

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 3
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年3月 第17卷 第3期(总第191期)

目次

图像处理和编码

- 摄影测量共线方程的单位四元数描述 杨化超,卢晓攀,王永波,姚国标(301)
- 分形压缩感知高维信号重构方法 刘佶鑫,孙权森(309)
- 自适应子矢量划分的快速码字搜索算法 吴鑫鹏,潘志斌,李达(315)
- 基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波方法 宋建军,侯志强,余旺盛(321)
- 整数提升小波多相矩阵分解系数的快速提取算法 王锋,赵志文,牟盛(329)
- 自适应样本块大小的图像修复方法 孟春芝,何凯,焦青兰(337)

图像分析和识别

- 改进FCM在交互式图像分割中的应用 依玉峰,高立群,郭丽(342)
- 输电导线图像目标识别方法 孙凤杰,杨镇浓,李媛媛,范杰清(349)
- 无表观特征小目标检测与跟踪 陶霖密,李亮,邸慧军(357)
- 应用改进频率调谐的海上小目标检测方法 任蕾,施朝健,冉鑫(365)
- 视觉注意原理局部特征的行人检测 刘俊涛,刘文予,吴彩华,李雄伟,冯镔(370)
- 尺度不变单样本人脸识别方法 王炜强,张晓阳,曹春芹,付奎生(380)
- 复杂交通场景中采用稀疏表示的车辆识别方法 李修志,吴健,崔志明,陈建明(387)
- 利用复合导数的边缘检测新算法 程金梅,叶永强,姜斌(393)

图像理解和计算机视觉

迭代分割逼近:新的基于局部响应显著度的角点检测 马丽红,谭幸均(402)

融合 SIFT 特征的熵图估计医学图像非刚性配准 张少敏,支力佳,赵大哲,林树宽,赵宏(412)

计算机图形学

面向非均匀采样点集的 3 维表面重建算法 刘晓平,段瑞青,余烨(419)

基于可编程图形管线的大规模流程工厂模型多分辨率绘制方法 周剑,唐卫清,朱耀琴,夏明,黄晓剑(426)

带有位置修正的环境映射 王晨昊,汤晓安,孙即祥,马伯宁(435)

遥感图像处理

海岸线遥感信息提取的元胞自动机方法及其应用 冯永玖,韩震(441)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 3 期

2012 年 3 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa. ac. cn

电话:010-68407995 010-82614429

网 址:www. cjig. cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa. ac. cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 3 March 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Unit quaternion based description of collinearity equations Yang Huachao, Lu Xiaopan, Wang Yongbo, Yao Guobiao(301)
- Fractal compressive sensing for high-dimension signal recovery Liu Jixin, Sun Quansen(309)
- Fast codeword search algorithm based on adaptive subvector partitions Wu Xinpeng, Pan Zhibin, Li Da(315)
- Anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual model Song Jianjun, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng(321)
- Fast extraction algorithm of the polyphase matrix decomposition coefficient based integer lifting wavelet
..... Wang Feng, Zhao Zhiwen, Mou Sheng(329)
- Image completion method with adaptive patch size Meng Chunzhi, He Kai, Jiao Qinglan(337)

Image Analysis and Recognition

- Application of improved FCM for interactive image segmentation Yi Yufeng, Gao Liqun, Guo Li(342)
- Methods of transmission line target recognition Sun Fengjie, Yang Zhenhuan, Li Yuanyuan, Fan Jieqing(349)
- Featureless small object detection and tracking Tao Linmi, Li Liang, Di Huijun(357)
- Small target detection method under sea surface environment using revised frequency tuned saliency detection
..... Ren Lei, Shi Chaojian, Ran Xin(365)
- Pedestrian detection method using local feature based on vision attention
..... Liu Juntao, Liu Wenyu, Wu Caihua, Li Xiongwei, Feng Bin(370)
- Scale invariant face recognition from single sample Wang Weiqiang, Zhang Xiaoyang, Cao Chunqin, Fu Kuisheng(380)
- Sparse representation method of vehicle recognition in complex traffic scenes
..... Li Xiuzhi, Wu Jian, Cui Zhiming, Chen Jianming(387)
- Novel edge detection algorithm using a composite derivative Cheng Jinmei, Ye Yongqiang, Jiang Bin(393)

Image Understanding and Computer Vision

- Iterative segment approaching: new corner detection based on local response saliency Ma Lihong, Tan Xingjun(402)
- Entropic graph estimation integrated with SIFT features for medical image non-rigid registration
..... Zhang Shaomin, Zhi Lijia, Zhao Dazhe, Lin Shukuan, Zhao Hong(412)

Computer Graphics

- Three-dimensional surface reconstruction algorithm for non-uniform sampling points Liu Xiaoping, Duan Ruiqing, Yu Ye(419)
- Multi-resolution rendering approach of large-scale process plant models based on programmable graphics pipeline
..... Zhou Jian, Tang Weiqing, Zhu Yaoqin, Xia Ming, Huang Xiaojian(426)
- Environment mapping with position rectification Wang Chenhao, Tang Xiao'an, Sun Jixiang, Ma Boning(435)

Remote Sensing Image Processing

- Cellular automata approach to extract shoreline from remote sensing imageries and its application
..... Feng Yongjiu, Han Zhen(441)

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)03-0419-07

论文引用格式: 刘晓平, 段瑞青, 余焯. 面向非均匀采样点集的3维表面重建算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 419-425

面向非均匀采样点集的3维表面重建算法

刘晓平, 段瑞青, 余焯

合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009

摘要: 针对非均匀采样点集, 提出一种改进的3维表面重建方法。该方法将整个点集进行空间划分, 缩小近邻点的搜索范围, 减少搜索时间; 在确定近邻点时, 先计算几何近邻点, 然后通过求方向性点并构造最小生成树的方法, 确定拓扑近邻点; 最后通过将拓扑近邻点投影到局部切平面上, 利用约束条件对投影点进行三角剖分, 并将剖分得到的顶点连接关系映射到3维空间中, 实现3维表面重建。实验结果表明, 改进后的算法运行效率高、重建效果好、广泛适用于非均匀采样点集的表面重建。

关键词: 非均匀采样点集; 表面重建; 方向性点; 拓扑近邻点; 三角网格化

Three-dimensional surface reconstruction algorithm for non-uniform sampling points

Liu Xiaoping, Duan Ruiqing, Yu Ye

School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: An improved 3D surface reconstruction method is proposed for non-uniform sampling points. The method performs spatial partitioning for an entire set of points, in order to reduce the search range of neighbor points and decrease the search time. For searching topological neighbor points, geometric neighbor points are calculated, and Minimum Spanning Trees are constructed by finding directional points. After projecting topological neighbor points onto local tangent planes, constrained triangulation is carried out for the projected points. Then the connection of projected points is mapped directly back onto 3D space. As a result, the 3D surface is reconstructed successfully. The experimental results show that the improved algorithm is efficient, has good reconstruction effects, and can widely be used for surface reconstruction of non-uniform sampling points.

Key words: non-uniform sampling points; surface reconstruction; directional point; topological neighbor point; triangulation

0 引言

3维表面重建在计算机造型、反向工程、计算机视觉、虚拟现实、医学图像重建等应用领域有着广泛的应用前景。Hoppe等人^[1]把3维表面重建问题抽象为: 给定一个未知表面的3维采样点集,

重建出3维物体的近似表面。采样数据的获取途径有很多种, 主要有3维数字扫描仪、医学图像、雷达和超声波定位仪以及数学曲面模拟, 等。根据采样数据获取方式的不同, 可以将3维表面重建划分为如下3种类型^[1]: 1) 基于深度扫描数据的表面重建; 2) 基于切片数据的表面重建; 3) 基于采样点集的表面重建。前两种方法要求采样数据

收稿日期: 2011-05-30; 修回日期: 2011-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61070124); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010HGZY0001); 安徽省自然科学基金项目(11040606Q43)

第一作者简介: 刘晓平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建模、仿真与协同计算等。E-mail: lxp@vcc.hfut.edu.cn

具有部分或全部的结构信息才能有效地重建出 3 维表面,这对大部分应用场合来说要求很高。不考虑采样数据的结构信息时,深度扫描数据和切片数据都可以转化为采样点集。均匀采样点集包含几何和拓扑信息,可以得到较好的表面重建效果及较高的表面重建效率,但在实际应用中,由于设备的低端、人为操作的失误、待重建物体的特殊性等原因,采样点集一般是非均匀的。因此,研究基于非均匀采样点集的 3 维表面重建方法具有重要的意义。

基于非均匀采样点集的 3 维表面重建方法一般分为两个步骤:确定近邻点和三角网格化。其中近邻点确定是基本问题,在近邻点数目(记为 k)通常是用户指定的情况下,能否确定正确的近邻点将决定三角网格化的稳定性和正确性,而三角网格化方法的好坏决定 3 维重建表面的效果。Bajaj 等人^[2]首先用 3 维 α -shape 建立结构的拓扑关系,再建立多面体逼近模型,但是 3 维 α -shape 的计算复杂性高,且很难选择 α 值。Oblonsek 和 Guid^[3]在三角网格化时要求采样点集必须满足 3 个条件,限制了算法的适用范围。Gopi 等人^[4-5]提出了以边界顶点作为种子的表面生长算法,王青等人^[6]也提出了类似的算法,三角网格划分时以划分速度为追求目标,在划分效果上有所忽略,因而采用的划分方法比较简单,适用于海量数据的表面重建。周儒荣等人^[7]对文献[1]的三角网格面重建算法进行改进,改善了重建效果,但算法效率还有待进一步提高。梁荣华等人^[8]通过改进的 Marching Cubes 算法来输出表面的三角面片,但适用范围有限。王永波等人^[9]基于 Delaunay 规则进行约束三角剖分,对采样数据有严格要求,且不能有效识别采样空洞。上述文献中,均假定几何近邻点就是拓扑近邻点。这些方法对于均匀采样点集可以保证近邻点的正确性,从而重建出良好的表面。但是对于非均匀采样点集,因为几何近邻点不一定是拓扑近邻点,而且也不可能完全包含拓扑近邻点,因此这些算法的应用场合受到了很大的限制。严京旗等人^[10]曾提出过基于全局性和补偿的近邻点确定方法,减少了非拓扑近邻点的干扰,提高了求取近邻点的正确性。但是针对非均匀采样点集,该方法仍存在局限性,不易获得正确的拓扑近邻点(为了方便表示,以下所说的近邻点均指拓扑近邻点。)

鉴于上述问题,本文在文献[10]的基础上,提出了一种改进的面向非均匀采样点集的 3 维表面重建方法,该方法通过求方向性点并构造最小生成树的方法,确定拓扑近邻点,然后采用基于约束的三角网格化方法来实现表面的重建。即使处理对象是非均匀采样点集,基于方向性的近邻点确定方法仍可以获得正确的近邻点,进而获得高质量的重建表面。

1 算法的提出

已知待重建表面的采样点集,求近邻点的一般方法是以几何距离作为近邻性的度量。选取的近邻点数目小,求得的近邻点不充分;选取的近邻点数目大,在重建表面有孔洞、形状特殊(如扁形)等情况下,会引入非拓扑近邻点的干扰。根据这两种情况估计的切平面是不正确的,更无法重建出正确的表面。为解决此问题,文献[10]提出了基于全局性和补偿的近邻点确定方法,并取得了不错的效果。该方法每次的处理对象均是整个点集,当点集规模比较大时,造成时间复杂度很大,且当处理对象是非均匀采样点集时,由于方法本身的缺陷也无法总是得到正确的近邻点。如图 1 的点集,采用文献[10]的算法生成的最小生成树如图 2 所示,其他点到 V_0 的近邻度^[10]如表 1 所示,得到顶点 V_0 的 k 邻域 $\text{NearP}(V_0, 10) = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{12}\}$,此时近邻域中包含了拓扑上距离较远的点如 V_8, V_9 ,却没有包含拓扑上距离较近的点如 V_{10}, V_{11} 。增加 k 值可以得到充分的近邻点,但是会导致非拓扑近邻点的干扰,也会增加算法的时间复杂度。为此,本文在文献[10]的基础上提出了基于方向性的近邻点确定方法。不管采样点集是否均匀,它都能保证得到正确的近邻点。

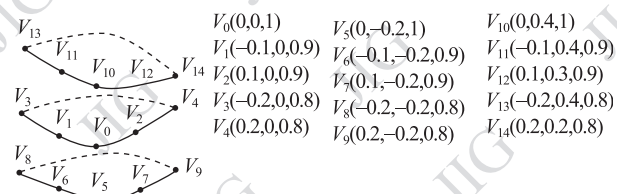


图 1 一组采样非均匀点集

Fig. 1 A set of non-uniform sampling points

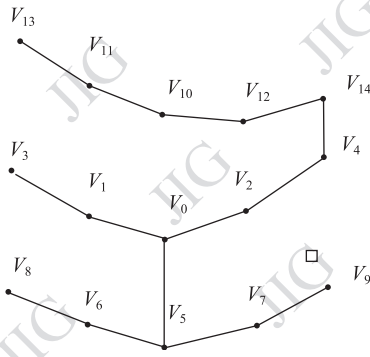


图2 文献[10]算法构造的最小生成树

Fig. 2 Minimum spanning tree constructed by paper [10]

表1 文献[10]算法计算其他顶点到V0的近邻度

Table 1 Compute neighbor-degree between other points and V0 by reference [10]

点	近邻度	点	近邻度
V1	0.00	V8	0.08
V2	0.00	V9	0.08
V3	0.06	V10	0.12
V4	0.06	V11	0.14
V5	0.00	V12	0.07
V6	0.02	V13	0.20
V7	0.02	V14	0.08

2 算法描述

本文算法首先对数据量大的非均匀采样点集进行空间划分,以缩小近邻点的搜索范围,快速获得用于构造最小生成树的几何近邻点;求取4个方向性点,以确保在构造最小生成树时点集之间的拓扑关系是正确的,使最小生成树的构造在拓扑结构上具有方向性;构造完最小生成树以后,计算顶点的近邻度,确定近邻点;最后利用基于约束的三角网格化算法重建3维表面(算法的流程如图3所示)。

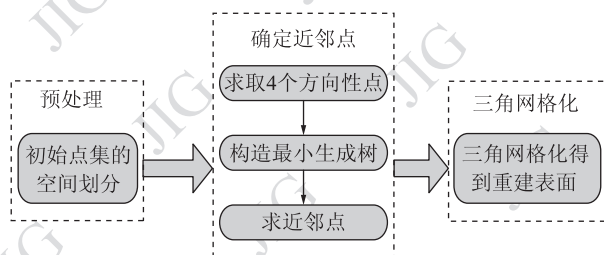


图3 算法流程示意图

Fig. 3 Workflow of our algorithm

2.1 点集的空间划分

本文算法的处理对象通常是数据量很大的非均匀采样点集,如果对于每个顶点都构造整个点集的最小生成树,这一步的时间复杂度就是 $O(N^2)$,可见效率是非常低下的。实际上,在求当前顶点 V_0 的 k 近邻域时,只需要以顶点 V_0 为起点对很小的点集(包含顶点 V_0 和 V_0 的 M 个几何最近点)构造最小生成树。 M 决定将有多少个点参与构造最小生成树。这样构造最小生成树的时间复杂度为 $O(N \times M)$, M 远小于 N ,极大地提高了算法的效率。熊邦书等^[11]提出了一种有效的空间划分方法,但是其搜索过程过于求精,当对数量比较大的点集进行划分时,算法的时间复杂度会很大。为提高算法运行效率,本文对该空间划分方法进行了简化。其思想是:首先计算包含整个点集的最小长方体空间 $[x_{\min}, x_{\max}] [y_{\min}, y_{\max}] [z_{\min}, z_{\max}]$,然后估算作为基本单元的立方体子空间边长 L ,最后把包含整个点集的最小长方体空间划分为 $l_x \times l_y \times l_z$ 个立方体子空间,表示为 $cube[x][y][z], 0 \leq x < l_x, 0 \leq y < l_y, 0 \leq z < l_z$ 。最后,根据点集中每个点的3维坐标值,为每个点找到其所属的立方体子空间。

点集的空间划分完以后,对顶点 V_0 搜索 M 个几何最近点的步骤如下:

- 1)根据顶点 V_0 的3维坐标值,找到其所在的立方体子空间 $cube[x][y][z]$,设置步进长度 $c_x = 0, c_y = 0, c_z = 0$;
- 2)确定子空间 $[x - c_x, x + c_x] [y - c_y, y + c_y] [z - c_z, z + c_z]$ 中包含点的数目 W ;
- 3)如果当前子空间的点数目 W 小于 M ,且 $c_x + +, c_y + +, c_z + +$ 以后得到的子空间点数目 H 大于 M ,进入步骤4)。否则返回步骤2)。
- 4) W 个点都是几何近邻点,全部选择。在 $H - W$ 个点集中根据空间距离大小选择 $M - W$ 个几何最近点。这样就得到了顶点 V_0 的 M 个几何最近点。

2.2 求4个方向性点

如前所述,对于非均匀采样点集,一般的近邻点确定方法无法得到正确的近邻点。为此,本文提出了一种基于方向性的近邻点确定方法,其关键之处在于求4个方向性点,依次记为 $V_{x+}, V_{x-}, V_{y+}, V_{y-}$ 。对于待重建物体表面上的任意一点 V ,它周围点的空间分布关系即拓扑关系理论上讲是千变万化的,但是由于采样点集获取方式的有限性,顶点 V 周围

点的拓扑关系常具有如下特点:顶点 V 和其少量的周围点位于局部的近似平面上;由 V 和其几何最近点确定 X 正轴,根据平面法向量和右手定则确定 Y 正轴,则与 X 正轴、 X 负轴、 Y 正轴和 Y 负轴夹角小且距离近的 4 个点为顶点 V 拓扑上距离最近的 4 个点。如图 4 所示,对于顶点 O ,几何最近点为点 A ,确定 X 轴、 Y 轴,这样它的 4 个拓扑上距离最近的点为 A 、 B 、 C 和 D ,符合上述特点。因此,从当前顶点 V_0 和它的 4 个方向性点出发,能确保在开始构造最小生成树时其拓扑关系是正确的,并使最小生成树的继续构造在拓扑结构上具有方向性,确定的近邻点就是 V_0 拓扑上的近邻点。

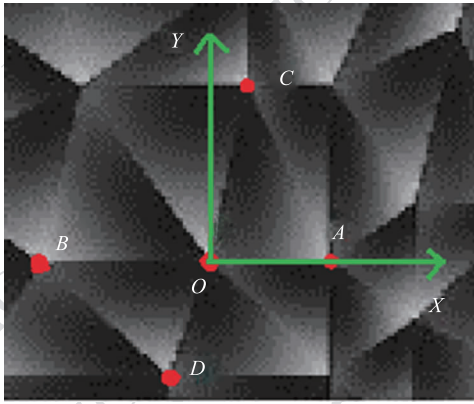


图 4 Rabbit 模型的局部表面

Fig. 4 Local surface of rabbit model

具体步骤如下:

1) 设当前顶点 V_0 和它的 M 个几何最近点构成点集 $V = \{V_0, V_1, V_2, \dots, V_M\}$,通过切平面估计^[1]得到切平面 $P = (O, \mathbf{n})$ 。将点集 V 投影至切平面 $P = (O, \mathbf{n})$ 上,得到投影点集 $V' = \{V'_0, V'_1, V'_2, \dots, V'_M\}$ 。建立 2 维切平面的坐标系,以切平面上点 V'_0 为坐标原点,以向量 $\overrightarrow{V'_0 V'_1}$ 为 X 轴正方向,垂直于 X 轴和法向量 \mathbf{n} 的方向为 Y 轴正方向。此时, $V_{X+} = V_1$ 。

2) 对于其他 $M-1$ 个投影点 V'_2, \dots, V'_M ,可以得到向量组 $\overrightarrow{V'_0 V'_i} (i=2, \dots, M)$ 。对该向量组进行如下操作:找到与 X 轴负方向夹角小于 α 的第一个向量 $\overrightarrow{V'_0 V'_w}$,此时 $V_{X-} = V_w$;找到与 Y 轴正方向夹角小于 α 的第一个向量 $\overrightarrow{V'_0 V'_w}$,此时 $V_{Y+} = V_w$;找到与 Y 轴负方向夹角小于 α 的第一个向量 $\overrightarrow{V'_0 V'_w}$,此时 $V_{Y-} = V_w$ 。

对于图 1 所示的非均匀采样点集,取 $M = 14$,

$\alpha = 30^\circ$ 。投影平面如图 5 所示(“○”代表当前顶点 V_0 的投影点)。4 个方向性点的投影点为灰色的点,求得 4 个方向性点 $V_{X+} = V_1, V_{X-} = V_2, V_{Y+} = V_5, V_{Y-} = V_{10}$ 。

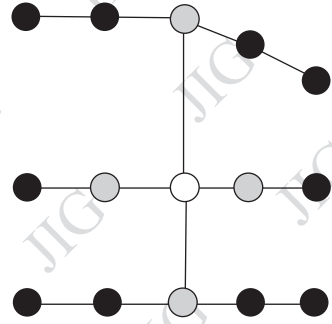


图 5 求 4 个方向性点

Fig. 5 Calculate four directional points

2.3 构造最小生成树

构造最小生成树的算法有很多种,由于在表面重建中每个顶点与其他顶点都有连接的可能性,因此采用适用于构造边稠密最小生成树的 prim 算法。本文的近邻点确定方法是基于方向性的,需要对 prim 算法进行限制,让最小生成树的构造具有方向性。其过程如下:设连通网络 $N = (V, E)$,最小生成树的顶点集合为 U 。

1) 把 $V_0, V_{X+}, V_{X-}, V_{Y+}, V_{Y-}$ 放入 U 。

2) 在所有 $S \in U, T \in V - U$ 的边 $(S, T) \in E$ 中找一条权值最小的边,加入最小生成树。

3) 把步骤 2) 中找到的边的顶点 T 加入 U 集合。如果 V 中所有顶点都已经放入 U 集合,则结束;否则继续执行步骤 2)。

2.4 求 k 个近邻点

最小生成树生成以后,对于当前顶点 V_0 ,需要计算它的 M 个几何最近点到 V_0 的近邻度,取近邻度最小的 k 个顶点作为顶点 V_0 的 k 个近邻点(具体计算方法如文献[10]所示)。

对于图 1 的非均匀采样点集,取 $k = 11, M = 14, \alpha = 30^\circ$,采用本文的算法计算得到 $V_{X+} = V_1, V_{X-} = V_2, V_{Y+} = V_5, V_{Y-} = V_{10}$,构造的最小生成树如图 6 所示,其他点到 V_0 的近邻度如表 2 所示。最终得到 $NearP(V_0, 11) = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_{10}, V_{11}, V_{12}\}$,此时近邻域中的近邻点都是正确的拓扑近点。这也证明了本文算法的有效性。

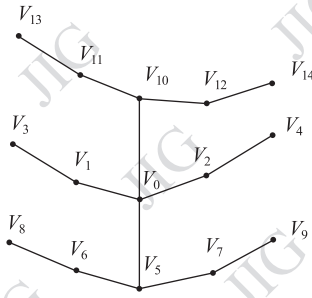


图6 本文算法构造的最小生成树

Fig. 6 Minimum spanning tree constructed by our paper

表2 本文算法计算其他顶点到V0的近邻度

Table 2 Compute neighbor-degree between other points and V0 by our paper

点	近邻度	点	近邻度
V1	0.00	V8	0.06
V2	0.00	V9	0.06
V3	0.00	V10	0.00
V4	0.00	V11	0.00
V5	0.00	V12	0.00
V6	0.00	V13	0.06
V7	0.00	V14	0.09

2.5 三角网格化算法

确定了点集中每个点的 k 个近邻点之后,可以通过多种方法来实现三角网格化。论文借鉴了文献[9]中的三角网格化思想,即通过将近邻点投影到局部切平面上,利用规则条件对投影点进行约束三角剖分,并将剖分得到的顶点连接关系映射到3维空间中,实现表面重建。然而文献[9]中的方法在顶点选择时可见性判断过于复杂,且无法有效识别采样空洞,曲面边界的处理也很简单,因此,本文在其基础上稍作改进,引入了一些约束条件:

- 1) 每条有向边只使用一次,可以避免三角形错位和重复;
- 2) 对于固定的有向边,在组成新三角形时,限制第3个顶点的角度值,角度值不小于 $\pi/3$,可以避免狭长三角形的出现;
- 3) 对于固定的有向边,限制该边所属两个三角形的法向量之间夹角值,可以使表面更平滑,当夹角值过大时,视为突变区域,不必限制;
- 4) 对于固定的有向边,在组成新三角形时,限

制第3个顶点到有向边其中任一个顶点的距离与有向边长度的比值,既可避免狭长三角形的出现,当比值过大时,视为空洞出现(条件3)中的夹角值和条件4)中的比值都是经验值,根据程序多次运行结果的反馈得到,本文夹角值设为 $\pi/4$,比值设为5)。

本文将法向一致化融入三角网格化算法中,具体步骤如下:

1) 得到初始边集 $\{(V_{\text{first}}, V_{\text{end}}), (V_{\text{end}}, V_{\text{first}})\}$ 。一般情况下, V_{first} 是 z 坐标最大的点, V_{end} 是距离 V_{first} 最近的点。初始的切平面法向量为 $nor = (0, 0, 1)$ 。

2) 产生新的三角形:为每条边寻找第3个点以组成三角形。不妨设当前边为 $(V_{\text{beg}}, V_{\text{end}})$, 第3个点为 V_q 。如果当前边是 $(V_{\text{first}}, V_{\text{end}})$, 则 $nor = (0, 0, 1)$ 。对于其他边,则找到该边所在的三角形, nor 等于该三角形记录的切平面的法向量。 V_q 应满足如下条件:

(1) V_q 是 V_{beg} 或 V_{end} 的近邻点即 $V_q \in \text{NearP}(V_{\text{beg}}, k) \cup \text{NearP}(V_{\text{end}}, k)$ 。

(2) 记由 V_{beg} 或 V_{end} 的近邻点确定切平面 $P = (O, n)$ 。若 $n \cdot nor < 0$, 则 $n = -n$, 这样做是为了保持法向量一致。 $V_q, V_{\text{beg}}, V_{\text{end}}$ 在切平面上的投影分别为 $V'_q, V'_{\text{beg}}, V'_{\text{end}}$ 。 V'_k 是 V_{beg} 或 V_{end} 的近邻点, 它在切平面上的投影为 V'_k 。如果 $V'_{\text{beg}}, V'_k, V'_{\text{end}}$ 构成的三角形满足约束条件, 则确定

$$V'_q = \min \left\{ \frac{(V'_{\text{beg}} - V'_k) \cdot (V'_{\text{end}} - V'_k)}{\|V'_{\text{beg}} - V'_k\| \times \|V'_{\text{end}} - V'_k\|} \right\}, \text{ 从}$$

而得到 V_q 。

3) 将边 (V_{beg}, V_q) 和 (V_q, V_{end}) 放入外部轮廓边集合, 使三角形 $V_{\text{beg}} V_q V_{\text{end}}$ 的切平面的法向量等于 n 。如果边集合不为空, 进入返回步骤1); 否则, 结束三角网格化过程。

3 实验结果与分析

本文算法已用 C++ 实现, 并且在 PC 机(主频 2.66 GHz, 内存 1 G) 上对 2 组实例数据(均为非均匀采样点集)进行了验证, 参数设置及其运行时间如表 3 所示, 表面重建结果如图 7 所示。综合表 3 和图 7 可以看出, 本文算法不仅取得了较高的运行效率, 而且还提高了重建表面的质量。



(a) Rabbit模型的点云



(b) Rabbit模型的重建结果



(c) Cat模型的点云



(d) Cat模型的重建结果

图7 两组数据的表面重建结果

Fig. 7 Surface reconstruction results of two data sets

表3 实验结果

Table 3 Experimental results

实例	点数目	K 值	近邻点确定 时间/s	三角网格化 时间/s	三角形 数目
Rabbit	21 648	12	16.988	30.94	43 542
Cat	14 400	12	10.22	20.742	28 800

将本文提出的算法与文献[10]中的算法进行比较,分析如下:

1) 文献[10]算法构造最小生成树的时间复杂度为 $O(N^2)$, 而本文算法构造最小生成树的时间复杂度为 $O(N \times M)$, 其中 N 远大于 M , 大大提高了算法运行效率。

2) 针对均匀程度不同的点集, 文献[10]中近邻点确定方法的处理结果存在着很大差异。对于均匀采样点集, 可以得到正确的近邻点, 而对于非

均匀采样点集无法确保得到正确的近邻点, 因此, 会影响重建表面结果的稳定性。而本文提出的基于方向性的近邻点确定方法, 不管是针对均匀点集还是非均匀点集, 都能获得正确的近邻点。当处理对象是非均匀采样点集时, 图8(a)显示的是用文献[10]的算法重建出来的局部表面, 图8(b)显示的是用本文的算法重建出来的局部表面。由图8可见, 对于非均匀采样点集, 采用同样的三角网格化算法, 用文献[10]的算法重建出来的表面出现了错误排列的三角形, 即图中画圈的地方, 是其近邻点确定方法的原因, 而本文的算法则可以顺利地重建出更符合拓扑结构的表面。对两种算法的重建效率进行对比(如表4所示), 可知本文算法的近邻点确定时间比文献[10]算法的近邻点确定时间更少, 这也验证了本文算法的高效性。

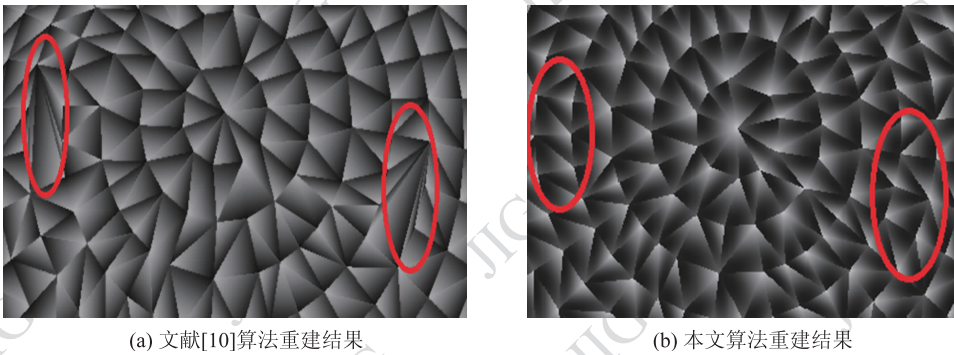


图8 非均匀采样点集下不同算法的局部表面重建结果

Fig. 8 Local surface reconstruction results of different algorithms based on non-uniform sampling points

表4 不同重建算法的效率对比

Table 4 Efficiency comparison of different reconstruction algorithms

算法	点数目	K值	近邻点确定 时间/s	三角网格化 时间/s	三角形 数目
本文	21 648	12	16.988	30.94	43 542
文献[10]	21 648	12	142.865	31.25	43 876

4 结论

拓扑近邻点的确定一直是3维表面重建的难点,本文通过引入方向性点使最小生成树的构造具有方向性。本文提出了一种准确的基于方向性的近邻点确定方法,通过点集的空间划分降低最小生成树的构造复杂度,以方向性点为起点构造最小生成树,并基于近邻度的大小确定近邻点。最后基于约束条件进行三角剖分,实现3维表面重建。实验结果表明,不管采样点集是否均匀,本文算法都可重建出正确的表面,满足运行效率和光顺性的要求。

参考文献 (References)

[1] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized points [J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78.

[2] Bajaj C L, Bernardini F, Xu G. Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D scans [J]. Computer Graphics, 1995, 29(4): 109-118.

[3] Oblonsek C, Guid N. A fast surface-based procedure for object reconstruction from 3D scattered points [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69(2): 185-195.

[4] Gopi M, Krishnan S, Silva C T. Surface reconstruction based on lower dimensional localized Delaunay triangulation [J].

Eurographics, 2000, 19(3): 467-468.

[5] Gopi M, Krishnan Shankar. A fast and efficient projection based approach for surface reconstruction [C]//Proceedings of the XV Symposium on Computer Graphics and Image Processing. Brasilia, Brazil: SIBGRAPI, 2002: 179-186.

[6] Wang Q, Wang R Q, Bao H J, et al. A fast progressive surface reconstruction algorithm for unorganized points [J]. Journal of Software, 2000, 11(9): 1221-1227. [王青,王融清,鲍虎军,等. 散乱数据点的增量快速曲面重建算法[J]. 软件学报, 2000, 11(9): 1221-1227.]

[7] Zhou R R, Zhang L Y, Su X, et al. Algorithmic research on surface reconstruction from dense scattered points [J]. Journal of Software, 2001, 12(2): 249-255. [周儒荣,张丽艳,苏旭,等. 海量散乱点的曲面重建算法研究[J]. 软件学报, 2001, 12(2): 249-255.]

[8] Liang R H, Chen C, Pan Z G, et al. A fast model reconstruction algorithm for 3D unorganized points [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 1(8): 63-67. [梁荣华,陈纯,潘志庚,等. 一种面向3维点集的快速表面重构算法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 1(8): 63-67.]

[9] Wang Y B, Sheng Y H, Lv G N, et al. A delaunay-based surface reconstruction algorithm for unorganized sampling points [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 9(12): 1537-1543. [王永波,盛业华,闫国年,等. 基于Delaunay规则的无组织采样点集表面重建方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 9(12): 1537-1543.]

[10] Yan J Q, Shi P F. A new approach to 3D object surface reconstruction from unorganized points [J]. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(10): 1051-1056. [严京旗,施鹏飞. 基于无组织结构数据集的3维表面重建算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(10): 1051-1056.]

[11] Xiong B S, He M Y, Yu H J. Algorithm for finding k-nearest neighbors of scattered points in three dimensions [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(7): 909-912. [熊邦书,何明一,俞华璟. 3维散乱数据的k个最近邻域快速搜索算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 909-912.]