2019-2020学年春季学期

《计算机图形学》08306027

课程论文

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 学 号 | 18120255 | 学 院 | 计算机工程与科学学院 | | | |
| 姓 名 | 姚施越 | 专 业 | 智能科学与技术 | | | |
| 论文题目 | 三维点云的表面重建中的关键技术研究 | | | | | |
| 教师评语 | | | | | 成绩 |  |
|  | | | | | | |
|  | | | | 教师签名 | | |
|  | | | | 批阅日期 2020年 7 月 8 日 | | |

三维点云的表面重建中的关键技术研究

姚施越

(18120255，计算机工程与科学学院)

摘 要 如何获取并重绘物体真实的三维模型始终是计算机图形学领域的重要研究方向，三维表面重建技术的出现满足了这一需求，该技术广泛应用于计算机图形学、计算机动画、地理信息测绘、逆向工程以及虚拟现实等领域。本文对三维点云的表面重建中的相关技术作研究，首先对于研究背景与意义作阐述；其次，简要介绍该领域国内外研究现状；接下来，详细阐释显式重建中的经典算法：基于Delaunay三角剖分的Power Crust算法；随后，分析比较主流表面重建算法的优劣；最后，对本文内容作系统总结。在文末，归纳本人在研究过程中的心得与体会。

关键词 点云数据；表面重建；显式重建；Power Crust算法

Research on Key Technology in Surface Reconstruction of 3D Point Cloud

YAO Shiyue

(18120255, School of Computer Engineering and Science)

**Abstract** How to obtain and redraw real 3D models of objects is always an important research direction in the field of computer graphics. The emergence of 3D surface reconstruction technology meets this demand. This technology is widely used in computer graphics, computer animation, geographic information mapping, and reverse engineering. And the field of virtual reality. In this paper, the relevant technologies in the surface reconstruction of three-dimensional point clouds are studied. First, the research background and significance are explained. Secondly, the current research status in this field at home and abroad is briefly introduced. Next, the classic algorithm in explicit reconstruction is explained in detail: based on Delaunay Triangulation Power Crust algorithm; then, analyze and compare the advantages and disadvantages of mainstream surface reconstruction algorithms; finally, make a systematic summary of the content of this article. At the end of the article, I summarize my experience and experience in the research process.

**Key words** point cloud data; surface reconstruction; explicit reconstruction; Power Crust algorithm

1 研究背景与意义

1.1 研究背景

随着计算机图形学、计算机视觉、测量学、机器人学、光学、虚拟现实等领域的不断发展，以及地理信息测绘、逆向工程、影视动漫、医疗辅助诊断、工业检测等行业对物体模型应用需求的增加，三维重建作为其核心技术之一，越来越受到人们的重视[1]。

三维重建指的是将现实物体表面在计算机中重现其三维虚拟模型，由三维扫描设备获取的就是三维点云数据，它是同一空间参考系下表达物体空间分布和表面特性的三维点集合，由于其不需任何拓扑结构以及简单的数据结构易存储和传输的优势，得到了诸多领域的广泛应用[2]。

1.2 研究意义

如今三维信息获取设备的普及和扫描技术的快速发展，获取物体表面的三维点云数据已经不构成困难。然而，扫描获取的三维点云数据存在以下问题：（1）数据量巨大（2）存在数据冗余和噪声（3）数据排列不规则（4）尖锐特征的丢失[3]。因此针对三维点云数据的处理技术是必要的，目前相关研究主要集中于数据获取、数据预处理（包括去噪光顺、特征检测、简化）、表面重建等方面[4]。真实物体三维重建过程如图1所示。

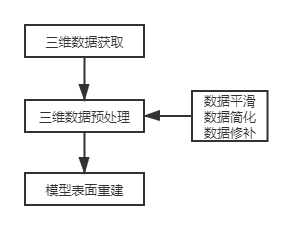


图1 真实物体三维重建过程

1.3 三维数据获取及数据预处理

目前，点云数据的获取主要是通过三维扫描设备例如三维激光扫描仪，主要使用面扫描测量模式[5]，这属于光学测量，其特点是测量迅速，数据量大[6]，本文讨论的数据便属于此类。

上文中，我们也提到了目前三维点云数据存在的问题，因此预处理是必要的，常见的预处理包括数据平滑和数据简化等。下面对其相关技术作简述。

1.3.1 数据平滑

由于测量手段和测量技术的限制，在获取的点云数据中难免会含有噪声。针对存在的噪声，目前主流的去噪方法包括偏微分方程法，信号处理法[7]，邻域滤波法。

1.3.2 数据简化

针对数据冗余的问题，对于有序点数据，可采用倍率抽样、均匀抽样以及弦偏差等简化算法。

1.3.3 数据修补

数据修复则可以利用残缺数据处周围的点信息如法向量、曲率等，可采用NURBS曲面重构[8]和三角插补等进行修复。

2 国内外研究现状

考虑到学术期刊是各类科研项目成果发表的主要形式，本文以中国知网数据库收录的文献为依据，对三维点云的表面重建中的关键技术研究研究现状进行梳理。截至2020年6月27日，在中国知网以“三维点云”和“重建”作为关键词以主题进行跨库精确检索，共得到研究文献1495篇。相关研究内容主要集中于以下几方面。

表面重建方法通常分为显式重建法和隐式重建法。显式方法直接给出表面的精确位置，而隐式重建法将曲面表示为求得的标量函数的等值点集。

2.1 显式重建

常用的显式重建方法有参数曲面和三角化表面。

典型的参数曲面重建方法有NURBS曲面重构[8]，这个方法上文也提到可以用作数据修补。此方法重建得到的曲面效果较好，但其必要的步骤是将数据参数化，对于排列不规则、含噪声的点云集十分困难。

另一种是三角化表面，通过Voronoi图和Delaunay三角剖分得到三角化的表面，得到的表面是Delaunay三角剖分产生的三角面片的子集。1995年，AMENTA对于Delaunay三角剖分算法和Voronoi图的求取作了详尽的研究[9]。1998年，AMENTA提出了改进后的Power Crust算法，利用中心轴变化方法，以Voronoi得到物体近似中心轴，然后通过标记算法得到重建表面[10]。2005年，顾耀林对采样集合进行降采样，提出了一种新的三维散乱点曲面重建算法[11]。该算法的最大特点是在绘制时间相对较少的情况下，绘制结果保持了足够多的几何特征细节，最终曲面的效果较细致。

2.2 隐式重建

隐式曲面重建算法同样有着广泛的应用。HOPPE在1992年率先提出利用点集在矩形栅格上定义有符号距离场函数，随后以距离场函数的零水平集作为待求解的隐式表面[12]。TURK和O’BRIEN于1998年将径向基函数应用到离散点集插值问题中，这是具有开拓意义的[13]。后续有许多学者针对如何降低该算法的时间复杂度上做改进。WENDLAND[14]利用局部作用的径向基函数使线性系统转化为稀疏系统。CARR[15]提出了快速多极法，并结合贪婪算法对点云数据进行压缩，实现了大规模点云数据的表面重建，然而需要在每个径向基函数上进行远场扩展，实现起来非常复杂。

国内也有不少学者关于点云数据表面重建作了相关研究，黄淼[16]、李道伦[17]等将神经网络引入到了表面重建问题中，从神经网络的权值系数得到曲面控制网格，用权值约束来连接分割的曲面片。吕芳梅[18]和刘含波[19]等采用了单元分解原理，首先对点云数据进行分割和特征提取，通过光滑拼接局部求解模型得到全局接，并应用该方法实现了大规模点云数据的表面重建。夏海明提出根据点云模型表面几何复杂程度及密度自适应地选取中心点的重建算法[6]。

3 基于Delaunay三角剖分的Power Crust算法

3.1 引言

本小节将介绍基于Delaunay三角剖分的Power Crust算法，其属于显式重建，是一种非常经典的算法。上文中提到，该算法由AMENTA于1998年提出[10]。其核心思想如下：首先由点集的Voronoi图近似出物体的中心轴，然后进行反向变换得到表面。该算法具有很强的理论保证，对输入点集无特殊要求，同时避免了以前同类算法的多边形化、孔洞填补以及后期处理等操作。

3.2 基本概念

3.2.1 中心轴变换

设为三维物体的边界轮廓，其所有的边界限制在区域，将分为内部和外部两部分。令表示球心为半径为的球。当内部不含的点时，称是空的。空球中最大者称为中心球，即它不被任何空球包含。中心球的中心可能与有超过一个交点，也可能是的曲率中心与只有一个交点。

定义**1.** 的中心球的集合称为的中心轴变换，中心球的中心点集称为的中心轴。

3.2.2 Delaunay三角剖分和Voronoi图

Delaunay 三角剖分的概念建立在Voronoi图的基础之上。Voronoi图又称为Dirichlet图或泰森多边形图，它由连接最近两点连线的中垂线构成的连续多边形构成。平面上的相异点，与最近邻区域原关联，按最近邻原则分割平面，构成了点集的Voronoi区域。下面给出Voronoi图的定义：

定义**2.** 设是维空间的有限点集，且没有重合点，即位置向量，，式(1)定义的区域：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

称为点的Voronoi区域，并且：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

式(2)称为点集的Voronoi图。Voronoi区域的相交部分构成了点集Voronoi图，Voronoi包围盒的的边与连接点集的Delaunay边成对偶关系，如图2所示。图中虚线即为Voronoi包围盒，实线连接成的三角形即为点集的Delaunay三角剖分。下面给出Delaunay三角剖分中Delaunay边和Delaunay三角形概念。



图2 Voronoi图和Delaunay三角形[20]

定义**3.** 设是维空间的有限点集，为上的子集，两点和之间的连线称为Delaunay边， 当且仅当存在位置，其与和距离相等，并比其它任何点距离和更短。位置为维球的中心，球通过点和且不包含点集中的其它点。

定义**4.** 设是维空间的有限点集，为上的子集，三个非共线点，和构成Delaunay三角形， 当且仅当存在位置，其与，和距离相等，并比其它任何点距离，和更短。位置为维球的中心，球通过点，和且不包含点集中的其它点。当时，仅存在一个圆，即三角形的外接圆。

3.2.3 Power图

算法的思想是用Voronoi图的有限球集来近似中心轴。令中心为半径为的球的权值为。定义非权值点到的Power距离为，见式(3)：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

说明：式中函数为欧式距离即我们最常用的两点间距离公式。当点位于球内部时，为负，当点位于球外部时，为正。接下来，定义加权 Voronoi 图即Power图。Power图将分割为一系列单元，每个单元包含与特定输入点Power距离最小的点。

3.3 算法定义

算法涉及的几个定义如下：

（1）极点：采样点的极点为其Voronoi单元在内部和外部的顶点。记为的极点集合。

（2）Power Crust：内部极点和外部极点的Power图单元的边界。

（3）Power Shape：连接极点所形成的对中心轴逼近的单纯形。

3.4 算法步骤

该算法的思路为利用加权的Voronoi图近似中心轴变换，然后使用中心轴进行表面提取。下面介绍其主要步骤。

算法1. 基于Delaunay三角剖分的Power Crust算法

（1）计算采样点集的Voronoi图；

（2）计算每个采样点的极点；

（3）计算极点的Power图；

（4）划分极点位于内部还是外部；

（5）输出划分内外部极点的 Power图边，即Power Crust；

（6）连接内部极点输出三角形。

3.5 算法分析

该算法对输入点集无要求，任意输入点集都可得到流型多边形表面。算法鲁棒性强，省去了其他算法的预处理、多边形化、孔洞填补和后期处理等步骤。算法复杂度主要集中在Voronoi图的求取，即依赖于复杂度高的三维Delaunay三角化。总的时间复杂度大约为。

4算法比较

上文中详细阐述了显式重建的典型方法，基于Delaunay三角剖分的Power Crust算法，基于计算几何，理论性较强，同时Delaunay三角化的过程也是其复杂度较高的原因。顾耀林对采样集合进行降采样，提出了一种新的三维散乱点曲面重建算法[11]，对于算法本身改进的研究较少。

随着CPU处理速度的飞速提升，大容量的内存的实现，以及计算方法的改进，使复杂的曲面模型和操作成为可能，这些都极大地促进了隐式曲面的研究进展[6]。HOPPE在1992年率先提出利用点集在矩形栅格上定义有符号距离场函数，随后以距离场函数的零水平集作为待求解的隐式表面[12]。该算法思路简单，但缺点是需要点云数据密集且均匀，对有尖锐棱角处的重建结果不理想。

径向基函数在离散数据插值方面应用广泛，只需数据点满足很弱的条件即可保证得到的线性系统矩阵是可逆的，其不需要数据点分布在矩形栅格点上。目前的研究主要集中在对径向基函数改进、计算方法改进、和数据点处理几个方面。该算法具有图形质量优、修复残缺数据、对不均匀数据及含噪声数据适应能力强等优点。

5结论

随着三维信息获取设备的普及和扫描技术的快速发展，三维点云数据的表面重建的相关研究自上世纪90年代起大量涌现，近年来，传感器、通信和定位技术的发展，人工智能、深度学习、虚拟现实等领域先进技术的重要进展有力推进了这一技术在各领域的应用[21]。国内外学者取得了大量研究成果，我也进行了归纳总结。三维点云表面重建的方法可分为显式重建和隐式重建两类。本文结合图例、公式对其中的基于Delaunay三角剖分的Power Crust算法做详细阐述，并且将几种主流算法作复杂度分析及优劣比较。

6体会

19-20学年春季学期的《计算机图形学》课程随着这篇论文的撰写完毕结束了。回顾这十周的课程学习及论文研究，我对于计算机图形学的认识加深了不少，关于常用的算法也能够较为熟练的掌握。对此，我有几点感触，将在下文中展开叙述。

首先，关于如何撰写报告。在这次的报告撰写过程中，一开始要做的便是阅读他人的文献，知网平台搭建完善、文献齐全，提供了很好的学习条件。我也通过检索来选取本领域的文献，之后进行研习。当然，这其中不乏外文文献，我也通过查询专业词汇的释义以及此前的积累，尽可能地去理解其文意。对于撰写报告（包括今后的论文），我积累了一些经验，要尽可能做到言之有物，结合一些图表和公式，完整清晰地展示自己所做的工作，并表明自己分析问题的思路和方法。

其次，关于如何学习计算机图形学。对于我们计算机学院的本科生来说，掌握学习方法是相当重要的。对于我所从事的项目，必定会有类似的其他项目，这时候他人的经验就显得很有参考价值了。通过论坛，书籍，博客等方式，收集到他人对于其实现方式的分享，对于自己如何考虑也能够有更好的认识，更能快速上手。在开展小组实验过程中，对于不懂的问题不耻下问，再加以自己的思考，能够更快地获得答案。以上两点也正是我的做法，很好地帮到了我。

最后，对于计算机图形学的认识更深。这种考核方式对于我来说是不小的挑战，但也是这一周多的时间，我通过文献研读对于计算机图形学尤其是三维点云相关的技术有了一些浅显的认识，能够有自己的看法。图形学相关的知识对于数学尤其是几何的要求较高，这也是我所感兴趣的，在研究并改进各种算法的过程中，充斥着大量的思考和推导，需要时间和知识的积累。今后，我也将持续关注该领域的相关技术，或许会在未来的研究生生涯中以此方向作深入研究。

另外，由于时间所迫和本人的能力有限，在这份报告中，对于一些算法没有加以实践，也可能会有不少纰漏和不严密的地方，敬请张老师批评指正。虽然这次对于某些知识的运用和衔接还不够熟练，但是我将在今后的学习中继续努力、不断完善。

致 谢 感谢张老师一学期的辛勤付出，让我对于图形学有了更深的认识。同时，也感谢老师在本文撰写过程中给予的宝贵建议。

参 考 文 献

[1] 香玫元. 基于影像匹配点云的三维表面重建研究[D].兰州交通大学,2015.

[2] 谷晓英. 三维重建中点云数据处理关键技术研究[D].燕山大学,2015.

[3] 孙钰科. 三维激光点云数据的处理及应用研究[D].上海师范大学,2018.

[4] 王丽辉. 三维点云数据处理的技术研究[D].北京交通大学,2011.

[5] 刘建维.三维激光扫描点云数据处理技术与应用研究[J].信息与电脑(理论版),2020,32(02):20-22.

[6] 夏海明. 点云数据三维表面重建方法的研究[D].哈尔滨理工大学,2010.

[7] Clarenz U, Droske D, Henn S. Computational Methods for Nonlinear Image Registration[C]//Mathematical Models for Registration and Applications to Medical Imaging Mathematics in industry, 2006, 10: 81-101.

[8] 来新民,黄田,曾子平,林忠钦.基于NURBS的散乱数据点自由曲面重构[J].计算机辅助设计与图形学学报,1999(05):433-436.

[9] AMENTA N, BERN M, EPPSTEIN D．The Crust and the β-skeleton: Combinatorial Curve Reconstruction[J]．Graphical Models and Image Processing, 1998, 66(2): 125-135．

[10] AMENTA N, BERN M, KAMVYSSELIS M．A New Voronoi-based Surface Reconstruction Algorithm[C]．SIGGRAPH．Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York USA, 1998: 415-421．

[11] 顾耀林,倪彤光.三维空间散乱点集快速曲面重建的研究与实现[J].计算机应用,2005(04):783-785.

[12] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T．Surface Reconstruction from Unorganized Points[C]．ACM．SIGGRAPH’92, New York USA, 1992: 71-78．

[13] TURK G, OBRIEN J F．Variational Implicit Surfaces[R]．GIT-GVU-99-15: Georgia Institute of Technology, 1998．

[14] WENDLAND H．Piecewise Polynomial, Positive Definite and Compactly Supported Radial Functions of Minimal Degree[J]．Advances in Computational

[15] CARR J C, BEATSON R K, CHERRIE J B etal．Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions[C]．ACM．SIGGRAPH 2001, Los Angeles, 2001: 67-76．

[16] 黄淼，张海朝，普杰信等．基于RBF神经网络的点云数据曲面重建快速算法[J]．计算机应用，2008，28(2)：469-472．

[17] 李道伦，卢德唐，孔祥言等．径向基函数网络的隐式曲面方法[J]．计算机辅助设计与图形学学报，2006，18(8)：1142-1148．

[18] 吕方梅，习俊通，马登哲．基于径向基函数和自适应单元分解的大规模散乱点云快速重构[J]．机械科学与技术，2007，26(10)：1300-1303．

[19] 刘含波，王昕，强文义．RBF 隐式曲面的离散数据快速重建[J]．光学精密工程，2008，16(2)：338-344．

[20] Voronoi图与Delaunay三角剖分,csdn,[EB/OL],https://blog.csdn.net/makenothing/article/details/41515827

[21] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚.三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J].测绘学报,2017,46(10):1509-1516.