小可视单元( $k*S$ ),因此前者的 $T_1$ 远大于后者的 $T_1$ 。由以上推导过程,可以看出渐进式传输策略不仅减少了对用户存储空间的需求,而且使得用户能够较快地开始在场景中的活动,其传输效率较一次性完全下载策略有着较大的提高。目前渐进式传输策略已成为下载大规模虚拟场景的主要策略<sup>[5]</sup>。

## 1.3 虚拟场景传输与线性流媒体传输的对比

虚拟场景的渐进式传输和视频、音频等线性媒体内容的流式传输有相似之处:(1)数据都是逐渐到达用户端,用户在接收很少的内容后,就可以开始漫游或观看;(2)都可以通过对内容进行编码,形成特定的码流,然后通过多播、广播等进行传输。但两者间又存在着显著的不同:(1)视频、音频等媒体内容的传输只需考虑数据之间的时间相关性,而虚拟场景传输,更多考虑的是空间相关性;(2)虚拟场景具有同视频、音频等数据不同的数据属性,对造型复杂的几何数据其编码难度远高于线性媒体内容;(3)就应用层传输协议而言,流媒体传输主要依赖实时流媒体协议(RTSP)<sup>[6]</sup>等协议,而当前虚拟场景的传输主要使用HTTP协议。

## 1.4 虚拟场景传输中的通信模式

Royan等在文献[7]中提到了渐进式传输过程中场景发送者与场景请求者的两种数据通信模式,分别是“PUSH”和“PULL”。在“PUSH”模式中,请求者将化身视点信息(当前位置和平移速度等)告知场景发送者,发送者在接受视点信息后,确定请求者当前所需场景,并从场景数据库中提取相应场景数据,然后发送至请求者。该模式的缺陷在于:(1)由发送者来确定请求者的当前所需场景,增加了自身负载;(2)如果发送者不了解请求者本地已有场景的信息,往往会重复发送数据,而为了避免这种情况,请求者则需实时告知对方本地已存储场景的信息,但这样又使得双方需要频繁进行通信。而“PULL”模式是一种用户端驱动的数据通信模式,它要求请求者先掌握发送者处的场景组织信息,接下来由请求者确定所需场景,然后向发送者请求传输场景。对比两种模式,可以看出“PULL”减轻了场景发送者的负载,更适合多用户环境中的场景传输。

## 2 潜在可视场景集及增量的判定

### 2.1 可见性判断用于CPVS判定

最简单的判定CPVS的方法是将落入视锥体(View Frustum)内的物体即视为CPVS中的成员<sup>[8]</sup>。由于场景中的物体空间位置分布决定了可能有物体被其余物体所遮挡,因此可以在传输前对场景中的物体进行可见性判断(视域剔除、背向剔除、遮挡剔除等处理<sup>[42]</sup>),避免传输对用户当前不可见的物体,从而加快场景的下载进度。其中视域剔除和背向剔除的判断比较简单,已经有较为成熟的方法;而遮挡剔除更为复杂,其主要方法有在线剔除和离线剔除<sup>[43]</sup>。在线剔除的思路是:场景发送者在接受用户实时视点信息后,对化身当前视野范围内的物体进行遮挡剔除操作。但由于用户在平移过程中的位置时刻变化,采用在线遮挡剔除对实时性提出很高的要求。离线遮挡剔除则是预先计算遮挡可见性的方法,通常是先将场景划分成多个单元,然后为每个单元预先计算单元内任意视点的CPVS,这样在一个单元内的任意视点都可以共用CPVS。离线遮挡剔除虽然避免了实时计算物体可见性所带来的高负载,但其需要较长时间来对场景进行预处理,而且当视点跨越不同单元边界时还可能会引起磁盘I/O剧增,也不能处理动态场景<sup>[43]</sup>。

### 2.2 AOI用于当前可视场景集的判定

用户在场景中受限于视野等因素,因此只对其周围场景发生兴趣,现已有较多研究者在他们的论文中提到采用兴趣区域(AOI, Area of Interest)来确定CPVS<sup>[9,44-46]</sup>。以用户化

身当前视点为圆心,潜在可视距离为半径的一个圆形区域被称为该用户的 AOI,将水平面投影落在 AOI 内的物体都视为 CPVS 中的成员,用户的动作分为平移和旋转,而在原地旋转的过程中,其可见范围始终在 AOI 中,这样就大大减少了对实时计算可见性的需求。CPVS 中包含多个物体模型且实际下载以单个物体模型为单位,因此需要形成这些物体模型(包括物体的几何模型和纹理等数据)的下载队列,然后才能开始下载。现有文献多依据物体与用户视点的距离、物体与当前视线偏离角度来确定<sup>[10]</sup>。

### 2.3 DAOI 用于当前可视场景集的判定

使用 AOI 来确定 CPVS 可能面临着当 AOI 内场景数量较多时依然要耗费不少时间的不足,也忽略了人眼在某一位置静止时的实际可视区域为正前方扇形区域这一常识。Li 等将单层 AOI 扩展为两层 AOI<sup>[11]</sup>(Double-Layer AOI,如图 1 所示),最内层圆半径设为  $p \times r (0 < p < 1)$ ,外层圆半径设为  $r$ 。内层覆盖的区域被细分为  $Q_{1a}$  和  $Q_{1b}$ ,外层覆盖区域被细分为  $Q_{2a}$  和  $Q_{2b}$  等 4 个部分,其中  $Q_{1a}$  和  $Q_{2a}$  组成了化身静止时的实际可视区域。各区域中的场景下载优先级设为  $Q_{1a} > Q_{1b} > Q_{2a} > Q_{2b}$ 。这样用户正前方的场景就能够被优先下载并渲染,符合用户先环顾四周,再向前平移的浏览习惯。

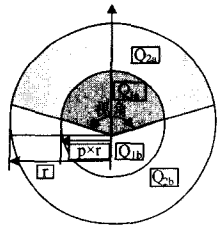


图 1 两层 AOI

### 2.4 AOI 用于潜在可视场景集增量的判定

AOI 所覆盖的区域随着用户视点位置的变化而与视点变化前有所不同,因此需要求得 IPVS 从而重新确定 CPVS。Jia 等在文献[5]中提出动态增量 AOI 算法来判定 IPVS,如图 2 所示。在通常速度时,视点平移到下一位置后,平移前的 AOI 和平移后的 AOI 依然共享大部分区域,只有少部分区域新落入平移后的 AOI 内,这部分区域中的场景即 IPVS,而不再被平移后的 AOI 覆盖的场景区域被称为潜在可视场景减量-DPVS(Decremental PVS)。由于部分 IPVS 中可能已被下载,因此用户只需下载本地空间中尚未存在的 IPVS,并在存储空间中剔除 DPVS(如果有必要)。

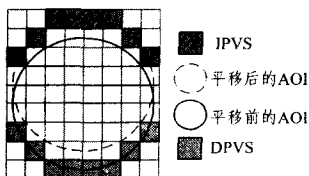


图 2 AOI 平移后的 IPVS 及 DPVS

## 3 三维物体模型的简化和流式编码

### 3.1 细节层次技术

尽管使用 AOI 大大减少了每次需要下载的场景数据量,但对其中物体分布稠密的 AOI 而言,每次需下载的场景仍可能较多。为了进一步减少通过网络传输的场景数据量,可采用细节层次技术(LOD,Level of Details)。由于人眼观察到的

物体清晰程度和物体与视点的距离成反比这一客观事实,因此可以为一个三维物体事先建立多个 LOD 模型。在物体距离化身视点较远时,下载较为粗糙的模型,这样既能节约时间又不会降低场景的逼真度<sup>[12,13]</sup>。在运用 LOD 时,选择细节模型通常基于以下原则<sup>[47]</sup>:(1) 距离视点越远的物体,其模型可以越粗糙;(2) 距离视点角度越远的物体,其模型可以越粗糙。采用对物体预先建立多个离散的 LOD 模型,再根据需要下载的方式存在缺陷:(1) 为保证模型过渡的连贯性,对同一物体需要生成多个简化模型,增加了传输数据量;(2) 没有考虑物体尺寸对传输性能的影响,例如下载一个较为粗糙的大尺寸模型可能消耗大量带宽。

### 3.2 多分辨率物体模型及其流式编码

为了克服离散型 LOD 的缺陷,近年来研究者在三维物体模型的简化并流式编码技术上开展了大量研究,已经取得了较大突破。流式编码技术使得用户即使只利用很少的场景数据也能重构一个粗糙的物体模型,进一步加快了本地构建场景的进度,例如 Schroeder, Garland, Isler 和 Hoppe 等分别在文献[14-17]中介绍了多种对物体模型进行简化,从而生成码流的方法。在这些简化并流式编码的方法中,以渐进网格(PM, Progressive Mesh)<sup>[17]</sup>最为著名,它能够把任意拓扑网格表示为一种高效、无损且具有连续分辨率的流编码<sup>[18]</sup>。PM 将物体模型分为表示最低分辨率模型的“基网格流”(Base mesh)和“网格增量流”(Record),物体模型的分辨率随着“网格增量”数目的增加而逐渐提高。PM 采用“边折叠”对物体模型进行简化,在简化的过程中,对物体的拓扑信息和几何信息进行编码形成流<sup>[48]</sup>,其逆过程“点分裂”能够将简化后的模型恢复为原模型。PM 存在着编码相对较慢等不足,研究者在其基础上又发展了诸如 CPM(Compress PM)<sup>[49]</sup>和 SLOD(Smooth LOD)<sup>[50]</sup>等简化技术。图 3 给出了一个用渐进网格表示的物体模型。

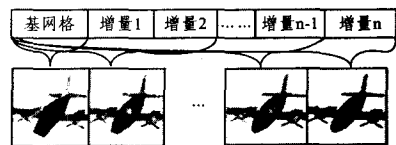


图 3 用渐进网格描述的一个物体模型

### 3.3 多分辨率物体模型的流式传输

通过网络传输采用流式编码的多分辨率物体,首先传输其基网格流,然后根据用户需求传输网格增量流(可以不必下载全部的网格增量数据,只需下载满足当前视觉要求的增量)。文献[9]中通过计算每个单独的增量对当前用户视觉质量的重要程度来确定下载网格增量的数目。文献[10]中采用基于收益/成本(Benefit/Cost)评估方法(即物体每个网格增量给渲染质量带来的收益与其传输开销之比)来确定需下载的网格增量的数目。

## 4 DVE 中的虚拟场景传输机制分类

### 4.1 集中式结构 DVE 中的虚拟场景传输

在基于单服务器/多客户端(即普通 C/S 结构)的 DVE<sup>[19,20]</sup>中,通常事先将场景存储于服务器上,用户从该服务器下载场景到本地客户端。单服务器/多客户端结构的优点是结构简单成熟、一致性较好;不足之处是当大量用户同时下载场景时,将给服务器带来极高的负载,并面临着“单点失

败”的风险。

基于多服务器/多客户端结构的 DVE<sup>[21]</sup>采用多台服务器来降低单台服务器的工作负载。例如在文献[21]提到的 RING 中,整个场景从空间上被划分为若干个大小固定的区域,每个区域都分配一台只负责管理本区域内用户的服务器,用户进入某区域,从该区域的服务器处下载场景。这样的优点是每台服务器的负载有所下降,但是当某些区域内的用户数量急剧增加时,C/S 结构的缺陷依然存在;为了平衡区域负载所带来的“用户迁移”问题又增加了开销。基于多服务器/多客户端类型的 DVE 其性能依然受到自身硬件资源的限制,对海量用户同时参与的支持尚不够理想<sup>[22]</sup>。

#### 4.2 对等式结构 DVE 中的虚拟场景传输

采用对等式网络(Peer-to-Peer)来传输虚拟场景的依据来源于:DVE 中某用户在访问某区域场景时,其与虚拟场景中的邻近用户视野上有可能重叠,由于各用户在不同时刻到达该区域,先到者可能已经下载了该区域场景,因此后来者可以不必再从服务器处获得场景,而是从这些可能拥有该区域场景的邻近节点处下载场景<sup>[23]</sup>,这样就大为减轻了服务器端的工作负载,同时充分利用了节点带宽。P2P 结构相对 C/S 具有更好的健壮性和扩展性,但其也存在掌握节点实时状态较为困难等缺陷。为克服普通 P2P 结构的不足,基于复合型 P2P 结构的 DVE 中保留了服务器(但其只执行发现节点、查询场景等操作),场景传输在节点之间完成。文献[4, 25, 26, 52]提到了几种基于该结构的 DVE,它们的共同特点是:在传输场景前将场景所在空间分割为若干矩形单元,并对每个单元进行描述(该区域拥有哪些物体及物体大小等信息<sup>[26]</sup>),用户先下载场景描述文件,接着根据当前视点确定下载单元,通过一定的资源发现机制发现拥有当前所需场景的节点,然后与之建立连接并下载场景。

具体而言,文献[4]中采用的方法是:各节点之间通过 Voronoi 图<sup>[24]</sup>来发现邻居节点并维持连接。设某节点所控制的化身落入另一节点所控制的化身 AOI 内时,前一个节点就成为后者的候选场景提供者,如果有多个候选场景提供者,则根据其当前负载和可用带宽选择一个场景提供者,同对方建立连接,将属于当前 CPVS 中的单元 ID 发送至场景提供者处,后者按各物体模型的下载优先级依次传输各物体模型的最佳分辨率模型;如果在 AOI 内的请求均失败,则转向服务器请求场景。文献[52]中采用的方法是:节点向服务器发送查询请求,服务器返回其查询结果,然后请求节点与应答节点之间建立连接,进行场景传输。表 1 对基于不同体系结构的 DVE 中的场景传输特点进行了比较。

表 1 不同体系结构的 DVE 中场景传输的比较

体系结构	C/S	多 S 多 C	普通 P2P	复合型 P2P
健壮性	较差	较好	较好	好
可扩展性	一般	一般	好	好
可维护性	较差	一般	较好	好
数据一致性	好	好	中等	较好
场景发送者	服务器	服务器	节点	节点/服务器
场景接收者	客户端	客户端	节点	节点
带宽要求	高	较高	一般	一般

### 5 虚拟场景的预下载策略

预下载(Prefetching)策略<sup>[27]</sup>的主要思路是:在 CPVS 已

经下载完毕而视点驻留时,通过预判化身运动趋势,利用空闲时间提前下载 FPVS,这样当视点移动到下一位置时的 CPVS 就有可能已经被渲染,从而使得用户浏览变得更为流畅。现有 FPVS 的预下载方法可基本分为基于历史运动轨迹的预下载和基于邻域扩张的预下载。

#### 5.1 基于历史运动轨迹的预下载

Chim 等在文献[12]中提到了用算术平均法和窗口法(如图 4(a)与图 4(b)所示)来预测化身的未来位置。在场景请求者处保存一个关于化身前  $i$  次平移向量的记录文件  $\{M_1, M_2, \dots, M_{i-1}, M_i\}$ 。每个向量都是根据化身的平移方向和特定时刻的位置,通过计算得到的。当化身平移到新位置  $Loc_i$  时,根据化身的平移方向,能够计算出第  $i$  次的平移向量  $M_i$ ,此时场景请求者就可以预测第  $i+1$  次的平移向量为  $M(p)_{i+1}$ ,然后向场景发送者请求传输位置  $Loc_{i+1}$  处的周围场景。算术平均法预测第  $i+1$  次的平移向量为前面  $i$  次平移向量的算术平均值,从第  $i+1$  次的平移向量来计算化身下一步到达的位置,从而预下载该位置附近的场景。而窗口法则把前面  $W$  次(窗口大小)运动向量的算术平均值作为第  $i+1$  次的平移向量。算术平均法和窗口法运用起来都较为简单,后者由于可以自由设定选取次数,预测准确率较前者高。但两种方法的共同缺陷是只通过简单的求算术平均值来预测化身下一步位置,对最近几次的历史平移向量对化身下一步走向的影响考虑不够。

Chim 等在文献[12]中还提出了一种名为指数加权平移平均法(EWMA, Exponentially Weighted Moving Average)的预测方法(如图 4(c)所示)。同算术平均法和窗口法比较,EWMA 的优点在于考虑了不同时刻的历史平移向量(尤其是最近几次历史平移向量)对预测结果的影响。该方法的主要思路是:取化身最近的  $i$  次平移向量,分别指派权值为  $1, a, a^2, \dots, a^i$ ,其中最近一次的平移向量的权值为 1,而  $M(p)_{i+1} = a \times M(p)_i + (1-a) \times M_i$ 。EWMA 比前两种预下载准确率更高,但文献[12]尚未对权值  $a$  的设定作进一步的说明。

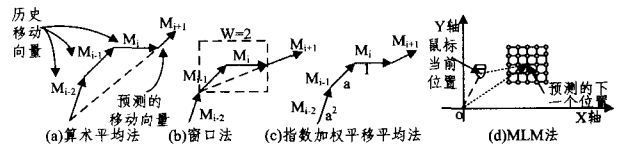


图 4 基于历史运动轨迹的预下载方法

Li 等在文献[28]中提到名为 MLM (Most Likelihood Movement) 的预下载方法(如图 4(d)所示)。其主要思路是:在虚拟场景中只由鼠标控制化身的平移,因此鼠标在桌面的平移轨迹决定了化身在场景平面图中的平移轨迹。首先根据鼠标当前位置  $Loc_n$  和 DR (Dead Reckoning) 算法<sup>[29]</sup>来预测鼠标的下一位置  $Loc_{n+1}$ ,然后将  $Loc_{n+1}$  扩展到以  $Loc_{n+1}$  为中心的一个网格区域(网格中的点按其与  $Loc_{n+1}$  的距离被赋予不同优先级),以该区域作为鼠标下一步可能到达的位置,再通过映射,从预测的鼠标位置区域来预测化身下一步平移后在场景平面图中的位置区域,从而预下载该区域周围的场景(按前面提到的位置区域中点的优先级预下载,对区域中优先级高的点,其周围场景优先下载)。MLM 方法的优点有:(1) 通过鼠标平移轨迹来预测将化身在场景空间中的平移轨迹;(2) 将预下载一个位置周围的场景拓展为预下载一个区域内的场景,提高了预下载场景的准确率。其不足之处是尚未深入考

虑用于预下载场景的时间与下载时间两者的平衡。表 2 对基于历史运动轨迹的几种预下载方法做了简单比较。

表 2 基于历史运动轨迹的预下载方法的比较

方法名称	开销	准确率	复杂度	化身控制设备
平均法 <sup>[41]</sup>	小	低	很低	键盘/鼠标
窗口法 <sup>[41]</sup>	小	低	很低	键盘/鼠标
EWMA <sup>[75]</sup>	中等	较高	低	键盘/鼠标
MLM <sup>[42]</sup>	中等	高	较高	鼠标

## 5.2 基于邻域扩张的预下载

Koltun 等提出采用 SNP(Simple Neighbor Prefetch)方法来预下载虚拟场景<sup>[30]</sup>,其主要思路是:将场景所在空间分为若干个矩形单元,在用户化身驻留某一单元期间,预下载周围 8 个单元中的场景。SNP 是一种简单的预下载方法,但其存在着如下缺陷:如图 5(a)所示,化身在从 $(a, b)$ 向 $(a, b+1)$ 平移过程中,此时可从本地空间中剔除图中最左边 3 个单元中的内容(对存储空间较小的用户终端如手机、PDA 等,采取这种方法的目的是腾出更多本地空间以容纳新下载的场景)。但如果化身在 $(a, b)$ 与 $(a, b+1)$ 之间来回平移,则会重复地进行“下载场景-本地剔除场景”的操作,这会严重影响下载性能,为了避免这种情况,便需要能够容纳这 6 个单元中场景的空间来存储,但这样又增加了用户的本地存储空间开销。

针对 SNP 方法存在的缺陷,Zheng 等在文献[31]中提到 PBNP(Position-Based Neighbor Prefetch)来预下载虚拟场景。如图 5(b)所示,也将场景从空间上分为若干单元,每个单元被分为 9 个子区域,假定用户最初位于正中间的子区域为(C-M),则其周围方向上有 8 个子区域,分别为{C-E, C-SE, C-S, C-SW, C-W, C-NW, C-N, C-NE}。该文对用户朝不同子区域方向运动时的预下载区域做了具体的规定,详见原文,例如图 5(b)中,当用户向东平移时,只需预下载其当前所在单元东部邻居区域中的场景。PBNP 不仅效率较 SNP 高,而且对存储空间的要求比 SNP 少。其不足之处在于尚未考虑化身平移速度对预下载效果的影响(当速度较快时,预下载的场景数据量可能跟不上渲染速度,从而造成用户场景浏览的不流畅)。

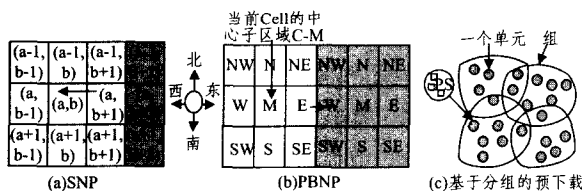


图 5 基于邻域扩张的预下载方法

Cevikbas 等在文献[32]中提出更为灵活的预下载思路,即将虚拟场景的预下载问题转化为场景平面图划分问题。本文将这种方法称为“基于分组的预下载”,如图 5(c)所示。首先将整个虚拟场景从水平面划分为若干单元,然后把这些单元归并到若干个组(一个单元可以同时隶属于多个组),在文献[32]中提到了两种划分原则:(1)当前化身所在单元和其未来访问概率较高的单元应该被划分到同一组;(2)如果化身在某单元中驻留时间较短,则该单元和其邻居单元应被划分到同一组。每组中的单元所包含场景形成预下载集合,其被称为 PS(Prefetching Sets)。采用“模拟退火”算法进行迭代来确定最优划分(即找到若干组,使得用户位于每组中的任何单元中时,下载该组中 PS 的代价都最小,该文设定的代

价为物体模型所占尺寸),当化身驻留某单元时,便可预下载 PS 中的场景。文献[32]中的方法提供了一种用于预下载场景的通用思路,可以不必专注于找到精确的预下载路线,但其可能需要较多迭代次数才能取得最优划分,在时间和计算资源上开销较多。表 3 对基于邻域扩张的几种预下载方法进行了比较。

表 3 基于邻域扩张的预下载方法的比较

方法名称	Cache 要求	准确率	带宽要求	计算开销
SNP <sup>[30]</sup>	高	较高	较高	较高
PBNP <sup>[31]</sup>	较低	高	中	低
基于分组 <sup>[32]</sup>	较高	高	较高	较高

## 6 研究展望

目前在超大规模虚拟场景的渐进式传输策略方面,国内外学者已经取得了不少的研究成果,在一定程度上缓解了(超)大规模虚拟场景传输所面临的挑战,但该领域在以下方面仍值得进一步探索:

(1) CPVS 及其 IPVS 的判定 使用 AOI 来确定用户的 CPVS 及 IPVS 已经成为渐进式下载的基本手段,通过对比现有文献,可以看出文献[11]中的将 AOI 细分为拥有不同下载优先级的 4 个子区域的策略能够使得距离用户最近的场景用户能够被最先下载并可视化。但文献[11]中的方法尚存在不足:①未提及如何求化身平移后各子区域的 IPVS;②该方法的理想状态是在化身刚要原地旋转以浏览时,各子区域场景都已下载到本地,然而当面临带宽严重不足时,可能在开始旋转时仅  $Q_1$  中场景被下载,此时要可视化  $Q_2$  中场景则又需用户等待较多时间。对于①,可参照文献[5]中提出的动态增量 AOI 算法来解决;对于②,考虑到化身在旋转的过程中也是逐渐观察到新落入到当前可视范围内的场景,因此可以采取逐步旋转,逐步下载 IPVS 并渲染的策略,从而加快用户浏览场景的进度。

(2) 复合型 P2P 结构 DVE 中场景资源发现机制的改进 DVE 的体系结构经历了从传统 C/S 向对等式(P2P)结构的演变,通过对比基于不同体系结构 DVE,可以看出基于复合型 P2P 结构的 DVE 体现了更好的可扩展性和健壮性,更加适应于 MMOG 等多用户同时下载场景的场合。现有复合型 P2P 传输模式中的资源发现机制可基本分为以下几类:(i)如某节点在虚拟场景中的坐标落入请求节点的 AOI 内,则将其视为候选场景提供者;(ii)动态扩大 AOI 半径增加搜索范围以进一步增加候选场景提供者的数量;(iii)只要两节点的 AOI 圆周相交,则双方都可将对方视为自己的候选场景提供者。这些资源发现机制虽然扩大了候选场景提供者的数量,但对请求节点而言,现多是在众多候选场景提供者中随机选择一个作为实际的应答节点,而随机选择可能造成:应答节点需同时应付过多请求造成负载较高,从而影响整体性能的缺陷,因此有必要根据候选场景提供者的工作负载、可用带宽等因素设计更为合理的应答节点选择策略。另外由于应答节点同时可能为请求节点,因此在发送场景和下载场景之间的带宽合理分配等方面仍值得进一步研究。

(3) 预下载策略的改进 现有的基于历史运动轨迹的预下载策略对化身运动趋势的预测准确度仍有待提高,从化身历史运动规律中分析其运动趋势,提高预下载的准确率依然

值得关注。而基于邻域扩张的预下载策略尚存在的问题有：  
 ① 对化身平移速度对预下载的影响(当化身运动较快时，场景的预下载速度可能跟不上渲染速度，从而造成漫游的不流畅)考虑不够；② 现有预下载策略多为预下载固定尺寸单元中的场景，未考虑单元中物体分布的稠密度对预下载的影响(当某单元中物体较少时，未能充分利用空闲时间)。对①的改进可从适当降低用户视觉感受(在用户视野不变的情况下，采用 LOD、渐进网格等来减少需要预下载的场景数据量)、缩小用户视野来减少预下载场景数据量着手。对②的改进，应将预下载固定尺寸单元中的场景扩展为预下载尺寸单元中的场景。例如当化身驻留时，可将文献[11]中提及的 DLAOI 扩展为更大半径的多层 AOI，这样就可以充分利用空闲时间预下载落入其第三层及更外层区域的场景。

(4) 综合流式传输协议的设计 虚拟场景中的数据已经从几何模型数据、纹理数据扩展为包含视频、音频流媒体数据的传输<sup>[33]</sup>，现有的虚拟场景传输在应用层主要是采用 HTTP 协议(在传输层依赖 TCP、UDP 协议)，而视频、音频等媒体数据传输多采用 RTP、RSTP 和 UDP 协议。因此需要设计一种机制来满足传输不同类型数据的要求，虚拟现实传输协议——VRTP(Virtual Reality Transfer Protocol)<sup>[34]</sup>、分布式虚拟世界传输和通信协议——DWTP(distributed worlds transfer and communication protocol)<sup>[35]</sup>等协议的开发在这方面开展了探索。另外还需解决多种媒体数据传输的同步问题(如纹理图片与几何模型的同步仍未得到很好的解决)。

**结束语** 随着网上三维虚拟场景数据量及复杂度的急剧增长、用户对即时下载虚拟场景的迫切需求和海量场景数据之间的矛盾日益突出，采用渐进式传输策略已经成为实现网上大规模乃至超大规模虚拟场景快速下载的主要手段。本文首先介绍了渐进式传输的原理、基本过程、优点及其特殊性等，接下来重点从潜在可视场景集及潜在可视场景集增量的判定、三维物体模型的简化和流式编码、基于不同体系结构的 DVE 中的场景传输机制和虚拟场景的预下载等方面论述了用于大规模虚拟场景下载的“渐进式传输”策略，并对不同方法的优缺点进行了深入比较，最后对网上大规模虚拟场景渐进式传输策略的未来研究方向进行了展望。

## 参 考 文 献

[1] Wang Zong-hui, Jiang Xiao-hong, Shi Jiao-ying. HIVE: A Highly Scalable Framework for DVE [C] // Proceeding of the IEEE Virtual Reality 2004. Washington DC, USA: IEEE, 2004: 261-262

[2] Heektisto V, Fairén M. Enhancing Collaboration in Virtual Reality Applications [J]. Computers & Graphics, 2005, 29(5): 704-718

[3] Cecin F R, Jannone R D O, Geyer C F R, et al. FreeMMG: A Hybrid Peer-to-Peer and Client-Server Model for Massively Multiplayer Games [C] // Proceeding of 3th ACM SIGCOMM workshop on Network and system support for games. Portland, Oregon, USA: ACM Press, 2004: 162-172

[4] Hu Shun-yun, Huang Ting-jao, Chang Shao-chen, et al. FLoD: A Framework for Peer-to-Peer 3D Streaming [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM' 08. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2008: 2047-2055

[5] Jia Jin-yuan, Wang Peng, Wang Shen, et al. An Integer Incremental AOI Algorithm for Progressive Downloading of Large Scale VRML Environments [J]. LNCS, 2007, 3522: 711-722

[6] Kuhn K. Using RTP and RTSP for Real-Time 3D Interaction [D]. Master's thesis, University of Maryland Baltimore County, 2006

[7] Royan J, Gioia P, Cavagna R. Network-Based Visualization of 3D Landscapes and City Models [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2007, 27(6): 70-79

[8] Cheng Zhi-quan, Jin Shi-yao. A QoS Controller for Adaptive Streaming of 3D Triangular Scenes [J]. LNCS, 2007, 4469: 572-583

[9] Teler E. Streaming of Complex 3D Scenes for Remote Walkthroughs [D]. Master's thesis, Hebrew University of Jerusalem, 2001

[10] Xie Cui, Liu Xiu-wen, Jin Yi-cheng. 3D Scene Transmission for Web-Based Shiphanding Training [C] // Proceedings of Computer Graphics, Imaging and Vision: New Trends. Beijing, China: IEEE, 2005: 291-298

[11] Li F W B, Lau R W H, Kilis D. GameOD: An Internet Based Game on Demand Framework [C] // Proceeding of ACM VRST'04. HongKong: ACM Press, 2004: 129-136

[12] Chim J, Lau R W H, Leong V. CyberWalk: A Web-Based Distributed Virtual Walkthrough Environment [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2003, 5(4): 503-515

[13] Royan J, Gioia P, Cavagna R, et al. Peer-to-peer Visualization of Very Large 3D Landscape and City Models Using MPEG-4 [C] // Proceedings of 3DTV. Istanbul, Turkey: IEEE, 2008: 93-96

[14] Schroeder J W, Zarge A J, Lersens E W. Decimation of triangle meshes [J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 65-70

[15] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics [J]. Computer Graphics, 1997, 31(3): 209-216

[16] Isler V, Lau R W H, Mark G. Real-time Multiresolution Modeling for Complex Virtual Environments [C] // Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York, USA: ACM, 1996: 11-19

[17] Hoppe H. Progressive mesh [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH. New Orleans, USA, 1996: 99-108

[18] Cheng Zhi-quan, Liu Hua-feng, Jin Shi-yao. The Progressive Mesh Compression Based on Meaningful Segmentation [J]. Visual Computer, 2007, 23(9): 651-660

[19] Popescu G, Liu Z. On scheduling 3 D Model Transmission in Network Virtual Environments [C] // Proceedings of IEEE Distributed Simulation and Real-Time Application. Fort Worth, TX, USA: 2002: 127-133

[20] Deb S, Bhattacharjee S, Patidar S, et al. Real-Time Streaming and Rendering of Terrains [C] // Proceedings of ICVGIP06, Madurai, India: LNCS, 2006: 276-288

[21] Beatrice N, Lau R W H, Antonio S, et al. Multi-Server Support for Large Scale Distributed Virtual Scenes [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2005, 7(6): 1054-1065

[22] Gioia P, Aubault O, Bouville C. Real-time Reconstruction of Wavelet-encoded Meshes for View-dependent Transmission and Visualization [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems and Video Technology, 2004, 14(7): 1009-1020

efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proc. of the Hawaii

- [6] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. On Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [7] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [8] Smaragdakis G, Matta I, Bstavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proc. of the 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004). Boston, MA, Aug. 2004
- [9] Zhu Qingxin, Oommen J. On the optimal search problem: the case when the target distribution is unknown[C]//Proc. of the Chilean Computer Science Society. Valpariso, CHILE, Nov. 1997; 268-277
- [10] Hefeeda M, Ahmadi H. A probabilistic coverage protocol for wireless sensor networks[C]//Proc. of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP'07). Beijing, China, Oct. 2007
- [11] Huang Rui. Probabilistic localization of mobile ad hoc networks [D]. The University of Texas at Arlington; Arlington, Texas, USA, Dec. 2006
- [12] Ekici E, Vural S, McNair J, et al. Secure probabilistic location verification in randomly deployed wireless sensor networks[J]. Elsevier Ad Hoc Networks Journal, 2008, 6(2): 195-209
- [13] Sheng Xiao-hong, Hu Yu-hen, Ramanathan P. Distributed particle filter with GMM approximation for multiple targets localization and tracking in wireless sensor network[C]//Proc. of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '05). Los Angeles, California, April 2005; 181-188

(上接第 43 页)

- [23] Cavagna R, Bouville C, Royan J. P2P Network for Very Large Virtual Environment [C]//Proceedings of ACM VRST'06. Limassol, Cyprus; ACM, 2006; 269-276
- [24] Hu Shun-yun, Chen Jui-fa, Che Tsu-han. Von: A Scalable Peer-to-Peer Network for Virtual Environments [J]. IEEE Network, 2006, 20(4): 22-31
- [25] Keller J, Simon G. Toward a Peer-to-Peer Shared Virtual Reality [C]//Proceedings of IEEE Workshop on Distributed Computing System. Vienna, Austria; IEEE, 2002; 695-700
- [26] Rueda S, Morillo P, Ordufia J M. A Peer-To-Peer platform for simulating distributed virtual environments [C]//Proceedings of Parallel and Distributed System. Nevada, USA; IEEE, 2007; 1-8
- [27] Lazem S, Elteir M, Hamid A, et al. Prediction-Based Prefetching for Remote Rendering Streaming in mobile virtual environments [C]//Proceedings of IEEE ISSPITL. Cairo, Egypt; IEEE, 2007; 760-765
- [28] Li Tsai-Yen, Hsu Wen-Hsiang. A Data Management Scheme for Effective Walkthrough in Large-Scale Virtual Environments [J]. Visual Computer, 2004, 20(10): 626-634
- [29] Hanawa D, Tatsuhiro Y. A Proposal of Dead Reckoning Protocol in Distributed Virtual Environment Based on the Taylor Expansion [C]// Proceedings of Cyberworlds06. Lausanne, Switzerland; IEEE, 2006; 107-114
- [30] Koltun V, Chrysanthou Y, Cohen D. Hardware-accelerated From-region Visibility Using a Dual Ray Space [C]// Proceedings of 12th Eurographics Workshop on Rendering. London, UK, 2001; 204-214
- [31] Zheng Zhi, Chan T K Y. Optimized Neighbor Prefetch and Cache for Client-Server Based Walkthrough [C]//Proceedings of Cyberworlds03. Singapore; IEEE, 2003; 143-150
- [32] Cevikbas S B, Koldas G, Isler V. Prefetching Optimization for Distributed Urban Environments [C]// Proceedings of CyberWorlds08. Hangzhou, China; IEEE, 2008; 340-348
- [33] Patel K M, Gotz D. Scalable, Adaptive Streaming for Nonlinear Media [J]. IEEE Transaction on Multimedia, 2007, 14(3): 68-83
- [34] Peng Qing-jin, Chung Chui-ho, Cai Yu, et al. A Networked Virtual Manufacturing System for SMES [J]. Computer Integrated Manufacturing, 2007, 20(1): 71-79
- [35] Shang Hui-ping, Zhao Zheng-xu, Thorn R. Implementing Manufacturing Message Specifications (MMS) within Collaborative Virtual Environments over the Internet [J]. Computer Integrated Manufacturing, 2003, 16(2): 12-127
- [36] 贾连兴, 单维峰. 作战仿真研究热点及发展[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3148-3150
- [37] 顾朝林, 段学军. 论数字城市及其三维再现关键技术[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 14-25
- [38] 赵沁平, 沈旭昆, 齐越. 数字博物馆若干关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 1-7
- [39] 卢威, 曾定浩, 陈继明, 等. 虚拟博物馆系统构建中的关键技术研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(7): 244-247
- [40] 沈旭昆, 赵学伟, 赵沁平. 一种保留特征的网格简化和压缩递进传输方法[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(7): 1097-1104
- [41] 程志全, 李俊, 金士尧. 三维几何模型的流式传输技术综述[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 238-242
- [42] 吴玲达, 高宇, 魏迎梅. 大规模复杂场景交互绘制技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(9): 1579-1587
- [43] 高宇, 邓宝松, 吴玲, 等. 一种复杂场景遮挡剔除的优化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2007, 19(5): 583-588
- [44] 吴言华, 蔡云泽, 许晓鸣. 分布式虚拟环境的可扩充性研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(4): 926-929
- [45] 吴言华, 蔡云泽, 许晓鸣. AOI 交会触发服务器消息过滤方法 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(1): 80-84
- [46] 沈瑜, 崔业怡, 李惠, 等. 分布式虚拟环境中兴趣管理技术的分类研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(3): 113-117
- [47] 冯洁, 查红彬. 大型三维网格模型的简化及基于视点的 LOD 控制[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2006, 18(2): 186-193
- [48] 李公立. 三维模型的渐进式编码与流传输技术的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 370-374
- [49] 杨劲松, 苏鸿根. 关于三维单元压缩和渐进传输问题的几点探讨 [J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(22): 4306-4308
- [50] 李起成, 汪国平. 数字博物馆中的三维模型渐进传输方法[J]. 计算机工程, 2006, 32(19): 221-223
- [51] 尚慧萍, 张丽娜. 网络虚拟现实的网络架构和通信协议研究[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(24): 4699-4704
- [52] 朱军, 龚建华, 张健钦, 等. 基于对等结构的虚拟地理环境系统研究[J]. 微计算机信息, 2006, 22(12): 191-194