

基于统计模型的三维场景重建补洞算法*

王华建**，张爱武，马惠敏，李凤亭

(清华大学电子工程系图像图形研究所, 北京 100084)

摘要: 提出了一种新的处理距离图像(即点云数据)算法。算法提取已经获得的表面数据的特性, 计算各个被测的特征值, 建立马尔可夫统计模型, 描述整个表面的数学特征, 进而利用最大似然概率预测丢失位置的数据值, 得到被测物体表面的完整的数据描述。使用该算法恢复由于障碍物和表面不良反射特性产生的空洞, 具有良好的视觉效果, 与测量获得的表面数据具有统一的几何特征。

关键词: 三维城市建模; 距离图像; 点云数据; 遮挡; 几何建模; 虚拟现实

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2004)10-1234-04

Hole Filling in Range Image Processing Based on Statistical Model

WANG Huarjian**, ZHANG Aiwu, MA Huimin, LI Fengting

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A set of data processing algorithms was developed for generating whole point cloud description of building from a piece of range image, obtained by a laser scanner placed on one fixed spot. The range image with some data lost, which is made up of unorganized points, was taken as input, and then a whole set of points to describe the surface was outputted. Markov's statistical model based on the repeated geometry pattern of the surface was created to predict the position of the lost points and fill the hole on the surfaces. The result of this filling hole algorithm has the similar visual effect with the surface data that got from the laser scanner.

Key words: 3D city modeling; range image; point cloud; occlusion; geometry modeling; virtual reality

1 引言

利用反向工程重建三维实体模型是一项应用前景十分广泛的技术。利用它可以对雕像、建筑物、大型场景进行真实的三维重构和渲染, 如可用于虚拟的城市景观展示、城市规划、工业三维测量、文物保护及电子游戏制作等诸多方面, 为在计算机上真实地重建现实环境提供了高效的数据处理方法。

以往, 自动和半自动重建物体三维模型的算法都是利用计算机视觉的思想处理各个视点的图像数据, 如遥感图像和 CCD 图像, 进而重建三维模型, 这类算法涉及从二维数据中恢复三维信息, 比较复杂^[1,2]。近年来, 随着激光扫描测距技术在测量精度和空间解析度方面的进步, 这类设备越来越多地用来获取被测

物体的三维模型表面的空间信息^[3,4]。在此基础上, 一系列新的三维模型重建算法应运而生。

仅仅基于视觉信息的重建算法虽然能够获取物体表面的细节信息, 但是三维模型重建算法复杂, 而且在数据融合中会产生新的误差; 仅利用激光测距扫描设备测量模型表面空间信息的算法虽然简单, 却无法准确获得模型表面的视觉信息。

清华大学在承担“863”课题中, 设计研制了激光测距和 CCD 成像同步扫描的目标三维多模式数据获取系统, 兼收上述两种系统优点, 在直接测量的同时获取被测物体表面的视觉数据。本文是该课题的数据处理部分, 研究建筑物表面空间数据处理, 以消除各种遮挡以及系统误差形成的目标实体数据“空洞”。

收稿日期: 2004-01-16 修订日期: 2004-04-16

* 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2001AA131021)

** E-mail: whj01@mails.tsinghua.edu.cn

2 系统介绍

使用清华大学开发的 TH-3D LCS-2001 三维成像扫描仪对建筑物表面进行测量。设备固定在一处, 依次向各个方向发射测量激光束, 利用建筑物表面对光的漫反射特性, 根据光束发射和接受之间的时间差, 计算得到建筑物表面各个点空间位置的距离数据 (range data)。同时, 配备了与激光测距仪同步的线阵 CCD 成像系统, 对各列测量点进行拍摄, 获取建筑物表面的视觉信息。该设备的原理如图 1 所示。

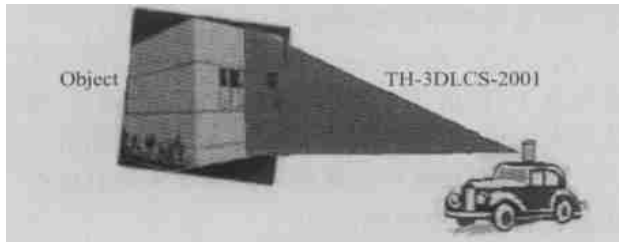


图 1 系统测试原理图

Fig. 1 Scanner system principle

在通常的测量条件下, 选定 1 个测试点不一定能够得到被测物体完整的表面数据, 经常会出现各种形状的数据丢失区域。原因主要有: 1) 测量过程中障碍物和被测物体自身空间拓扑结构产生的遮挡; 2) 被测物体表面不良的反射特性, 如玻璃产生的镜面反射; 3) 激光测距设备自身的缺陷和误差。

不完整的实体几何模型能够描述实体的部分几何特性, 但是为了在计算机上完整地展示现实环境中的建筑物, 这种数据缺失是不可容忍的。需要一套算法去处理这种空洞, 在几何模型的整体和细节拓扑特性的约束下, 重新构建那些无法观测区域的数据。

传统的补洞算法主要有: 1) 使用周围的数据进行线性插值 (interpolation), 特点是比较简单、运算速度快, 缺点是容易丢失表面的细节信息; 2) 使用参数曲面的方法, 特点是考虑了建筑物表面的细节, 缺点是算法复杂, 真实度不确定; 3) 数据采集时对同一表面进行多视点测量, 然后将所有测量数据统一到同一坐标系下进行融合, 优点是能够保证表面数据的完整性, 缺点是数据融合时, 会引入新的误差。

根据测量目标的特性, 本文提出一种新的基于统计模型的算法。只需对实体的某一表面进行 1 次测量, 就可以通过算法处理获得被测目标表面完整的数据描述。其特点: 通过计算, 获取已得到数据中蕴涵的表面特征信息用来补洞, 不像插值算法那样只考虑局部信息的限制, 算法实现比参数表面简单, 易于改

进, 在一定速度的要求下, 保证了补洞的效果。

3 不完整数据三维重建算法

许多大型建筑物表面的几何结构一般具有某种重复特性, 如窗户的几何结构是按照一定的规律重复出现。几何结构的重复性表现在测量数据上就是各个测量点的空间位置周期性地波动。

受计算机图形学中纹理合成算法的启发, 如果使用合理的统计模型描述建筑物表面的周期的重复性, 就能够对那些丢失点的数据进行预测, 使计算的结果符合建筑物宏观拓扑特性和微观细节特性。

在不完整数据三维重建算法中, 通过对激光测距设备获得的大量无序数据点的分析和处理, 提取能够描述建筑物表面特性的特征值, 使用类似纹理合成的方法预测那些丢失的数据点, 得到实体表面完整的数据描述, 进而计算构造被测物体的网格模型。

3.1 数据点的去噪分割 (预处理)

采集系统获得的点云数据包含了建筑物的各个可见表面以及环境中障碍物质空间坐标信息。障碍物的数据是不需要的, 其存在对建模结果影响很大, 所以需要进行预处理。障碍物的面积普遍比较大, 且位置集中, 所以剔除比较容易, 我们是手工完成的。小面积的零星噪声点, 对最终的建模结果影响不大, 这里未做单独处理。剔除障碍物数据后, 建筑物上出现了空洞, 是需要预测的数据点。建筑物的外形一般是简单的几何多面体, 计算这些空间点处的切平面, 根据各自对应的切平面的法向量对其进行分割, 将法向量接近并且在空间位置上相邻的点归成一类, 作为进一步处理的点集单元。切平面法向量的计算在文献[7]中有详细描述。

3.2 数据的重新组织

在分割后, 每个数据点集作为继续处理的基本单元。在同一点集中, 根据其中所有点的位置, 计算得到空间平面 Ω , 它代表了这些点的空间平均位置以及走向, 称之为基准面 Ω , 其点法式记作

$$a \times (x_i - x_0) + b \times (y_i - y_0) + c \times (z_i - z_0) = 0 \quad (1)$$

点 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 为该点集中所有点的平均值 (即空间中心位置), 法向量 (a, b, c) 是使得集合中所有点对应的距离函数 $\text{dist}(p_i)$ 均方误差最小的值。

$$\text{dist}(p_i) = \frac{a \times (x_i - x_0) + b \times (y_i - y_0) + c \times (z_i - z_0)}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

其中的点记做 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 。

然后,将点集中各个空间点分别垂直投影到这个平面上,根据投影位置将所有空间点从左到右,从上到下重新排序,建立类似于二维图像的栅格结构,其中填充的是对应数据点的空间位置。栅格中的各个像素点在这个投影平面上等距离排列,距离的大小根据扫描结果的空间解析度选择。就是说,建立了空间三维点到二维栅格点的一一映射关系,最终得到类似于图像的数据结构,以建立数据点的空间统计模型。

通常不能将这个栅格结构中所有的点全部填充,其中含有一定数量未被填充的空洞,它们没有对应的空间测量点。根据空洞产生的原因,可分2类:1) 障碍物遮挡产生的,称为缺失区域,特点是面积比较大,这类区域中的点记做 P_l ; 2) 由激光测距仪的有限解析度和数据处理中的几何变换误差造成的,称为缺陷区域,特点是面积比较小,这类区域中的点记做 P_e 。

在构造网格时,缺陷区域由于面积小,包含信息有限,所以并不会对最终的网络结果造成很大的影响;而缺失区域面积较大,包含了建筑物表面的信息量大,对最终的三维模型的质量有很大影响。本文算法的主要目标就是填补那些缺失区域。

每一个空洞点对应像素周围邻域 A 内已知点数量的密度为

$$\bar{\rho}(p_i) = \sum_{p_j \in A} f(p_j) / N_A \quad (3)$$

其中, N_A 为邻域内所有像素点总数。如果密度值 $\bar{\rho}(p_i) > \bar{\rho}_c$ ($\bar{\rho}_c$ 为某个设定的阈值,这里使用点 p_i 所在的整个平面单元内的平均密度作为阈值),将其归入缺陷区域;反之,则归入缺失区域。

当点 p_j 含有数据时, $f(p_j) = 1$; 当点 p_j 没有数据时, $f(p_j) = 0$ 。

在密度计算中,使用的是以点 p_i 为中心的周边的 5×5 邻域。

3.3 缺陷点的填充

根据空洞点周围点的数据值,使用双线性插值,计算得到栅格中缺陷点的空间位置。

使用双线性插值的优点在于运算速度比较快,实现简单。虽然插值可能导致部分细节的丢失,但这些空洞面积比较小,对最终的结果影响不大。

3.4 统计模型的建立

填补完缺陷点后,将得到的数据作为样本建立统计模型。显然,建筑物表面符合一定规律的起伏特性体现在测量点的空间位置围绕着某个基准面上下波动。计算每一个测量点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 到基准面的距离记做 $\text{dist}(p_i)$, 将其作为反映平面特性的特征值。

用马尔可夫过程来表示这个模型的统计特性。对于缺失点 p_i , 假设 $\omega(p_i)$ 为栅格结构中点 p_i 的邻域,记 $d(\omega_1, \omega_2)$ 为2块区域 ω_1 和 ω_2 的某种可测距离(这里使用欧氏距离),假设 $\omega(p_i)$ 中除了点 p_i 以外其它点的值都已知。预测丢失点 p_i 的值,需要建立一个条件概率分布函数 $P[p / \omega(p)]$ 作为样本空间。

假设 P_{real} 为没有遮挡情况下的测量点集合数据,实际情况只能得到 P_{real} 数据的子集 P_m , 即丢失了部分测试数据的集合。算法就在这个子集的基础上构造数据点的条件概率分布函数,因此使用

$$p_l = p_i, [p_i \in P_m, d(\omega(p_l), \omega(p_i)) = \min] \quad (4)$$

预测丢失点 P_c 的值。也就是说,在已知缺失点 p_l 邻域的值分布的情况下,在测量的数据集 P_m 的样本空间中,寻找与该邻域欧氏距离最近的那个区域对应点的特征值作为缺失点的特征值。

完成了空间三维点到二维栅格结构的映射,选择缺失点附近 3×3 的矩形窗口作固定的邻域。如图2所示,假设9为缺失点,选取点1到8作为该点的邻域。也就是说,点9的特征值分布概率取决于作为 $\omega(p_i)$ 的点1到点8特征值,这是8阶的马尔可夫过程(MRF, markov random field)。

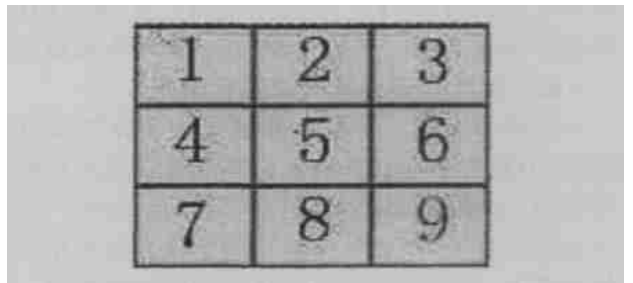


图2 Markov 邻域

Fig. 2 Markov region

3.5 数据点的恢复

根据得到的二维矩阵及缺失点位置特征值(即距离函数值)的含义,将基准面的数值(即中心位置)与特征值相加,得出各个缺失的元素对应的空间点的位置值,完成了补洞。

4 算法实现

在算法实现的各个步骤中,搜索样本空间、寻找最终接近的样本值是整个算法中最耗时的,高维最近欧氏距离计算和搜索在计算机上的效率比较低。为了减少计算时耗,使用 David M. Mount 开发的 ANN 数学库^[8]进行加速,提高了运算效率。实验中,对 $69 \times$

375 的二维矩阵进行预测, 其中缺失点的数量为 7 378 个, 不使用 ANN 加速, 搜索重建的实现是 68.7 s; 使用 ANN 加速后, 搜索重建的时间是 9.2 s。可见搜索效率得到了很大的提高。

根据特征值的含义, 可知特征值是浮点数, 并且集中在以 0 为中心的区间内。为了降低特征值的噪声, 将这个特征值映射到 $[0, 255]$ 区间内, 使预测的最大精度保证在 $1/256$, 即将存储特征值的栅格结构转化为 8 bit 的灰度图像, 然后对缺失点进行预测。

由于仪器获取的数据点密度比较大, 经过处理后, 对这些高密度的数据使用固定的采样频率进行采样, 得到补洞结果。图 3 和图 4 分别是补洞前后的效果图。可见, 由于抽样率不同, 被填补区域的数据相对稀疏, 但是足以表示建筑物表面的几何特性。另外, 由于数据采集的原因, 数据点的密度比较大, 在图片中无法清晰地分辨出每一个点。

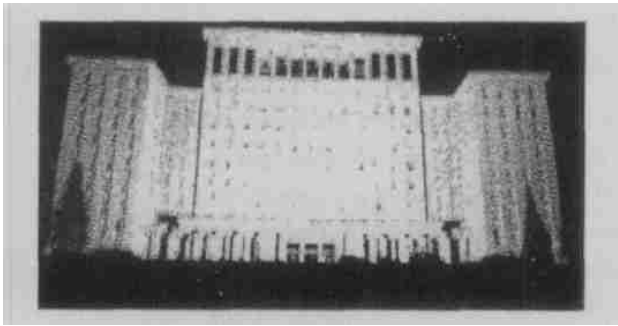


图 3 不完整数据

Fig. 3 Origin data (with data lost)

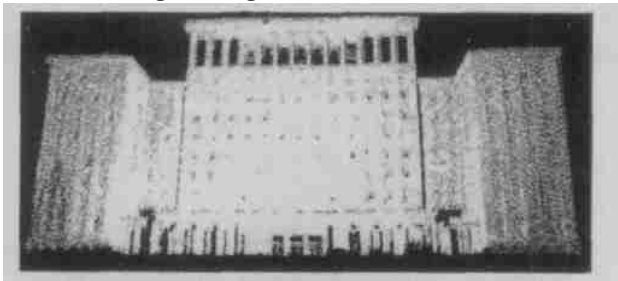


图 4 填补后数据

Fig. 4 Result image

预测算法的实现细节与传统纹理合成算法的是不完全相同的。纹理合成的工作对象是一个完全又随机白噪声组成的图像, 也就是说合成时, 所要填充的像素周围的邻域是随机白噪声, 然后以此搜索样本空间寻找合适的特征值进行填充, 这样做可以保证在合成的结果与输入有相同视觉属性的前提下, 使合成结果具有随机性, 而不仅仅是输入简单的平铺。而本

文算法主要是要体现建筑物表面的重复性, 而不是随机性, 所以直接将已存在空间点的特征值作为丢失点的邻域, 去预测缺失的点数据。另外, 本文算法并不对图像矩阵进行空间的扩张, 只在建筑物表面的范围内进行预测, 与纹理合成算法不同。

5 结 论

本文的算法主要适用对象是表面具有一定重复性的建筑物。通过对这类表面几何特征的提取, 建立能够反映各个表面整体特征的统计模型, 弥补了表面插值算法只考虑局部特征和丢失细节的缺点。同时, 算法简单, 避免了使用参数曲线要解决的控制点选取的难题, 得到了很好的补洞结果。

现实中的测量目标还包括雕像、艺术风格的建筑等, 它们的表面特性复杂, 建立统计模型的难度比较大, 需要结合参数曲面的知识对其进行进一步分析, 使用更加合理的特征函数对现有的算法进行扩展。

参考文献:

- [1] Frueh C, Zakhor A. Data processing algorithms for generating textured facade meshes from laser scans and camera images [A]. In: Int Symp 3D Processing, Visualization, and Transmission [C]. Padua, Italy: 2002.
- [2] Frueh C. Automated Reconstruction of Urban Environments [D]. Karlsruhe: University of Karlsruhe, 2002.
- [3] Szeliski R, Shum H Y. Creating full view panoramic image mosaics and texture mapped models [A]. In: Computer Graphics [C]. Los Angeles USA: 1997. 251-258.
- [4] The Scanning Monticello project [ED/OL]. <http://www.cs.virginia.edu/~Monticello/>.
- [5] Efros A, Freeman W. Image quilting for texture synthesis and transfer [A]. In: SIGGRAPH' 01 Proceedings [C]. Los Angeles, CA: 2001.
- [6] Sapiro G, Bertalmio M, Caselles V, et al. Image inpainting [A]. In: SIGGRAPH' 00 Proceedings [C]. New Orleans, LA: 2000.
- [7] Hugues H, Tony D, Tom D, et al. Surface reconstruction from unorganized points [J]. Computer Graphics, 1992, 26 (2): 71-78.
- [8] ANN. Library for Approximate Nearest Neighbor Searching [ED/OL]. <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN>.

作者简介:

王华建 (1978-), 硕士研究生, 主要从事三维重建技术和计算机图形学的研究。