

基于几何模型与照片序列的不规则物体纹理获取

陈 任 鲁东明 潘云鹤

(浙江大学人工智能研究所, 杭州 310027)

摘 要 虚拟世界的建造过程中, 获取不规则物体的纹理非常重要. 针对数字文物保存与展示的要求, 提出了一种基于物体单色几何模型及在其周围环绕拍摄的照片序列来获取不规则物体圆柱纹理的算法. 该算法分为投影变换、变形和拼接等步骤, 通过将物体照片序列上的色彩映射到圆柱贴图上来获得该物体的纹理. 该算法具有对原始照片质量要求低和允许运行时进行编辑等优点.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 纹理获取 几何模型 照片序列 数字文物

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)08-0902-05

Generating Textures of Irregular Objects from Models and Photo Sequences

CHEN Ren, LU Dong-ming, PAN Yun-he

(AI Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In the process of building virtual worlds, it is very important to get the textures of irregular objects. Many texture acquirement techniques have been proposed in recent years. However, suffering from costly equipment and the ambiguity of texture presentation, these currently available approaches cannot meet the requirements of the conservation and presentation of digital heritages. To overcome these problems, a new algorithm on generating cylindrical textures of irregular objects is presented in this paper. Based on the homochromatic geometric models of objects and the photo sequences shot around them, the algorithm generates the textures of irregular objects by transferring the color information of the photo sequences to the cylindrical texture maps. It consists of three steps: first, building the mapping relations between the pixels on the photos and the pixels on the texture map by projective transformation, second, acquiring partial textures from respective photos and at last, combining these partial textures into integrated one by mosaicing. The algorithm is runtime-controllable and has low quality requirement of source photos. It has been applied to the Digital Rebuilding and Restoration System of Dunhuang Culture Relics and gets good results.

Keywords Computer image processing, Texture acquirement, Geometric model, Photo sequence, Digital heritage

0 引 言

目前大多数基于几何模型的虚拟现实系统都采用三维模型加上表面纹理的方法来获得具有色彩信息的真实感效果,但在虚拟世界的建造过程中,特别是在将现实世界虚拟化的系统中,场景中往往存在着大量不规则物体.这些不规则物体十分复杂,难以采用数学方法和纯计算机视觉的方法建模和获取纹

理.随着光电测距技术的发展,三维扫描仪获得了越来越广泛的应用,采用三维扫描仪来获得物体几何模型已经成为建造虚拟世界的重要途径.虽然目前已有具扫描色彩信息的三维扫描仪出现,但由于价格等原因,其尚无法获得广泛的应用,目前广泛使用的三维扫描仪大都只能获得物体的单色几何模型.另一方面,物体照片中包含的色彩信息又难以直接应用于模型上.因此,如何从物体的单色几何模型和它的多张不同角度的照片出发,得到该物体的纹理

基金项目:国家自然科学基金重点项目(69733030)

收稿日期:2002-09-23,改回日期:2003-03-10

就成为需要研究的问题。

意大利国家研究委员会 (Italian National Research Council, C. N. R.) 的视觉计算小组 (Visual Computing Group) 专门针对不规则物体纹理的获取进行了研究。他们根据物体的几何模型和照片, 对模型上的每一个三角面片计算纹理, 通过这些纹理子块的缝合 (Stitching) 和融合 (Blending) 来生成物体的纹理图^[1,2]。

通过上述方法得到的物体纹理图是由破碎的三角形或矩形构成的, 三维渲染后具有较好的视觉效果。其不足之处主要在于: 其表达方式不够直观造成了直接对纹理图进行编辑的困难, 例如在文物修复系统中, 常常需要对三维文物上的褪色和掉色进行修复。由于用这种方法获得的纹理被人为地割裂成了许多碎块, 不再具有表达上的连续性, 因此, 无法通过直接编辑纹理图的方法来对文物色彩作复原; 另外, 对于同一物体, 其纹理表达可能会存在多种方式, 即存在纹理表达上的二义性, 这不仅不利于多媒体数据库的建立和检索, 而且也不利于物体的虚拟展示, 例如, 在虚拟系统应用多分辨率模型的情况下, 采用这种纹理获取方法, 由于物体的各层次模型拓扑结构不同, 系统设计者就必须为每个层次模型计算纹理, 这将大大增加系统设计和运行的开销。特别是在系统中多分辨率模型是动态产生的情况下, 这个问题就更加突出。

数字化文物的存储与展示要求直观与无二义性的纹理表达方式, 为此提出了一种通过物体几何模型及在物体周围环绕拍摄的照片序列来获取物体圆柱纹理的算法。该算法已应用于敦煌文物数字化重建与复原系统中, 并获得了很好的效果。

1 映射模型

由于绝大多数三维扫描仪都可以输出物体的三角形网格模型, 且其他网格模型均可转化为三角网格模型, 因此, 不失一般性, 这里只讨论物体模型为三角形网格模型的情况。

映射变换的目的是以物体几何模型上的三角面片为中介来建立圆柱贴图面上的三角形与原始照片上的三角形之间的映射关系。该变换分为两个步骤: 第 1 步是计算模型上的三角面片 (三角形 I) 在照片上的对应三角形 (三角形 II), 这个过程称为 I → II 映射; 第 2 步是计算模型上的三角面片 (三角形 I)

在贴图圆柱面上的对应位置 (三角形 III) 这个过程称为 I → III 映射。

1.1 模型-照片映射 (I → II 映射)

对于几何模型上的每一个三角形 I, 如果其在物体的正面 (即其法线向量与从物体中心指向相机镜头中心的向量的夹角小于 90°) 并且没有被别的三角形所遮挡, 那么在照片上就存在着一个平面三角形或平面的退化三角形 (三角形 II) 与之相对应。I → II 映射的目的就是找出这个对应的三角形 II。

I → II 映射要经过以下几个步骤: 首先根据相机内部参数、照片与物体几何模型计算物体与相机镜头的位置关系, 这在计算机视觉学科中被称为模型到图象的注册 (Model-to-Image Registration) 过程; 然后根据投影公式计算模型上的三角形面片在照片上的对应三角形, 如图 1 所示。

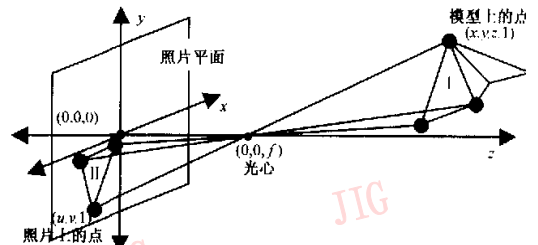


图 1 I → II 映射过程

模型到图象的对准过程是从给定的物体模型和照片以及该模型与照片上相对应的一系列特征点出发, 计算物体相对于照相机的位置和方向, 具体包括特征匹配和模型到图象的变换两个过程。由于匹配过程具有简单场景 (只包含一个物体) 和无法利用色彩信息的特点, 因此, 采用手动的特征标示和匹配的方法^[3]。

如果以 $X = [x, y, z, 1]^T$ 表示物体模型的局部三维坐标, 以 $U = [u, v, 1]^T$ 表示其在照片平面上的对应投影, 那么变换的过程可以用如下公式表示^[4]:

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P_{3 \times 4} M_{4 \times 4} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, w 为缩放因子; $P_{3 \times 4}$ 为摄影坐标到照片平面的投影矩阵

$$P_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$M_{4 \times 4}$ 为模型到摄影坐标的投影矩阵,由旋转分量 $R_{3 \times 3}$ 和平移分量 $T_{3 \times 1}$ 组成

$$M_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将手工标定的特征点对作为已知条件,通过迭代方法^[5]可以求得 $w, P_{3 \times 4}$ 和 $M_{4 \times 4}$, 对于模型上的可见三角面片,都可以根据式(1)计算得到其各顶点在照片平面上的投影. 这样,就完成了从三角形 I 到三角形 II 的映射变换. 在此过程中可近似地认为拍摄相机是一台理想化的针孔照相机.

1.2 模型—贴图圆柱面映射(I → III 映射)

I → III 映射计算三角面片(三角形 I)在贴图圆柱面上的对应位置(三角形 III),如图 2 所示. 投影的规则是:三角面片上的点在经过它的水平面上,从圆柱面的中心轴向外投射并与圆柱面交于一点,这就是其对应的投影点. 可以证明,将投影圆柱面展开为平面后,三角形 I 的投影将成为一个曲边三角形,这就是所求的三角形 II.

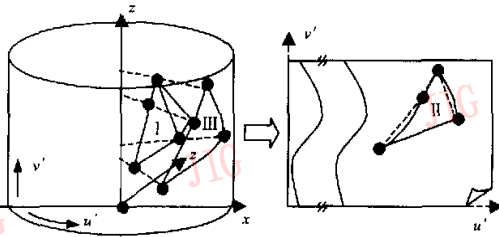


图 2 I → III 映射过程

可以用一系列首尾相连的线段来近似地表达三角形 III. 具体方法如下:指定一个阈值 T_L , 当三角面片的边长 l 大于 T_L 时,将其分为 $[L/T_L]$ 等份,并将各等分点和端点一起按上述方法投影到圆柱面上. 按顺序连接这些投影点,就得到了近似的三角形 III. 阈值 T_L 的选择规则如下: $T_L = \delta R$, 其中 R 是物体几何模型的包围球直径, δ 是一比例因子,大小可以根据精度要求调节. 在大多数情况下,可以令 $\delta = 1$, 即将三角形 III 近似地看作是直线边三角形.

投影算法如下:

如果以 $X = [x, y, z, 1]^T$ 表示模型网格上任一点的局部三维坐标,以 $U' = [u', v', 1]^T$ 表示其在圆

柱面上的贴图坐标,并规定 U' 的原点为模型局部坐标系 x 轴的负半轴与贴图圆柱面的交点, u' 正向为对应模型局部坐标系 xy 平面上的逆时针方向, R 为圆柱半径,则贴图坐标 U' 可通过下式求得

$$U' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \times (\pi + \arctan2(y, x)) \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,函数 $\arctan2(y, x)$ 是反正切函数的扩充,它根据 x, y 参数的符号返回从 $-\pi \sim \pi$ 间的弧度值

$$\arctan2(y, x) = \begin{cases} \arctan(y/x) - \pi & \text{当 } x < 0 \text{ 且 } y < 0 \\ -\pi/2 & \text{当 } x = 0 \text{ 且 } y \leq 0 \\ \arctan(y/x) & \text{当 } x > 0 \\ \pi/2 & \text{当 } x = 0 \text{ 且 } y > 0 \\ \arctan(y/x) + \pi & \text{当 } x < 0 \text{ 且 } y \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

2 获取局部纹理

通过上文所述的投影变换过程,得到了照片上的三角形 I 与圆柱纹理图上的三角形 III 间的对应关系. 接下来的工作就是将照片上色彩信息转换到贴图圆柱面上. 由于单张照片无法记录物体所有的色彩信息,所以只能从其中获取局部的纹理.

该过程可分解为多个从三角形 I 到三角形 III 的变形过程. 这些变形过程是视点无关的,即不需要经过 View Morphing 过程. 采用 Beier 方法^[6]来进行变形计算,首先以一系列特征线对来标记源图象与特征图象间的对应关系(源图象与目标图象间的特征线对已通过映射关系建立,无需手工标记,如图 3 中的线段 AB 与 $A'B'$, BC 与 $B'C'$, CD 与 $C'D'$, DA 与 $D'A'$ 线对),然后目标图象上的每一个点可以根

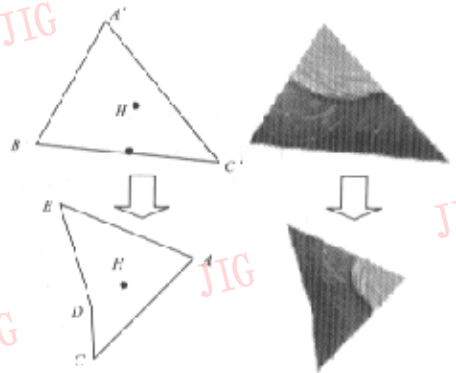


图 3 三角形变形过程

据它们与这些特征线对之间的位置关系在源图象上找到其对应点,并取得其色彩属性。

将物体的每一张照片经过上述变形,就得到物体的一个局部圆柱纹理。此局部纹理是该照片在贴图圆柱面上的投影,它包含了物体在这张照片上所有可见部分的颜色信息,而物体未被照片记录的部分在此纹理图上将保持原有背景色。

3 局部圆柱纹理的拼接

对于每一张照片,都可以通过以上的方法来获取物体的局部圆柱纹理,如果物体周围的照片拍摄得足够密集的话,那么它们经过投影和变形所得到的局部圆柱纹理就可以拼接为一张完整的物体圆柱纹理。

图象的拼接已有多种成熟方法,这里使用的是 Szeliski 提出的方法^[7]。以一个像对的拼接过程为例:

首先,将像对中的一张图象作投射变换,二维投射变换可记为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (\text{规定 } m_{22}=1) \quad (6)$$

其中, $[x, y, w]^T$ 与 $[x', y', w']^T$ 分别是点在投射变换前后的二维齐次坐标,矩阵 (m_{ij}) 称为投射变换矩阵。根据式(6),图象上一点 (x, y) 经投射变换后的坐标 (x', y') 为

$$\begin{aligned} x' &= \frac{m_{00}x + m_{01}y + m_{02}}{m_{20}x + m_{21}y + 1} \\ y' &= \frac{m_{10}x + m_{11}y + m_{12}}{m_{20}x + m_{21}y + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

然后将其与另一张图象重叠,计算它们重叠部分亮度方差的总和

$$E = \sum [I'(x'_i, y'_i) - I(x_i, y_i)]^2 = \sum e_i^2 \quad (8)$$

其中, i 代表上述两张图象重叠部分的像素, $I'(x'_i, y'_i)$ 与 $I(x_i, y_i)$ 分别是两张图象上像素 i 的亮度。采用 Levenberg-Marquardt 迭代方法,计算在不同投射变换矩阵和重叠位置下的 E 值大小,直到求得 E 的最小值为止,此时就完成了两张图象的最优拼接。

由于本算法只考虑了图象边界为矩阵的情况,而实际上待拼接图象的边界是不规则的,要考虑到背景色彩对拼接过程的干扰,所以我们对算法作如下修正:

记 $C(x, y)$ 为求平面点 (x, y) 上色彩值的函数,

C_b 为背景色,当求照片亮度方差时,规定

$$e_i = \begin{cases} 0 & \text{当 } C(x, y) = C_b \text{ 或} \\ & C(x', y') = C_b \\ I'(x'_i, y'_i) - I(x_i, y_i) & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

这样在拼接前对各局部圆柱纹理图进行图象修正,使某张照片上可能存在的噪音不至于影响整张纹理的质量。这在某些特殊场合,例如遇到物体不能搬动,而且拍摄环境又比较阴暗狭小的情况下,具有十分重要的意义。

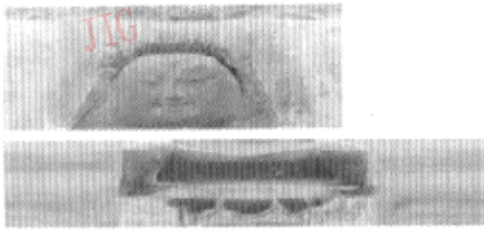
4 例子

使用莫高窟的一尊北魏时期的坐佛作为例子。用三维扫描仪扫描了佛像的三维模型(无色彩信息),并在均匀光照条件下,用数码相机绕其等距离等间隔角度拍摄了 8 张照片(图 4)。



图 4 原始数据:模型和照片

根据模型的具体形状,决定将其头部和躯体分别获取圆柱纹理。使用模型和各照片,通过上文所述的投射、拼接和变形过程,对于头部模型和躯体模型分别得到 8 张局部纹理图,并分别合成为两张圆柱纹理。图 5 为纹理图与渲染效果图。



(a) 头部、身体部分的圆柱纹理图



(b) 最终渲染效果图

图5 头部、身体部分的圆柱纹理图和最终渲染效果图

5 结论

通过普通三维扫描仪扫描获得的物体几何模型在物体周围拍摄的一系列照片来获取物体圆柱纹理的算法,具有灵活、对原始照片质量要求低、允许在生成过程中对纹理图进行编辑等优点。

该方法主要的不足之处在于:考虑到虚拟复原、虚拟展示等方面的要求,生成的物体圆柱纹理在视觉效果上做出了一些牺牲;对于一些比较复杂的物体,可能存在部分位置的纹理无法映射的问题,这种情况一般可以通过将物体划分为几个子物体的方法来缓解;另外,由于要对每一张照片进行映射和变形操作,因此该算法的系统开销比较大。

参考文献

- 1 Rocchini C, Cignoni P, Montan C. Multiple texture stitching and blending on 3D objects[A]. In: Rendering Techniques '99 [C]. Granada, Spain, 1999;119~130.
- 2 Cignoni P, Montan C, Rocchini C et al. A general method for preserving attribute values on simplified meshes [A]. In: Visualization '98 Conference of IEEE [C]. Research Triangle Park, North Carolina, USA, 1998;59~66.
- 3 Kim W. Computer vision assisted virtual reality calibration[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation 1999, 15(3): 450~464.
- 4 Duchesne C, Herve J Y. A survey of model-based registration techniques using images[EB/OL]. <http://www.ai.polymtl.ca/duchesne/Recherche/Model-based-registration/model-based-Pat-Reco.html>. 2000-01-25.
- 5 Dementhon D F, Davis L S. Model-based object pose in 25 lines of code[J]. International Journal of Computer Vision. 1995, 15(1-2);123~141.
- 6 Beier T, Neely S. Feature-based image metamorphosis [J]. Computer Graphics, 1992,26(2);35~42.
- 7 Szeliski R. Image mosaicing for tele-reality applications[A]. In: IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'94)[C]. Sarasota, Florida, USA, 1994;44~53.



陈任 1975年生,浙江大学计算机系在读博士研究生,目前研究方向为计算机图形学、虚拟现实、多媒体等。



鲁东明 1968年生,教授,研究生导师,1994年获浙江大学计算机应用专业博士学位,目前研究方向为虚拟现实、基于内容的图象检索、图象处理等。



潘云鹗 1946年生,教授,中国工程院院士,博士生导师,1981年获浙江大学计算机应用专业硕士学位,主要从事人工智能、形象思维模拟、智能CAD等研究。