

CIDE 2008

计算机辅助设计与数字娱乐进展

第五届智能CAD与数字娱乐 学术会议论文集

© 魏小鹏 庄越挺 张 强 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

第五届智能 CAD 与数字娱乐学术会议论文集

魏小鹏 庄越挺 张 强 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

由中国图像图形学学会计算机动画与数字娱乐专业委员会、中国人工智能学会智能 CAD 与数字艺术专业委员会及中国工程图学学会国际联络工作委员会联合主办, 大连大学承办的第五届智能 CAD 与数字娱乐学术会议, 于 2008 年 7 月 21~23 日在大连举行。本书收集优秀论文摘要及全文共 56 篇, 内容涉及数字几何处理、数字游戏与系统、人脸处理、绘制技术、非真实感动画与绘制、交互技术、图像/视频处理、虚拟现实与增强现实、自然现象仿真、建模与仿真等众多领域, 在不同程度上触及智能化数字娱乐发展的前沿, 反映了中国学者在智能化数字娱乐领域的最新研究成果。

本次会议得到国家自然科学基金(50575026)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0298)及辽宁省高校优秀人才支持计划(RC-05-07)资助。

本书对从事 CAD、数字娱乐研究、开发及应用的人员有较高的参考价值。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

第五届智能 CAD 与数字娱乐学术会议论文集 / 魏小鹏, 庄越挺, 张强主编.

—北京: 电子工业出版社, 2008.7

ISBN 978-7-121-07086-0

I. 第… II. ①魏…②庄…③张… III. 游戏—计算机辅助设计—学术会议—文集
IV. TP391.72-53 G899-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 103685 号

责任编辑: 董亚峰

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16.75 字数: 428 千字

印 次: 2008 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888

第五届智能 CAD 与数字娱乐学术会议

CIDE 2008

主 办：中国图像图形学学会计算机动画与数字娱乐专业委员会
中国人工智能学会智能 CAD 与数字艺术专业委员会
中国工程图学学会国际联络工作委员会

承 办：大连大学

第五届智能 CAD 与数字娱乐学术会议

CIDE 2008

名誉主席: 潘云鹤 中国工程院副院长

会议主席: 魏小鹏 大连大学

庄越挺 浙江大学

程序委员会主席: 庄越挺 浙江大学

胡事民 清华大学

李 华 中国科学院

程序委员会副主席: 张 强 大连大学

程序委员会委员: Jun Wang Zhen Liu 刘 克 董 军 费广正

冯结青 高志强 耿卫东 胡事民 黄继武 黄铁军

黄心渊 李 华 李 青 李翠华 廖祥忠 刘 弘

刘利刚 马利庄 孟祥旭 潘春洪 潘志庚 彭群生

沈向洋 沈华清 沈一帆 史元春 孙晓鹏 孙正兴

谭建荣 谈 正 童若锋 屠长河 汪嘉业 王文成

王小松 王阳生 王兆其 魏小鹏 魏迎梅 吴 飞

吴玲达 吴中海 徐 波 杨 青 杨承磊 于金辉

于俊清 俞建新 余 轮 曾 亮 曾立人 查 立

詹永照 张彩明 张 方 张 健 张 强 赵杰煜

赵乃良 周激流 庄越挺 邹北骖 刘晓冰 滕弘飞

组织委员会主席: 张 强

组织委员会秘书组

秘 书 长: 杨承磊 孙晓鹏 吴 飞

组织委员会委员: 董 婧 周东生 周昌军 肖伯祥 赵腊生 方小勇

刘 瑞 白春光

序 言

智能化数字娱乐技术是多学科相结合的产物，它是伴随着计算机硬件和图形学高速发展起来的一门高新技术。它综合利用了计算机科学、艺术、数学、物理学和其他相关学科的知识，为人们提供了一个充分展示想象力和艺术才能的新天地，得到了人们的广泛关注。近年来，智能化数字娱乐技术逐渐融入到了人们的日常生活之中。从数字化影片中，人们看到了用计算机图形技术生成的精彩无比的画面和令人震撼的特技效果；在交互式的数字游戏中，人们体验到了数字技术生成的身临其境的影音效果和高度沉浸式的娱乐享受。此外，智能化数字娱乐技术在产业上还存在巨大的发展潜力。任天堂公司的 Wii，微软公司的 XBOX360 已经在商业上取得了巨大的经济效益。显然，在现代社会中，智能化数字娱乐技术在人们的生产生活中具有重要的影响力，已经引起了各国政府的高度重视。

中外的计算机科学家、艺术家、影视创作者报以空前的热情，进行着更高起点和更高目标下的计算机艺术创造活动，软件、数字娱乐业界人士在为计算机创造的艺术成果而欣喜的同时，也更积极地研究开发相应的新的技术和新的产品。

数字娱乐是一个巨大的应用领域，但目前还只是处在初级阶段，有一系列重要的问题需要研究。从技术上来讲，它涉及到计算机图形学、人工智能、多媒体、人机交互、网络协同、智能动画等。由数字娱乐软件的应用中产生的需求，也促进了对上述领域研究的深入。这是一块肥沃的学术与产业可耕之地。

为了进一步促进我国在智能 CAD、计算机动画、数字娱乐及数字艺术等领域的研究与应用，由中国图像图形学学会计算机动画与数字娱乐专业委员会、中国人工智能学会智能 CAD 与数字艺术专业委员会、以及中国工程图学学会国际联络工作委员会联合主办，大连大学承办的第五届智能 CAD 与数字娱乐学术会议，将于 2008 年 7 月 21~23 日在美丽的海滨城市大连举行。会议将为智能 CAD、数字娱乐及相关领域的学者提供一个交流最新研究成果、进行广泛学术讨论的平台。希望这次会议抛砖引玉，引起更多学者和业界人士的兴趣，最终促进中国数字娱乐产业的跨越式大发展。

本次会议共选择收录代表性论文 56 篇，这些论文在很大程度上反映了我国在智能 CAD、计算机动画、数字娱乐及数字艺术等领域的最新研究成果和发展趋势。论文内容包括智能 CAD、人机交互、人工智能、数字艺术、计算机图形学、交互

玩具、计算机动画、信息融合、运动捕捉动画、虚拟现实、数字内容管理、数字博物馆、网络游戏、多媒体技术、E-Home、可视化技术、计算机视觉、人脸表情跟踪与识别、模式识别等理论研究和实际应用成果。

7 月的大连，碧海青天，气候宜人。愿各位代表在大连大学度过愉快的学术时光。预祝这次会议取得圆满成功！

大会主席：魏小鹏 庄越挺 2008 年 7 月 21 日

目 录

基于信息熵的多决策因子动态信任量化模型	李小勇 桂小林 (1)
快速构造点云模型上二叉树的研究	杜培林 冯志全 (3)
集群渲染中的异构模型转换方法的研究	范明明 徐延宁 张俊青 杨承磊 (10)
京剧脸谱分析与合成	蔡飞龙 于金辉 彭韧 (18)
面向网格环境的遥感图像并行 PCA 融合 算法研究及其在 ChinaGrid 中的应用	周海芳 唐 宇 曾 亮 胡 冰 杨学军 (20)
三维物体表面材质实时编辑	李 勇 徐 昆 胡事民 (28)
基于 Lloyd relaxation 的物体表面网格化	田 宽 马利庄 Marc Alexa (30)
一种基于傅立叶描述子的书法碑刻 文字轮廓平滑方法	张显俊 杨志军 董 军 (32)
基于小波分析的三维地形数据简化	周 侃 魏迎梅 宋汉辰 吴玲达 (38)
一个用于非自治人群仿真的交互式人群编辑系统	李红松 李 靖 陈少柯 张智鹏 丁刚毅 (44)
面向动画创作的三维人脸表情动画生成方法研究	周志刚 孙正兴 (54)
台风场景的视景仿真	刘传林 王长波 董 冰 谢步瀛 (56)
基于 Direct3D 的雨雪自然现象仿真	王德才 孙玉萍 唐业军 (63)
平缓变化的 RGB 三原色遍历算法	王 超 (70)

一种点云模型 3D 轮廓线的快速提取算法	朱飞雪 屠长河 吕海燕 (75)
利用图形处理单元进行高级绘制的研究	刘 静 桑胜举 周青云 (82)
动画自动生成系统中的运动规划	王 妍 冯 佳 刘椿年 (91)
基于运动捕获的三维角色动画生成系统	黄 河 邱显杰 王兆其 (100)
基于模板的行走动画定制	蔡 霞 屠长河 (108)
A Novel Automatic Motion Capture Data Recognition Method based on Statistics Learning and Subspace	Jian Xiang Hongli Zhu (116)
一种面向海量三维人体运动数据库的索引方法	向 坚 朱红丽 (117)
An Index Method based on Large-Scale 3D Human Motion Database	Xiang Jian Zhu Hongli (117)
An Interactive Motion Editing Method for Figure Human Animation	Song Mofei Zhang Yaoye Sun Zhengxing (126)
AR 模型在运动捕捉散乱数据处理中的应用	肖伯祥 周东生 吴 升 (128)
巴东旧县坪遗址虚拟展示系统的设计及应用	梁俊娟 谈国新 李 冬 (135)
面向博物馆教育的 RPG 游戏的设计与实现	柴大鹏 杨承磊 (143)
虚拟博物馆协同设计平台的研究和实现	王大涛 杨承磊 (157)
一种基于贝叶斯的音乐分类方法	宋 冬 武港山 吉 亮 (167)
基于可编程图形处理器的实时并行细分	张景峤 季卓尔 (174)
The Method of Stereo Matching in UAV Low Altitude Remote Sensing	Wang Conghua Guo Xiaochun Sang Shengju (184)
基于反向传播神经网络的车型识别系统	高金锋 胡 寅 (190)

基于随机半监督采样学习的图像分类识别算法	韩东峰 李文辉 (197)
Efficient Reconstruction from Architectural Drawings	Li Ting Shu Bo Qiu Xianjie Wang Zhaoqi (200)
An Emotion Generation Model Based On Random Graphs	Wan Chaogang Zhao Jieyu Zhang Yuanyuan (201)
Local Resampling for patch-based Texture Synthesis in Vector Fields	Chen Renjie Liu Ligang Dong Guangchang (203)
Dynamic Clothing Collision Resolution Using PSO	Li Wenhui Wang Yi Yi Rongqing Ge Zihou (204)
Improve Matching Results for Structure from Motion Problems	Duan Chunmei Meng Xiangxu Yang Chenglei (206)
A Multi-scale Triangular Mapping and Its Applications in Image Scrambling	Shao Liping Qin Zheng Gao Hongjiang Liu Bo Li Huan Qin Jun (208)
A Novel Texture Classification Approach for CBIR	Sang Shengju Liu Mingxia Liu Jing (210)
Calibration and Segmentation free 3D Modeling from images based on GPU	Shu Bo Qiu Xianjie Wang Zhaoqi (219)
Synthesis of Cartoon Fire based on Hand-drawn Samples	Yu Jinhui Peng Ren Chen Haiying (221)
A Script Engine for Realistic Human Motion Generation	Jun Xiao Guo Tongqiang (222)
Reactive and Protective Character Motion	Pan Zhigeng Cheng Xi Tang Bing (224)
A New Method of Stylistic Human Motion Editing Based on Independent Feature Subspace Analysis	Liu Gengdai Pan Zhigeng Li Yang Lin Zuoyan (226)
Combining Location and Feature Information for Multimedia Retrieval	Pan Hong Yang Yi (228)
Q-Cartoon: A Fast Cartoon Generation System	Luan Xidao Xie Yuxiang Wu Lingda Wu JiaXu Deng Liqiong (230)
A TIN-based Simplification and Real-time Rendering Algorithm for Large-scale Terrain	Kang Lai Xu Jiangbin Yang Chao Yang Bing Wu Lingda (232)

Real-time Digitized Shadow Play Performance Method Based on Multi-point Interactive Controlling Method	Yao Cheng Guo Tongqiang (234)
Content-Based Organization, Analysis and Retrieval of Soccer Video	Yu Junqing He Yunfeng Sun Kai Han Lansheng (235)
Facial Expression Recognition Based on HMM and Mixture HMM Combined by KNN	Ch. J. Wen Y. Zh. Zhan (238)
Proximity Queries Using Separating Bounding Volumes	Wang Yi Li Wenhui Yi Rongqing (239)
Contour Recovery of Tablet Calligraphy Characters Based on Imagery Thinking	Zhang Xianjun Dong Jun (241)
A Two-stage Multimodal Speaker Location-aware Approach in Pervasive Computing	Xiao Ruogui Guo Tongqiang (243)
Extraction and Analysis for Speech Emotion Features Based on Multi-fractal Spectrum	Mao Qirong Wang Xiaojia Zhan Yongzhao (244)
Pose Varied Face Recognition Based on Multi-subspace PCA	Wei Yuning Wang Jijun Wei Xiaopeng Hao Bo (246)
ASaaS: an approved Architecture for SaaS Service Composition	Jiao Yuchang Liu Shijun Meng Xiangxu YangChenglei (254)
Watermark based Digital Fake Image Detection	Sun Wei Lu Wei Liu Tong (256)

基于信息熵的多决策因子动态信任量化模型*

李小勇⁺ 桂小林

(西安交通大学 电子与信息工程学院 陕西 西安 710049)

摘 要 提出了一个新的基于信息熵的多决策因子动态信任量化模型：(1) 综合考虑了影响信任关系的多种可能要素，引入直接信任、风险函数、反馈信任、激励函数和实体活跃度等多个决策因子从多个角度推理和评估信任关系的复杂性和不确定性，可以用来解决传统量化模型对环境的动态变化适应能力不足的问题；(2) 在多决策因子的融合计算过程中，通过信息熵理论确立各决策因子的分类权重，克服了过去常用的确定权重的主观判断方法，并可以改善传统方法由于主观分配分类权重而导致的模型自适应性不强的问题。模拟实验表明，与已有同类模型相比，该模型具有更稳健的动态适应性，在模型的安全性方面也有明显的优势摘要内容。

关键词 动态信任模型；信息熵；信息融合；决策因子

中图法分类号 TP311 **文献标识码** A

随着以互联网为基础平台的、各种大规模的分布式应用(如网格计算、Web Services、P2P 计算、Ad hoc 和普适计算等)的深入研究，系统表现为由多个软件服务(实体)组成的动态协作模型，在这种动态的和不确定的环境中，针对软件实体行为的不确定性、动态性和协同性，特别是数据与控制同时动态变化的新特征，开展实体之间可信关系的研究，确保互联网软件的可靠运行、资源的安全共享和可信利用，具有重要的现实意义。信任关系的合理量化不但是“动态信任管理”理论的基础性工作和必须首先解决的核心科学问题，也是可信网络、可信软件等新型可信计算领域的关键研究课题。因此，系统而深入的开展动态信任关系量化机理的研究，具有广阔的应用前景。

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60273085 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China 863 under Grant No.2002AA104310, No. 2008AA01Z410 (国家高技术发展研究计划 863); the Program for New Century Excellent Talents in University of China under Grant No.NCET-05-0829 (教育部新世纪优秀人才支持计划); Scientific and Technological Project in Shaanxi Province under Grant No.2007K04-05 (陕西省科技攻关项目)。

作者简介：李小勇，男，1975 年生，博士，讲师，主要研究领域为动态信任管理理论。桂小林，男，1966 年生，博士，教授，博士生导师，CCF 高级会员，主要研究领域为网络计算，动态信任管理理论。

目前的学者们研究了多种分布式应用中的动态信任关系,并使用不同的数学方法和数学工具,建立了信任关系模型。虽然这些工作都有各自积极的贡献,但也有本身存在的问题:首先,模型主要关注点是建立信任随时间的变化函数,而对影响信任量化的决策因子(Decision Factor: DF)考虑不全面,大部分模型计算总体信任度时只考虑直接信任与反馈信任的简单的加权平均,而对一些重要的环境上下文考虑不够,特别是影响这些上下文的细节考虑不全面,例如:大多文献没有考虑风险因素、激励因素和节点稳定性程度等因素。由于不注重信任值的环境上下文意义,模型不能很好的刻画信任关系的复杂性和不确定性。其次,上述模型在分配直接信任与反馈信任权重时,主要采用专家意见法或者平均权值法等主观的判断方法,影响了可信决策的科学性。

在前期工作的基础上,本文提出了一个多 DF 的动态信任关系量化模型,引入直接信任、信任风险函数、反馈信任、激励函数和实体活跃度等多个 DF 从多个角度刻画信任关系的复杂性和不确定性,对信任关系进行建模时,强调综合考察影响信任的多种 DF,针对信任关系的多个属性进行有侧重点的更精细的建模。并通过信息熵理论确立各 DF 的分类权重,克服了过去常用的确定权重的主观判断方法,从而使该模型具有更好的科学性和更高的实际应用价值。最后,通过模拟实验对本文模型进行了分析,与其他典型模型相比:本文模型具有更稳健的动态适应性,在模型的安全性方面也有显著改善。

快速构造点云模型上二叉树的研究*

杜培林¹⁺ 冯志全²

¹ (济南大学 管理学院 山东省 济南市 250022)

² (济南大学 信息科学与工程学院 山东省 济南市 250022)

摘 要 提出了一种在大规模点云模型上建立二叉树的快速算法, 该算法直接从采样点集上进行运算, 首先将点云数据沿着 xyz 三坐标轴的采样点求得包围盒, 始终沿当前包围盒的最长轴方向, 采用数据驱动的办法对采样点集进行空间二次剖分; 然后采用自顶向下地顺序递归构建点云模型上的二叉树, 此时, 初步建立的树每个结点对应点云数据上的一个子集, 每个树叶结点与模型上一个采样点相对应; 最后通过树的后序遍历算法生成树内部结点所需的几何等属性信息。该算法时间复杂度为 $O(N\log_2 N)$, N 为点云模型的采样点数目。

关键词 二叉树; 点云; 多分辨率表示

中图法分类号 Tp391 文献标识码 A

A rapid Algorithm of Building binary-tree for Point Clouds

Du Peilin¹⁺ Feng Zhiquan²

¹ (School of management, University of Jinan, Jinan 250022, China)

² (School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

+ Corresponding author: E-mail: sm_dupl@ujn.edu.cn

Abstract This paper presents techniques for the efficient generation of a binary tree data structure directly on large scale point-based surface. Our approach generates a spatial partitioning hierarchy of irregular point samples in 3D space, and we provide an efficient

* 本文得到国家自然科学基金(60773109)、山东省自然科学基金(Y2007G39)、山东省教育厅科技计划项目(J07YJ18)、山东省重点学科基金项目以及济南大学博士科研启动基金(XBS0705)的资助。

作者简介: 杜培林(1980—), 男, 山东烟台人, 硕士, 助教, 主要研究领域为几何计算、图像处理、CAGD; 冯志全(1964—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究领域为图像处理、人手运动三维跟踪、人机交互、虚拟现实。

binary tree generation algorithm. After getting the bounding box of point cloud data, the bounding box is then bisected at the midpoint of its longest axis, so the point cloud is subdivided among the two sub-boxes, and the partitioning procedure continues with the two sub-clouds. During the partitioning, a binary tree is constructed in $O(N\log_2 N)$ time. At the end the inner nodes are built by post-order traversal.

Key words binary-tree; Point Cloud; multiresolution hierarchy

1 引言

三维点云模型精确且简单的计算机表示在科学、工程和医学等许多研究领域都有非常重要的应用,成为 CAD/CG 最常用的三维物体表示模型之一。因此对点云模型的处理是近年来研究的热点。如研究针对点云数据的曲面重建、分割、布尔操作、点云简化等。随着 3D 扫描技术的发展,在实践中有着超过几百万规模的采样点的点云模型生成^[1],随着所获取点云数据规模的不断增长,网格化操作变得越来越困难。如何在大规模点云模型上快速建立基于采样点的二叉树,作为点云模型处理的基础之一,一直是计算机图形学、立体造型等领域的一个重要基础课题。

二叉树的构造在计算机图形学、计算几何、计算机视觉等领域有着广泛的应用。早期的算法^[2,3]已有很多,但由于时间或空间复杂性问题不可直接运用于大规模的点云模型中。因此近年来在三维数据的处理中,人们更多地考虑直接建立基于点云数据的多分辨率数据结构^[1,4-9],该结构大多是以树的形式分层组织,树中一般在每个结点都包含球心位置和半径,法矢和法锥面的宽度,以及颜色(可选)等结点属性信息,与在点云模型上所建立的四叉树^[5,6]或八叉树^[9]相比,二叉树虽然具有树高较大、内部结点较多和树存储量较大等问题,但其空间二分操作简单,并且能够完整地反映点云数据的各级分辨率变化,本文主要讨论点云模型上二叉树的快速建立。

在树的建立过程中,存在自底向上和自顶向下两种构造算法,如果首先构建孩子结点,然后利用孩子结点信息向上生成其父结点的建树顺序为自底向上方法^[5-7];与之相反,首先构建父结点,然后利用父结点信息生成其孩子结点的建树顺序为自顶向下方法^[8]。

Gobbetti 等提出一种新的二叉树多分辨率数据结构(Layered Point Clouds)^[7],该二叉树中每个结点都包含坐标位置和法矢,以及颜色(可选)等结点属性信息,该算法是采用自底向上的办法构造二叉树。与其他算法的一个显著区别是,其树叶结点是预先计算的点云集,而不是单个的采样点。

孟放通过空间二叉树建立了点云模型的多分辨率数据结构^[8],该方法完全采用自

顶向下的办法构建二叉树，在空间二分过程中，通过平面法去局部拟合每次剖分得到的点云数据子集。最终树中每个结点的存储信息包含：该类的包围盒，类内采样点数，拟合元素的空间位置，法向量，大小，拟合误差等。其中叶子结点存储的则为初始输入点云中采样点的信息。

本文采用自顶向下的顺序构造二叉树，同样该二叉树中每个结点都包含坐标位置和法矢，以及颜色（可选）等结点属性信息，算法基本思想是在将点云模型进行单元剖分后，首先自顶向下建立了初始二叉树，其叶子结点存储的则为初始输入点云中采样点的信息，然后通过二叉树的后序遍历算法由树叶结点开始，自底向上快速实现树内部结点属性的计算，最终实现一棵完整的二叉树。

2 二叉树的数据结构

通过对输入点云模型的空间剖分，我们自顶向下构建了二叉树结构，利用树结点来存储所需获取的信息：二叉树上的树根结点与整个点云数据集对应，内部结点对应剖分操作中得到的采样点子集，叶子节点存储的则为初始输入点云模型中实际采样点的坐标与法向信息；如下列代码所示，我们通过 `begin` 与 `end` 记录与当前树结点对应的点云模型上实际采样点集合，通过数组 `pos` 和向量 `norm` 保存与当前树结点对应的空间坐标位置与法向量，通过 `child` 指针指示当前结点的孩子结点，树结点二叉链表存储表示代码如下：

```
struct Tree_Node {
    vec pos;                //坐标值
    vec norm;               //法向量值
    int begin,end;          //记录采样点子集在叶结点数组中的下标边界
    Tree_Node * child[2]    //子树指针
    // color col; float normcone;float r; //可继续添加颜色等其他属性信息
};
```

需要指出，对于 `pos` 和 `norm`，树叶结点中保存与当前结点对应的点云模型实际采样点的空间坐标位置与法向量，而树的内部结点中则保存当前结点的所有非空孩子结点坐标平均值和法向量的平均值。

3 算法及关键实现技术

我们假设点云模型上采样点集 $S = \{s_1, \dots, s_N\}$ ， N 为模型上所有采样点的数目。从 S

开始, 算法首先求得当前点云数据的最小长方体包围盒, 该盒子表面始终与空间坐标轴三个方向垂直, 用当前对应树结点 c 中的 $begin=1, end=N$ 即可记录位于该盒子中的所有 S , 始终沿着包围盒的最长轴对当前顶点集进行剖分, 分离出来二个盒子中的采样点集 $S_i = \{s_j, \dots, s_k\}, i=1,2$, 分别建立与 S_i 对应的当前树结点 c 的 2 个子树结点 $child[i]$, 并用子树结点各自的 $begin$ 和 end 记录对应的 j 和 k , 对上面得到的每个子集 S_i 的递归地进行上面的自顶向下计算过程则初步建立了剩下的树。其次, 我们假设树叶结点中保存的点云数据的属性 p (如: 空间坐标位置、法矢和可选颜色等) 已知, 此时, 还需要进一步计算在树内部非叶节点上的每个顶点的属性 p , 实现中 p 被设置成这些属性在子树中的平均值, 这可以通过树的后序递归遍历算法很容易地实现量化非叶子节点的属性, 上面两个步骤我们最终求得一颗完整的二叉树。

3.1 点云模型的自顶向下剖分

为了实现在 $O(1)$ 时间内找到与树结点相对应的采样点集, 一般需要在树结点中保存当前剖分过程中的新采样点子集中所有点的索引, 由于点云数据是一个大规模的无序散乱点, 每次存储一个新子集中所有点的索引的办法同样导致树的数据量相当大。本文在实现每次剖分时, 采用类似于“快速排序”的方法对点云数据做排序, 剖分结束后, 我们得到一个按照剖分的次序排序的点云数据序列, 这样我们在树结点中只需要保存每次剖分过程在该序列中对应点集的边界, 则可实现把当前包围盒子中所有采样点保存在树结点中。本文采用的点云数据的网格剖分 *partition* 过程如下。

1) 对点云数据集 P , 首先建立表面与 x,y,z 三个坐标轴的方向垂直长方体包围盒 B , 容易得到当前盒子 B 的最长轴 $MaxAxis$ 方向 ($MaxAxis$ 为 x,y,z 三坐标轴方向之一) 的中点值 $AveVal$ 。

2) 沿着当前包围盒 B 最长轴方向进行了一次剖分, 得到两个子包围盒 B_1 和 B_2 。具体剖分是以中点值 $AveVal$ 作为基准, 将当前 P 中所有采样点的 $MaxAxis$ 轴的坐标值作为关键码与 $AveVal$ 比较, 将 P 划分成两个子集 P_1 和 P_2 : 关键码小于等于 $AveVal$ 的所有采样点均子集 P_1 记录到 B_1 , 关键码大于 $AveVal$ 的所有采样点子集 P_2 都记录到 B_2 。

3) 分别对上面 2) 得到的两个子包围盒 B_1 和 B_2 中的点云数据子集 P_1 和 P_2 重复施行上述沿着包围盒最长轴方向空间二分的方法, 直到达到给定的剖分精度为止。

在具体实现中我们将 P 剖分直到每个树叶结点对应点云模型上一个采样点为止。

3.2 二叉树数据结构的自顶向下构建

本文主要采用自顶向下的办法构造二叉树, 递归实现过程如下。

1) 如果点云数据集 P 非空, 且小于等于预定的剖分精度 (实现中剖分精度为单个