

基于点的计算机图形学研究进展

邱航 陈雷霆

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

摘要 基于点的图形学是计算机图形学中一个新的研究领域,它为解决大量三维采样数据的快速绘制处理提供了一条新的途径。从点模型数字几何处理流程出发,详细分析了点模型数字几何处理流程各阶段新的进展,并对相应的关键技术进行了比较,最后探讨了基于点的计算机图形学未来的研究方向。

关键词 基于点的计算机图形学,点模型,基于点的绘制,基于点的造型

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Research and Development of Point-based Computer Graphics

QIU Hang CHEN Lei-ting

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Point-based graphics is a new research field of computer graphics, it leads to a new way of fast rendering from huge 3D sampled data. Based on the digital geometry processing pipeline of point-sampled model, various up-to-date algorithms were reviewed, some related key techniques were compared. The outlook of the future work in this area was also given in the end.

Keywords Point-based computer graphics, Point-sampled model, Point-based rendering, Point-based modeling

点是最简单、最基本的几何定义实体^[1]。早在上世纪80年代,Levoy和Whitted^[2]就提出直接用点作为基础图元绘制复杂的三维几何模型,当时并没有引起人们过多的关注。近年来,随着模型多边形复杂度的剧增,点模型的优势越发明显,以点元为研究对象的基于点的计算机图形学已经越来越受到关注,成为图形学中的一个研究热点。

点模型的数字几何处理流程可以概括为点的获取、点的处理和建模以及点模型的绘制3个阶段,每个阶段都涉及许多细节技术。本文以点模型数字几何处理流程为基础,详细分析了各阶段近20年来所取得的主要进展,比较了其中所涉及的关键技术,最后展望了该领域的发展趋势。

1 点模型获取与预处理技术

点模型的主要来源是3D扫描仪生成的原始数据,包括深度照相机生成的深度图和激光三维扫描仪等设备得到的大量空间三维点位置。随着硬件的发展,点模型的获取显得更加容易和方便。点模型的另一个来源是现有模型,大部分几何模型如多边形网格模型、隐式曲面等都能方便地转化为点模型。

由于通过三维扫描仪获得的数据一般不能直接用于点模型的处理,必须对其进行必要的预处理。本节重点介绍点模型的预处理相关技术,主要包括配准、去噪、修补等^[3]。

1.1 配准

在扫描实体时,模型自身遮挡、扫描者视线的限制等原因,物体表面完整数据的获得需要经过多次测量,然后基于多次扫描的结果合成一个连贯的三维模型。由于每次测量得到的点数据往往只覆盖物体部分表面,且可能出现错位,因此为了得到实体完成表面的点模型,需要对这些局部点数据进行配准。文献[3]对配准做了较完善的综述。

三维数据配准技术主要分为两大类^[4]:机器配准和自动配准。自动配准技术与硬件无关,因此得到了广泛关注。自动配准技术一般分为初始配准和精确配准。

初始配准的方法主要有:

(1)标签法^[5]。在测量时人为贴上一些特征点,使用这些特征点进行定位,该方法依赖于测量和仪器;

(2)特征提取法。通过提取轮廓线^[6]作为对齐的基准。

精确配准早期使用最为广泛的是最近点迭代算法ICP (Iterative Closest Point)^[7],但该算法效率低。国内外学者为改进ICP算法做了许多工作。文献[8]提出了用点的切平面来逼近点云,最后归结为求点到切平面的最小二乘距离,但该方法计算速度慢。文献[9]结合了逆向标定法和随机搜索法来提高效率,但对配准精度有影响。文献[10]提出了一种迭代最近线方法ICL (Iterative Closest Line),通过直接对两个点云中的点连线并寻找对应线段进行配准。

1.2 去噪

基于点的模型通常由三维扫描仪得到,采样点中包含了

到稿日期:2008-07-31 返修日期:2008-10-08 本文受国家863项目(2005AA114030),国家863项目(2006AA01Z335),国家863项目(2007AA010407)资助。

邱航(1978-),男,博士生,讲师,主要研究方向为计算机图形学, E-mail: qiuhan@uestc.edu.cn; 陈雷霆(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实技术。

一定的噪音,在预处理中需要进行去噪处理。在去噪过程中,一个重要的问题是:在去噪的同时,如何有效地保持模型的特征。

Alexa^[11]采用MLS(Moving Least-Squares,移动最小乘)曲面逼近原始点集模型,然后将点移到其对应的曲面上去除噪音,该方法效率不高。文献[12]提出了基于三维Meanshift过程的各向异性点模型去噪算法,该算法将点法向和曲率作为特征分量,顶点坐标值作为空间分量,通过Meanshift过程寻找其局部模式,在此基础上提出顶点估计的三边过滤器,在获得去噪效果的同时能有效地保证特征。Fleishman^[13]提出了一种健壮的MLS曲面重建方法,该方法能从有噪音的点模型重建出分段线性的光滑曲面。这种改进的MLS重建方法不需要模型的拓扑连接信息,因此不但能够有效地去噪,而且能够有效地从点模型中准确地重建出尖锐特征。缪永伟^[14]将图像的非局部去噪方法推广到点模型,提出了点模型的非局部去噪方法,该方法将各采样点处的局部几何特征表达为“几何灰度值”,并利用模型表面所有可能的局部相似区域进行自我预测,达到光滑去噪的目的。王仁芳^[41]提出了一种基于采样保真性的点模型去噪算法,该算法通过MLS曲面,计算每个采样点的保真性,利用改进的双边滤波算子获得各个采样点的滤波方向,结合保真性和特征性对点模型进行去噪。2007年Schall等^[15]将图像处理中的非局部领域过滤算法用于点模型去噪,获得了较好效果,该算法同样具有恢复点模型几何特征的能力。

随着三维扫描技术的发展,虽然测量仪的精度在不断提高,但测量时引起的误差和扫描仪本身的限制所带来的数据噪音不可忽略。目前,作为点模型数字几何处理基础工作的去噪仍是学者研究的热点之一。

1.3 修补

三维扫描仪从物体表面采样时,由于模型表面的自遮挡以及镜面材料等原因,获得的数据会出现孔洞。同样,在对点模型数据进行大规模变形的编辑处理时,模型也会出现孔洞或裂缝现象。因此,对模型的修补成为获取三维数据后的一个重要处理过程。

Carr等^[16]使用全局紧支持的径向基函数拟合离散点集;Ahn等^[17]和Wang等^[18]分别进行MLS曲面重建,以此实现孔洞的修复。这些算法的共同特点就是简单、容易实现,但所构造的孔洞曲面是光滑的,缺乏曲面的几何特征,显得不自然。修补的目标不仅要修复孔洞、裂缝等进行修复,同时对修复好的区域要尽可能复现周围区域的细节。

基于修补的目标,Sharf等^[19]提出一种基于上下文的点模型修复方法,该方法是基于邻域相似的原则,在采样点模型的其它地方寻找与孔洞周围匹配程度最高的采样点区域作为填补孔洞的几何块,这种方法获得了较好的效果,但由于需要采用MPU(Multi-level Partition of Unity)局部重建曲面,使得计算量大且不稳定。图1是关于上下文的点模型修复示意图。

对于有颜色纹理的模型,修补时不但需要修复其几何信息,还需要修复模型表面的纹理信息。Park等^[20]通过为待修补的区域构造一个局部参数化,然后将图像Poisson方程推广到点模型上,获得了几何和颜色的修复结果,但该方法需要对点模型进行参数化且需要解方程。Xiao等^[21]基于纹理合

成的思想,提出了一种新的在点采样几何上进行基于全局优化的表面颜色纹理修复和基于上下文的几何修复算法,实现了点模型的纹理和几何修复,但该方法需要用户交互地在模型表面上指定纹理和几何样本,且几何修复时需要构建基曲面。王仁芳^[41]提出了一种生成细节的点模型几何修复算法,该算法首先探测点模型的孔洞边界并确定其影响区域,根据该影响区域中的采样点进行RBF(Radial Basis Function)^[16]曲面重建,利用三边滤波算子估算各采样点的几何细节信息,基于带约束的全局优化纹理合成方法重构孔洞曲面的几何细节。

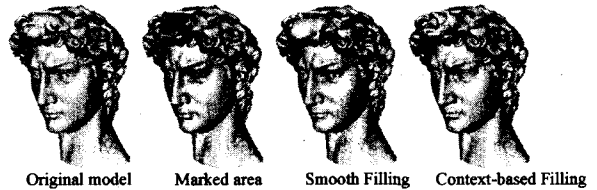


图1 基于上下文的点模型修复

由于点模型的修补既要使填补的孔洞曲面在边界处与影响区域曲面达到光滑的几何连接,又要使孔洞曲面在整体上与原模型保持几何特征的一致性,因此点模型的几何修补一直是曲面设计中的难题,它也成为目前研究的热点问题之一。

2 点模型建模技术

经过预处理阶段的采样点数据可以进行建模。点模型建模的目标是从原始点云中构造出一个连续的表面模型。点模型建模所涉及的技术较多,如曲面重建、曲面简化、几何属性分析、特征提取、重采样等。本文重点介绍曲面重建和曲面简化技术。

2.1 曲面重建技术

曲面重建是指根据离散扫描点数据重建三维模型的过程。文献[16]提出的RBF(Radial Basis Function)曲面重建方法利用多重调和径向基函数从非均匀分布点云中重构出光滑流行表面:

$$s(x) = p(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(|x - x_i|)$$

但该方法计算量相当大。

文献[11]将MLS成功应用于点模型的表面重建中,MLS曲面已被广泛应用于基于点的造型和绘制中。

文献[22]利用曲面法向量场和表征曲面的指标函数的梯度之间的关系,由法向量场建立指标函数梯度场,然后根据梯度场利用最小二乘求解Poisson方程:

$$\vec{\Delta} \chi = \nabla \cdot \vec{V}$$

得到指标函数,最后由该函数通过提取其等值面来重建曲面。

文献[42]基于MLS采用先概化、后细化的顺序,提出了渐进的点采用曲面表示方法。

2.2 曲面简化

利用三维扫描仪获得的点模型通常具有很高的复杂度,为了使大规模数据模型符合几何处理和绘制,必须对数据模型进行简化。

Pauly等^[23]将几种与网格有关的聚类方法应用到采样点模型表面上,取得了与网格模型表面相同的简化效果,但这种方法不能像网格模型表面那样预先用一个全局误差去控制简

化过程。

Wu 等^[24]提出了专门为表面面元(splat)而设计的简化方法,该方法完全考虑表面 splat 的线性几何,并能用确定的全局误差控制着面元的形成和简化。

文献[3]提出了一种新的大规模点模型简化算法,该算法分为两个阶段,第一阶段根据几何近似原理将点模型分割成与平面近似的多个分片;第二阶段在分片的基础上再进行层次空间聚类简化。

文献[41]提出了基于几何图像的点模型简化方法以及基于相似性的点模型简化算法。基于几何图像的点模型简化算法将点模型的球面极坐标映射到平面上,构造其几何图像,将简化密度定义为简化时所循序的最大像素搜索半径,将曲率门限值和简化密度相结合进而实现点模型的曲率自适应简化。基于相似性的点模型简化算法通过法向量投票方法将点模型分为强特征边性和非强特征边性,利用 MeanShift 聚类法对非强特征边性部分进行表面区域几何特征相似性聚类,然后分别进行简化,从而保持了特征边界和曲面细节。

3 点模型编辑与几何造型技术

点模型的处理一般分为前期处理和后期处理两个部分。前文所介绍的点模型预处理技术以及点模型建模技术都属于前期处理,其主要目标就是要把从扫描仪得到的原始点数据构造成一个表面连续的点模型。点模型的后期处理则是对点模型作进一步的造型处理,一般包括编辑、变形、布尔运算等,从而得到符合用户要求的模型。

3.1 点模型编辑技术

点模型的编辑是指对点模型的颜色、纹理等外观属性以及法向量的处理。

Zwicker 等^[25]开发的 PointShop3D 系统是点模型编辑的一项重要成果,该系统类似于 PhotoShop 图像处理系统,可以对采样点表面进行纹理绘制、参数化、位移映射、雕刻等多种操作。PointShop3D 利用有效的参数化技术建立 3D 简化模型和 2D 参数域之间的映射,将参数域的处理方法一直用到 3D 简化模型上。

Adams 等^[26]提出了基于点模型的三维物体表面着色系统。它用点模型表示物体表面和画刷表面,克服了网格模型需要参数化的缺点。图 2 是点模型的画刷着色效果图。

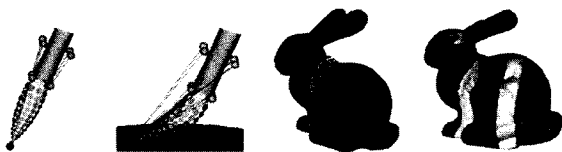


图 2 基于点模型的画刷及着色效果

在纹理合成方面,Clarenz 等^[27]研究了如何在点模型表面上进行有限元的几何处理,他们给出了一个简单的基于像素的纹理合成结果。肖等^[28]提出了能直接用在三维离散点采样表面的全局优化纹理合成算法,所合成的纹理具有视觉上的连续性和平滑性。

相对于点模型编辑的其它方面,点模型的纹理合成研究较少。

3.2 几何造型技术

点模型的几何造型技术包含较广的范畴,如构造几何实

体、变形和动画等。

3.2.1 实体几何造型

实体几何造型(CSG; Constructive Solid Geometry)是一种基于简单实体的布尔运算构造复杂模型的技术,即通过对多个简单的点模型进行布尔运算后生成复杂的点模型。如图 3 所示,布尔运算是实体几何造型的关键技术,通过对简单实体做并、交、差运算,可以产生新的、更为复杂的实体模型。

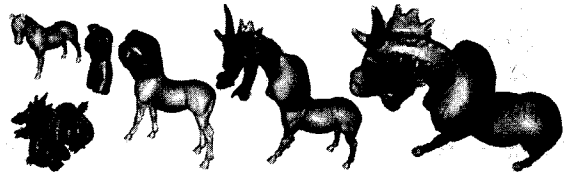


图 3 利用布尔运算构造几何实体

Pauly 等^[29]基于 MLS 实现了点模型的布尔运算。Ohtakes 等^[30]通过利用曲面拟合点模型表面来实现点模型的布尔运算。

Adams 等^[31]提出了另一种构造几何实体的方法,这种方法无需点模型表面局部曲面重建,直接对 surfel 表示的点模型进行布尔运算。

在后续工作中,Adams 等^[32]还在 GPU 上实现了点模型的 CSG 操作,提高了运算速度。

3.2.2 自由变形

自由变形技术是目前的一个研究热点。这种变形技术首先生成一个置换函 $d: R^3 \rightarrow R^3$,然后对表面上的每个点 p_i (即网格顶点或 splat 的中心)实施变换 $p_i \mapsto d(p_i)$ 。

Pauly 等^[33]结合粒子系统和 MLS 实现了点模型弯曲、拉伸、扭转、压缩等变形操作。Guo 等^[34]基于点模型的 level-set 表示实现了点模型几何变形操作。Botsch 和 Kobbelt^[35]采用三次调和径向基函数实现了网格模型和点模型的实时自由变形。

3.2.3 点模型动画

无网格方法(MFM; Mesh Free Method)是力学分析的新方法,近年来研究者将无网格方法和点模型相结合,提出了基于点的动画。

Muller 等^[36]首次建立了一个基于连续力学的无网格方法,用以模拟弹性、塑性以及可溶性物体。

Wicke 等^[37]基于薄盘和薄片的 kirchhoff 理论,模拟了点模型的变形效果,给出了一个点采样薄板样条动画,如图 4 所示。



图 4 塑性物体变形动画

Keiser 等^[38]结合固体力学方程和流体力学的 Navier-Stokes 方程将无网格点模型动画方法推广到流体等粘性材料的模拟上。

Pauly 等^[39]研究了弹性和塑性材料在破碎和断裂过程中的无网格动画。

2006 年 Adams^[26]在文献[38]的基础上提出了弹性物体

破碎的扩展方法,如图5所示。



图5 物体破碎

Guo等^[40]基于整体保形参数化,提出了无网格模型的一种物理模拟方法,用于模拟薄片的弹性变形和破裂效果。

文献[41]讨论了点模型的碰撞检测问题,根据MLS定义了一个分类器,判断一个采样点是否在点模型内部,以实现点模型间的碰撞检测和自判断。Pauly等^[42]讨论了二次刚度点模型的碰撞检测和处理问题。

2008年,Adams等^[43]基于无网格有限元(Meshless Finite Element)公式,提出了一种新的交互式模型变形和关键帧插值框架,如图6所示。

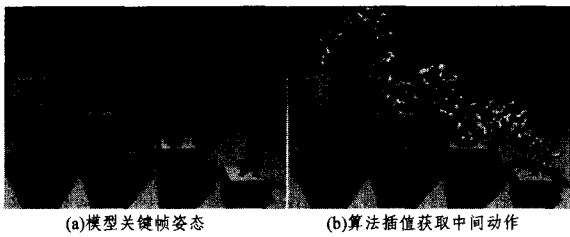


图6 模型形变

4 点模型渐变(Morphing)技术

点模型渐变技术是基于点模型动画的一个重要分支。点模型自身的特点决定了在模型渐变中,它比基于网格模型的渐变有明显的优势,但由于点模型没有提供表面的解析表达式和参数化信息,从另一方面又增加了它渐变的难度。目前点模型渐变方面的研究成果非常少,它已成为基于点的计算机图形学中一个非常活跃的研究方向。

如图7所示,点模型的渐变主要分为基于物理的渐变和基于几何的渐变^[3]。



图7 点模型渐变

4.1 基于物理的渐变

基于物理的渐变需要建立相关物理模型,中间过渡点模型根据能量方程求解,这种渐变在一定程度上模拟了真实的物理现象。

Bao^[44]等详细分析了模型渐变以及基于物理的无网格方法,提出了一种基于物理的点模型渐变方法,借助动态的无网格方法仿真点采样曲面,运用微分几何和连续介质力学中的概念对渐变过程中曲面的形变问题进行分析,但该方法涉及了复杂的边值偏微分方程的求解问题。

4.2 基于几何的渐变

基于几何的渐变是通过源和目标模型进行几何变换来获得中间过渡模型,其计算量没有基于物理的渐变那么大。

文献[45]提供了几种将点模型进行聚类的方法,对源和目标模型分别建立二叉树,再在两个二叉树的结点间建立对应关系,但该方法在渐变过程中会产生大量的裂缝和空洞。

Xiao等^[46]提出了一种基于平面参数化的点模型渐变算法,利用Floater^[47]提出的无网格参数化方法将零亏格点模型映射到圆形的参数域上,然后通过旋转该参数域对准特征点并建立源和目标模型间的对应关系。该方法避免了文献[45]出现的裂缝现象。该平面参数化方法的前提是需要确定一条边界,这是一件不容易的工作。

王仁芳^[48]基于球面参数化,提出了一种鲁棒的点模型渐变算法。对源和目标模型首先进行球面参数化,使参数化后的模型嵌入到单位球面上;在球面上自适应地对准模型间的相应特征点后,将球面映射到矩形参数域上,并基于矩形域建立模型间采样点的对应关系;在渐变过程中,采用拉普拉斯算子求解中间点模型,以保持模型的细节。

田海山^[49]基于主分量分析和采样点聚类提出了大规模点采样曲面的Morphing算法。

5 点模型绘制技术

对点模型完成处理和建模后,需要将其结果在显示设备上显示出来,这个阶段所涉及的技术就是点模型的绘制技术。点模型的绘制算法一般分为两种,即基于效率的绘制算法和基于质量的绘制算法。

5.1 基于效率的绘制算法

基于效率的绘制算法在绘制时把每个点用一个不透明的正方形表示,虽然高效但会产生图形走样。

Qsplat技术^[50]是由斯坦福大学Rusinkiewicz和Levoy开发的具有代表性的点绘制技术。它利用树状层次包围球数据结构,树中每个结点包含球的位置和半径、每点处的法向量、法锥面的宽度、颜色值。在进行绘制时,层次树按深度优先方法递归遍历。对每个中间结点,首先判断该球是否完全在屏幕外或者是完全背向的,以进行可见性选择。如果该结点至少有一部分子结点是可见的,则将该结点在屏幕上的投影大小同一个门限值进行比较。如果大于门限,则继续向下递归;如果小于门限或者已经到达叶结点,则按该结点的球位置及半径确定的屏幕上的位置和大小绘制一个小区域。由于Qsplat算法基于层次结构遍历,因此无法利用可编程硬件对其进行加速。同时,由于Qsplat主要面向大数据量的模型的快速显示,因此尽管采用了相当大的压缩率,但每个模型的数据文件仍然很大。

2001年,Rusinkiewicz等^[51]提出了Streaming Qsplat,它是对Qsplat方法的改进。该方法将模型序列化为线性结构,从而能在网络中快速传输点模型。其绘制仍通过层次树遍历,因此只能由软件实现。

2003年,Stamminger等^[52]提出了一种将点模型层次结构序列化为一个线性数组的方法,从而实现了Qsplat的GPU硬件加速。

5.2 基于质量的绘制算法

2000年,Pfister等^[53]提出用点面元(surfel)来代表一个采样点,这个点被表示为位于点切向上的一个圆盘,各点的圆盘相互重叠并形成紧密的物体表面。该方法采用一种被称为LDC(Layered depth cube)的数据结构来存储采样点。采样

时,从互相垂直的3个方向投射光线,沿每条光线记录下与物体的交点,每个交点均记录法向量、颜色和材质信息。在绘制时,首先通过可见性预处理去除被遮挡的点,再将可见点投影到屏幕空间,并在屏幕空间进行二维图像重建,得到光滑图像。该方法绘制的图像质量有了明显的进步,但存在着色不连续的问题。

Zwicker在Pfister的方法上进一步对基于点的纹理表示和反走样等问题进行了论述。2001年Zwicker等^[54]提出了一种高质量的各向异性反走样算法,该方法又被称为表面足迹法——Surface Splatting方法。该算法对每个足迹赋予一个半径对称的高斯滤波内核,通过各足迹数据的加权平均重构连续表面,绘制的图像质量好。但算法全部由软件实现,因此在绘制高度复杂的模型时运行效率较低。

2003年Botsch等^[55]通过图形硬件实现了基于高斯滤波的表面足迹法,该方法使绘制速度得到明显提高。但由于当前图形硬件是专门针对基于三角形绘制的优化,因此在绘制性能上,硬件加速的点在一定程度上不及硬件加速的三角形。

2005年张龙等^[56]提出了一个针对大规模点模型的实时高质量绘制算法,该算法采用距离相关的自适应绘制策略,在不损失绘制质量的前提下简化了计算。

6 基于点的绘制处理平台

在基于点的计算机图形学发展早期,学者们把注意力集中在点模型数字几何处理流程各阶段的算法研究上。随着研究成果的不断涌现,学者们开始思考如何构造基于点的三维几何处理应用平台,从而更好地展现和利用现有成果。

2002年,Zwicker等^[25]开发了PointShop3D系统,它是一个交互式点采样几何处理系统软件。该平台软件完全开源,提供给其他研究人员使用,在其基础上做进一步研究开发。研究人员的最新研究成果可以以插件的形式加入到该平台中,因此PointShope3具有极大的通用性和可扩展性。但PointShop3D无法实现大规模点模型数据的处理和绘制。

Qsplat^[50]给出了一个大规模点模型绘制方法,但它不是一个通用的软件平台。

2004年,浙江大学胡国飞等^[57]提出了一个点模型数字几何处理平台——PBDGP。该平台扩展性较差,研究成果的集成需要修改平台核心代码。

2006年,浙江大学徐鑫^[58]提出了一个易扩展的基于点的造型和绘制系统平台。该平台采用插件的设计思想,提供了灵活的插件编程和数据接口,所有关于点模型的处理和绘制功能都以插件的形式实现。但该平台还没有广泛推广。

7 发展趋势

近年来,基于点的计算机图形学发展迅速,得到了包括ACM SIGGRAPH,IEEE VGTC等的大力支持和推动,许多有价值的成果相继出现。关于点模型,未来仍有许多具有价值的研究工作需要我们进一步深入:

1)基于点的自然场景建模。根据点模型的特点,即点元间无需建立拓扑关系,可以考虑利用点来构造一些不规则自然景物或现象,如云、雨、水波等。

2)基于点模型的动画。无网格方法在求解大变形、断裂等非常规问题时比有限元更有优势,而点模型是无网格模型

最自然的表示形式。随着数字娱乐领域的发展,应用无网格技术进行点模型变形将是一个重要而有意义的研究方向。

3)点模型的简化、压缩和传输。点模型庞大的数据量对当前图形引擎的处理能力提出了挑战,如何有效地简化模型是一项有价值的工作;另一方面,随着互联网的发展,点模型可能会作为一种媒体资源得到应用,因此考虑点模型在网络中的传输和压缩方法也是一项有意义的工作。

4)基于GPU的大规模点模型绘制。随着可编程图形硬件的发展,大大提高了图形处理的速度和质量。将GPU编程应用于大规模点模型的绘制,是发展的必然趋势。

参考文献

- [1] 冯中心. 基于GPU的大规模点模型实时渲染技术[D]. 浙江:浙江大学,2006
- [2] Levoy M, Whitted T. The Use of Points as Display Primitives [R]. TR 85-022, Department of Computer Science, The University of North Carolina at Chapel Hill, 1985
- [3] 邹万红. 大规模点云模型几何造型技术研究[D]. 浙江:浙江大学,2007
- [4] Williams J A, Bennamoun M, Latham. 3D registration: a review and a new technique[C] // 1999 IEEE International Conference on Systems. 1999
- [5] 罗先波,等. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(8):1104-1106
- [6] Yang R, Allen P. Registering, integrating, and building cad models from range data[C] // 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1998:3115-3120
- [7] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-d shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256
- [8] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images[C] // 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1991:2724-2729
- [9] Blais G, Levine M D. Registering multiview range data to create 3d computer graphics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 820-824
- [10] Li Q, Griffiths J G. Iterative closest geometric objects registration [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2000: 1171-1188
- [11] Alexa M, Behr J, Cohen-OR D, et al. Point set surfaces[C] // Proceeding of IEEE Visualization. 2001:21-28
- [12] 胡国飞. 三维数字表面去噪光顺技术研究[D]. 浙江:浙江大学,2005
- [13] Fleishman S, Cohen - OR D, Silva C T. Robust moving least-squares fitting with sharp features[J]. ACM Trans. Graph., 2005, 24(3): 544-552
- [14] 缪永伟. 点模型的几何处理和形状编辑[D]. 浙江:浙江大学,2007
- [15] Schall O, Belyaev A, Seidel H. Feature-preserving Non-local Denoising of Static and Time-varying Range Data[C] // 2007 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. 2007
- [16] Carr J C, Beatson R K, Cherrie J B. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions[C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2001:67-76
- [17] Ahn S J, Yoo J, Lee B G, et al. 3D surface reconstruction from

- scattered data using moving least square method[C]// Proceedings of ICIAP. 2005;719-726
- [18] Wang J, Oliveira M M. Filling holes on locally smooth surfaces reconstructed from point clouds[J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(1):103-113
- [19] Sharf A, Alexa M, Cohen-Or D. Context-based surface completion[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2004, 23(3):878-887
- [20] Park S, Guo X, Shin H, et al. Shape and appearance repair for incomplete point surfaces[C]// Proceedings of International Conference on Computer Vision. 2005;1260-1267
- [21] Xiao C, Zheng W, Miao Y, et al. A unified method for appearance and geometry completion of point set surfaces[J]. *The Visual Computer*, 2007, 23(6):433-443
- [22] Kazhdan M, Bolitho M, Hoppe H. Poisson surface reconstruction[C]// Eurographics Symposium on Geometry Processing. 2006;61-70
- [23] Pauly M, Gross M, Kobbelt L P. Efficient simplification of point-sampled surfaces [C] // Proceedings of IEEE Visualization. 2002;163-170
- [24] Wu J, Kobbelt L. Optimized sub-sampling of point sets for surface splatting[J]. *Computer Graphics Forum*, 2004, 23(3):643-652
- [25] Zwicker M, Pauly M, Knoll O, et al. Pointshop 3D: An interactive system for point-based surface editing[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2002;322-329
- [26] Adams B. Point - based Modeling , Animation and Rendering of Dynamic Objects[D]. KATHOLIEKE University, 2006
- [27] Clarenz U, Rumpf M, Telea A. Finite Elements on Point Based Surfaces[C]// Eurographics Symposium on Point-based Graphics. 2004;45-49
- [28] 肖春霞, 赵勇, 郑文庭, 等. 三维离散点采样表面基于全局化的纹理合成算法[J]. *计算机学报*, 2006, 29(12):2061-2070
- [29] Pauly M, Keiser R, Kobbelt L, et al. Shape modeling with point-sampled geometry[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2003, 22(3):641-650
- [30] Ohtake Y, Belyaev A, Alexa M, et al. Multi-level Partition of Unity Implicits[J]// Proceedings of Siggraph. 2003;463-470
- [31] Adams B, Dutre P. Interactive boolean operations on surfel - bounded solids[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):651-656
- [32] Adams B , Dutre P . Interactive boolean operations on surfel - bounded solids[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):651-656
- [33] Pauly M, Keiser R, Kobbelt L, et al. Shape modeling with point-sampled geometry[J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2003, 22(3):641-650
- [34] Guo X, Hua J, Qin H. Point set surface editing techniques based on level-sets [C] // Proc. Computer Graphics International. 2004;52-59
- [35] Botsch M, Kobbelt L. Real-time Shape Editing Using Radial Basis Functions[C]// Proceedings of Eurographics. 2005;611-621
- [36] Muller M , Keiser R, Nealen A, et al. Point based animation of elastic, plastic and melting objects[C]// Proceedings of the 2004 ACM Siggraph/Eurographics Symposium on Computer Animation. 2004;141-151
- [37] Wicke M, Steinemann D, Gross M. Efficient Animation of Point-sampled Thin Shells[C]// Proceedings of Eurographics. 2005
- [38] Keiser R, Adams B, Gasser D, et al. A unified Lagrangian approach to solid-fluid animation[C]// Eurographics/IEEE VGTC Symposium Proceedings. 2005;125-148
- [39] Pauly M, Keiser R, Adams B, et al. Meshless animation of fracturing solids[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2005, 24(3):957-964
- [40] Xiao H, Guo X, Li Y F, et al. Meshless Thin-shell Simulation Based on Global Conformal Parameterization[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, 12(3):375-385
- [41] Adams B, Dutre P. Boolean Operations on Surfel-bounded Solids Using Programmable Graphics Hardware[C]// Eurographics Symposium on Point-Based Graphics. 2004;19-24
- [42] Pauly M, Paik D K, Guibas L J. Quasi-rigid Objects in Contact [C]// Eurographics Symposium on Computer Animation. 2004;109-119
- [43] Adams B, Ovsjanikov M, Wand M, et al. Meshless Modeling of Deformable Shapes and Their Motion[C]// Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. 2008
- [44] Bao Y F, Guo X H, Qin H. Physically based morphing of point-sampled surfaces[J]. *Compute. Animat. Virtual Worlds*, 2005, 16(3):509-518
- [45] Cmolik L, Uller M. Point Cloud Morphing[C]// Proceedings of the 7th Central European Seminar on Computer Graphics. 2003;97-105
- [46] Xiao C, Zheng W, Peng C. Robust morphing of point-sampled geometry[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2004, 15;201-210
- [47] Floater M S, Reimers M. Meshless parameterization for surface reconstruction[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2001, 18(2):77-92
- [48] 王仁芳. 点模型数字几何处理若干技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2007
- [49] 田海山. 基于点元的几何造型与绘制[D]. 上海: 上海交通大学, 2007
- [50] Rusinkiewicz S, Levoy M. Qsplat: A multiresolution point rendering system for large meshes[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2000;343-352
- [51] Rusinkiewicz S, Levoy M. Streaming qsplat: A viewer for networked visualization of large, dense models[C]// Proceedings of ACM Symp. 2001;63-68
- [52] Dachsbacher C, Vogelsgang C, Stamminger M. Sequential point trees[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):657-662
- [53] Pfister H, Zwicker M, Van Baar J, et al. Surfels: Surface elements as rendering primitives[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2000;335-342
- [54] Zwicker M, Pfister H, Van Baar J, et al. Surface splatting[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH. 2001;371-378
- [55] Botsch M, Kobbelt L. High-quality point-based rendering on modern GPUs[C]// Proceedings of Pacific Graphics. 2003
- [56] 张龙, 董朝, 陈为, 等. 大规模点模型的实时高质量绘制[J]. *计算机学报*, 2005, 28(2):241-249
- [57] 胡国飞, 彭群生. PBDGP: 一个点模型的数字几何处理平台[C]// Proceedings of Chinagraph. 2004
- [58] 徐鑫. 一个易扩展的基于点的造型和绘制系统平台[D]. 浙江: 浙江大学, 2006