

# 真实感 3D 重建中的纹理映射技术

郭玲 王建宇 黄炎焱

(南京理工大学自动化学院信息工程系, 江苏 210094)

**摘要** 精确的纹理映射是体现模型视觉真实感的关键因素。本文在阐述纹理映射技术原理的基础上,探讨了基于3维激光扫描设备进行3D重建过程中,实现具有高度真实感的纹理映射所遇到的实际问题,提出了基于纹理的模型重构和纹理光照连续性重建算法,解决了纹理图像空间不连续、光照不连续等因素对模型真实感的影响,并通过真实数据的实验对算法有效性进行了验证,为大型户外实体的真实感3D重建奠定了技术基础。

**关键词** 重建 纹理映射 光照连续性

**中图分类号**: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)10-1881-04

## On Texture Mapping for Realistic 3D Reconstruction

GUO Ling, WANG Jian-yu, HUANG Yan-yan

(Department of Information Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Jiangsu 210094)

**Abstract** Accurate texture mapping is a key factor for reconstructing visually realistic models. After basic theory of texture mapping is introduced, two practical issues are discussed for 3D reconstruction based on 3D laser scanner. An algorithm of model reconstruction based on its texture and an algorithm of lighting consistency recovery of texture images are proposed to deal with the inconsistency of images in space and lighting. Experiments with real outdoor data prove the effectiveness of these algorithms, which will lay a technological foundation for improving visual reality of 3D reconstruction of outdoor objects in large scale.

**Keywords** reconstruction, texture mapping, lighting consistency

## 1 引言

真实感3D重建的目的是获取现实世界中实体的空间位置数据和表面纹理图像,并在计算机中重建出物理尺寸和表面特征均有高度真实感的3D数字模型。其实现过程依赖于硬件设备,如3维激光扫描仪,对空间数据和图像进行采集,以及软件的后续处理。目前,设备的测量精度和效率不断提高,能够满足实用要求。软件算法的研究多集中在如何根据大规模无组织的点云数据进行3D重建,包括:点云数据预处理、表面拟合、数据简化、压缩<sup>[1,2]</sup>。主要应用领域有机械加工领域的逆向工程、刑侦和事故分析的现场重建等。此类研究偏重于实体模型的

快速、精确重建,较少考虑纹理特征。而古迹保护、游戏、电影电视娱乐业等领域恰恰对具有照片级真实感(Photorealistic)的3D重建技术有强烈需求。

从实践过程中体会到,实现具有高度真实感的纹理映射会遇到两个难题:(1)纹理图像空间不连续。这是相对于模型而言的,即模型中有三角面片的3个顶点经映射后,分布于两张图像上,无法进行纹理映射;(2)纹理图像光照不连续。数据采集,尤其是纹理图像采集受光线影响较大,而大型、户外实体的数据采集过程又往往要持续一段时间。由于太阳光线的方向、强度的不断变化,同一实体表面纹理图像光照有突变、不连续。这些图像未经处理、直接映射到模型表面后,严重影响真实感。本文以3维激光扫描设备为例,对真实纹理映射的原理、上述实

实际问题的解决方案进行探讨。

### 2 真实感纹理映射

已知通过点云数据重建出的实体模型为  $M$ ; 已获取的纹理图像序列为  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ ; 获取每幅图像时, 相机相对模型的投影矩阵为  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  及相机镜头参数为  $Para$ , 则真实纹理映射应同时满足下列条件:

$$(u, v) = f(x, y, z, P, Para)$$

该式与图形学中关于纹理映射的定义有所区别。后者省略了  $P$  和  $Para$  两个参数, 仅表明了纹理映射即是建立物体空间坐标  $(x, y, z)$  与纹理空间坐标  $(u, v)$  间对应关系的过程, 但这种对应关系是否与实际情况相符则不予考虑。3D 建模软件如 3dmax, Maya 等都是采用这种原理, 通过手工方式指定纹理像素与模型顶点之间的对应关系。而前者则是从图像形成的物理过程角度约束了这种对应关系的真实性, 即像点  $(u, v)$  是由物点  $(x, y, z)$  经过一系列投影变换形成的。

#### 2.1 纹理映射原理

从投影的角度看, 可以选择使用透视投影模型<sup>[3]</sup>来描述纹理映射, 即纹理映射可用透视投影成像原理来表示。世界坐标系下模型的顶点坐标与像素间的真实对应关系可以通过标定的相机参数、相机坐标系  $X_c Y_c Z_c$  与世界坐标系  $X_w Y_w Z_w$  间的旋转、平移矩阵来获得, 如图 1 所示。图 2 是由 3 维激光扫描设备获得的点云和同步采集的图像之间对应的投影变换关系。

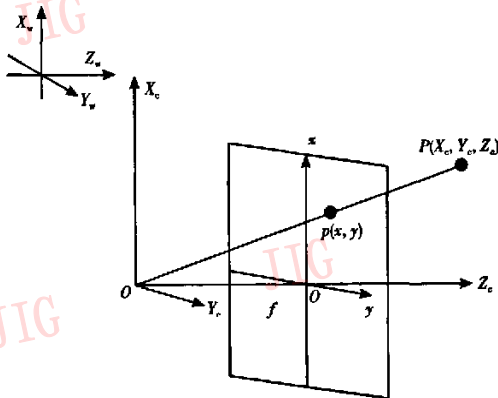


图 1 纹理映射原理

Fig. 1 Illustration of texture mapping

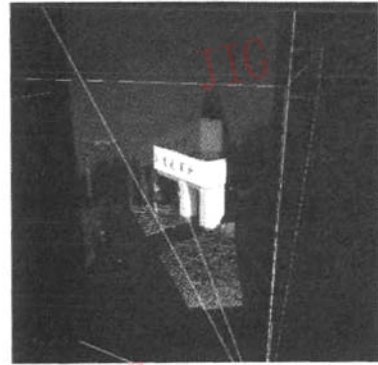


图 2 具有映射关系的点云与图像

Fig. 2 Point cloud and image with mapping relation

#### 2.2 纹理图像空间连续性

为便于确定摄像机坐标系与世界坐标系间的对应关系, 相机与扫描设备的相对位置关系往往是预知、并经过标定的。空间数据采集完成后, 相机根据空间数据的视角和相机参数自动拍摄一定数量的图像。虽然相邻图像会有 10% 左右的重叠, 但当经过重建和简化后的模型具有较大三角片、超过一幅纹理图像的覆盖区域时, 则无法实现纹理映射, 必须进行处理。

本文将问题称作纹理空间连续性, 描述为

$$\text{for } v_i \in T_k, \exists P(v_i) \in I_m \cap P(v_j) \in I_{m+1}$$

其中,  $T_k$  为第  $k$  个三角片,  $v$  为三角片的顶点,  $i, j = 1, 2, 3, i \neq j, P(v)$  为经过相机投影变换得到的  $v$  在图像上的像素点;  $I_m$  为纹理序列中的第  $m$  幅图像。如图 3 所示,  $v_1$  的顶点坐标  $(x_1, y_1, z_1)$  对应纹理坐标  $(u_1, v_1)$ 。

解决该问题可采用重构模型和重构纹理两种思路, 但后者计算量较大。模型重构的原理是根据纹

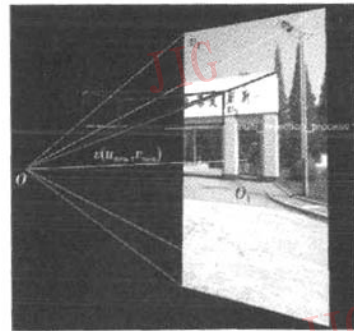


图 3 纹理图像的空间不连续

Fig. 3 Spatial inconsistency of texture images

理图像的边界对模型进行分割,从而使同一三角片的每个顶点投影后都位于同一纹理图像中。投影矩阵及相机参数刻画了模型空间数据与纹理图像的真实对应关系,如图4所示,顶点 $v_1$ 、 $v_2$ 可由投影矩阵在图像上找到相应的纹理坐标,但顶点 $v_3$ 计算得到的坐标一定不在该图像上。因此,根据纹理图像内容来重构模型就是计算新增顶点 $(x_{new}, y_{new}, z_{new})$ 的过程:

(1) 根据式(1)计算三角形每个顶点 $(x_i, y_i, z_i)$   $i=1,2,3$ 在图像中对应的纹理坐标 $(u_i, v_i)$ ,对于同一幅图像, $P, Para$ 的值固定;

(2) 找出符合 $(u_i, v_i) \notin I$ 条件的纹理坐标,由该像素与另外两像素构成的直线及图像边界条件,即可得出 $(u_{new}, v_{new})$ ;

(3) 由 $(x, y, z) = f^{-1}(u, v, P, Para)$ 及顶点共线的条件,可以得出新增加的顶点坐标 $(x_{new}, y_{new}, z_{new})$ 。

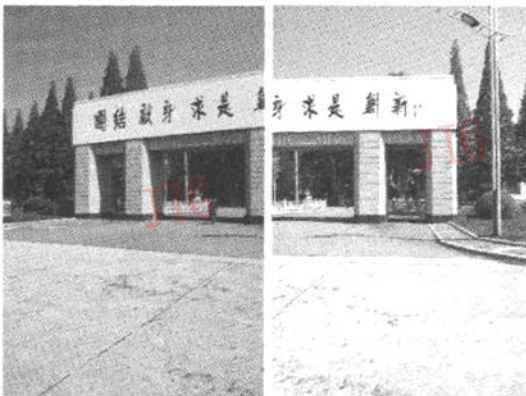


图4 同一三角片的两幅纹理图像

Fig. 4 Two texture images for the same triangle

### 2.3 纹理图像光照连续性

图4也清晰的体现出另一个问题:图像光照不连续。对于户外数据采集过程这种现象是无法避免的。图像光照问题在人脸识别领域研究较多<sup>[4]</sup>,尤其是室外人脸图像的识别,目的在于通过光照估计、光照补偿等措施解决同一人脸在不同光照条件下的图像变化问题。该研究通常基于人脸形状大致相同和人脸反射率基本相等的假设<sup>[5]</sup>,不适于本文的研究内容。

3维扫描设备获取的相邻图像 $(I_1, I_2)$ 间有一定比例的重叠,成为光照连续性重建的重要依据。有研究试图用直方图均衡化,或加权平均等方式描述图像间的转化规律<sup>[6,7]</sup>,从重叠区域计算出参数,然

后将该规律应用到无重叠的图像区域。但上述算法都会使重叠区域与非重叠区域之间出现明显的界线和偏色现象。本文采用同人脸图像研究类似的出发点,即光照理论入手,根据图像形成的物理过程进行光照连续性重建,为建立具有照片级真实感的3D模型奠定基础。

假设太阳为远距离点光源、物体具有朗伯表面<sup>[8]</sup>,则图像强度可以表示为 $I(x, y) = \rho(x, y) \max(n(x, y), l)$ 。式中 $\rho$ 为反射率, $n$ 为顶点法向量, $l$ 为表示太阳光照方向的矢量。

令图像序列 $I$ 是在光照条件 $l = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 下获得的。以其中两幅相邻图像为例,则可以从二者重叠区域得出与 $n$ 对应的像素强度比:

$$R(x, y) = \frac{I_1(x, y)}{I_2(x, y)} = \frac{\max(n(x, y), l_1)}{\max(n(x, y), l_2)}$$

太阳光投射方向可根据图像拍摄的时间、地点(经纬度)等信息,通过天文学知识进行计算<sup>[9]</sup>。从重叠区域获得与 $n$ 对应的 $R$ ,对于在非重叠区域出现的 $n$ ,通过插值计算获得。然后,利用该比值对待处理图像的像素值进行重新计算。应该注意的是,图像的分辨率高于点云的分辨率,因此,还需对图像上的无模型对应点的像素进行双线性插值。

## 3 实验结果

配合本文算法实验,对校园内宽约20m、高约9m的牌坊进行了点云数据和纹理图像的数据采集,对于纹理的空间不连续和光照不连续等问题都有充分的体现。图5是应用2.2节中的算法对图3的处理结果,圆满解决了因纹理图像空间不连续而造成的无法映射纹理的问题。图6则是在此基础上,应用光照连续性重建算法的处理结果,大部分场景的光照恢复结果实现了提高真实感的目的。而如何根据模型空间数据、光源位置等信息校正纹理图像上

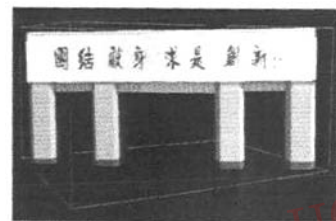


图5 纹理图像空间不连续问题的解决

Fig. 5 Resolution of spatial inconsistency of texture images

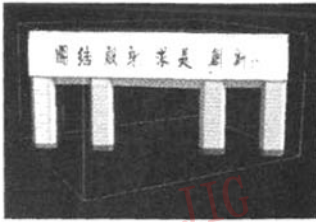


图 6 光照连续性的处理结果

Fig. 6 Result of lighting consistency recovery

的阴影投射,将作为今后的工作目标。

## 4 结 论

随着数据采集设备的不断进步,快速、精确的模型重建技术体现出强大的生命力。对于要求模型具有照片级真实感的领域,纹理映射的精确度和视觉真实感就显得格外重要。本文探讨了基于 3 维激光扫描设备进行实体 3D 重建过程中,由于纹理图像空间不连续和光照不连续所造成的无法映射纹理和映射后视觉真实感较差的问题,提出了相应的算法予以解决,并通过实地采集的数据进行算法有效性验证。由于该技术的先进性,将在以后的工作中不断完善已有技术,并在应用的过程中发现问题、解决问题。

### 参考文献 (References)

- 1 Peter K Allen, Ioannis Stamos, *et al.* 3D modeling of historic sites using range and image data [A]. In: Proceedings of the IEEE international conference on robotics & automation [C], Taipei, China, 2003: 145 ~ 150.
- 2 Hu Xiao-tang, Zhang Zong-hua, Peng Xiang, *et al.* Large data processing based on reverse engineering [J]. Journal of Engineering Graphics, 2002, 23(4): 33 ~ 38. [胡小唐,张宗华,彭翔等. 基于逆反工程多数据点云的处理[J]. 工程图学学报, 2002, 23(4): 33 ~ 38.]
- 3 Ma Song-de, Zhang Zheng-you. Computer Vision [M]. Beijing: Department of Mathematics, Peking University, 1983. [马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京:北京大学数学系数学研究所, 1983.]
- 4 Etienne Beauséne, Aebastien Roy. Automatic relighting of overlapping textures 3D model [A]. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Patter Recognition [C], Nice, France, 2003: 1 ~ 7.
- 5 Qing Lai-yun, Shan Shi-guang, Chen Xi-lin, *et al.* Face recognition under varying lighting based on the harmonic images [J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(5): 760 ~ 767. [卿来云,山世光,陈熙霖等. 基于球面谐波基图像的任意光照下的人脸识别[J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 760 ~ 767.]
- 6 Milgram P I. Computer methods for creating photomosaics [J]. IEEE Transactions on Computers, 1975, C-26: 1113 ~ 1119.
- 7 Agathos A, Fisher R B. Color texture fusion of multiple range images [A]. In: Proceedings of the Fourth International Conference on 3-Digital Imaging and Modeling [C], Banff, Alberta, Canada, 2003: 139 ~ 146.
- 8 Alejandro Troccoli, Peter K Allen. Recovering illumination and texture using ratio image [A]. In: Proceedings of the Fifth International Conference on 3-Digital Imaging and Modeling [C], Ottawa, Ontario, Canada, 2005: 93 ~ 102.
- 9 Nakamse E, Harada K, Ishizaki K. A montage method: The overlaying of the computer generated images onto a background photograph [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH '86; Thirteenth Annual Conference [C], 1986: 207 ~ 214.