

# 基于两视图重建的平面纹理校正和映射

孟维亮 孙济洲 孙小兵

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要** 在3维场景里漫游,纹理映射是展示场景真实感的主要手段。纹理通常由照片获得,但由于某些不可抗拒的原因,只能得到透视变形的纹理图像。讨论了如何纠正平面纹理的透视变形,及其相应的纹理映射,其过程是在两视图重建的基础上,对原平面进行投影变换,并用插值方法获得纹理,从而映射到模型上。在投影变换的过程中对已有算法进行了改进以达到较好的效果,并对实验结果进行了分析和讨论。该方法适用于构建虚拟的3维场景及去除由于透视变形而产生的图像模糊。

**关键词** 两视图重建 透视变形 投影变换 共线性 相机校准矩阵 关键点 纹理映射

**中图分类号**: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)12-1498-06

## Planar Texture Rectification and Mapping Based on Reconstruction from Two Views

MENG Wei-liang, SUN Ji-zhou, SUN Xiao-bing

(Electronic and Information Engineering School, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** When roaming in a 3D virtual scene, texture mapping is a main tactic to display the reality of the scene. But for some special cases i. e. the position of the object or other difficulties which can't be overcome, the texture with perspective distortion is got. Here how to rectify the plain texture to remove perspective distortion and corresponding texture mapping are discussed. This process is as follows: applying projective transformation on the plane, using interpolation method to acquired texture, and then mapping it on the model. This is based on reconstruction from two views. Some existing algorithms are used and some changes are made to achieve a good result during projective transformation. Then the result of test is analyzed and discussed. This method can be used to construct a virtual scene, or clarify the blur of the photos for the reason of perspective distortion.

**Keywords** reconstruction from two views, perspective distortion, projective transformation, collinearity, camera calibration matrix, key point, texture mapping

## 1 引言

3维模型可以从两张不同角度拍的照片恢复得到<sup>[1]</sup>,进而用拍照获得的纹理来映射模型以生成真实的3维场景。但是由于透视变形,一些纹理特性如平行性等被改变(图1)。

为了进行纹理映射,必须将透视变形纠正,此过程保持了共线性,即转换后直线仍然保持是直线,可

通过与单应矩阵相乘来实现。Hartleyd已经给出了这种转换过程中计算单应矩阵 $H$ 的原理,可作为一种计算 $H$ 的方法。但这种方法要求至少要有4个特殊点(相连可以构成平行或垂直关系)或有平行性等重要特征信息。Loy给出的另一种计算 $H$ 的方法需要知道相机校准矩阵和点的3维信息,但适用于任何的三角面片。在实验中发现对 $H$ 用另外的扩充方法可以取得更好的效果。然后用插值的方法取得纹理并进行映射。

基金项目:天津市自然科学基金项目(033800511)

收稿日期:2005-01-12;改回日期:2005-04-18

第一作者简介:孟维亮(1981~),男。2003年于中国民用航空学院计算机科学与技术专业获学士学位,现为天津大学计算机应用专业硕士研究生。主要研究领域为纹理映射及虚拟现实。E-mail:xiqiancheng@eyou.com



图 1 扭曲的纹理(盒子上的龙)

Fig. 1 The distorted texture(the dragon on the box)

## 2 两视图重建

两视图重建的目标是给出两张同一场景不同角度的照片,恢复出相机的位置和场景的 3 维结构。这里讨论的图像中的场景都是静态的,即图像中的物体不发生移动。在照相测量学中,点的投影坐标和从两个角度拍摄的两个相机(可以是同一相机)的光心坐标构成一个三角形(如图 2)。

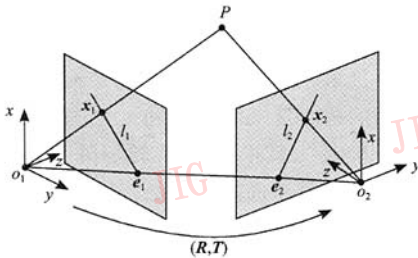


图 2 极线约束( $e_1, e_2$  是极点,  $l_1, l_2$  是极线)

Fig. 2 The epipolar constraint( $e_1, e_2$  are poles,  $l_1, l_2$  are polars)

每个相机都有一个相机坐标系,坐标系的原点为相机的光心, $z$  轴与相机的光轴重叠。由于相机可安放在环境中的任何位置,因此还需要选择一个基准坐标系来描述相机的位置,并且用它描述环境中任何其他物体的位置,该坐标系称为世界坐标系。不失一般性,假设世界坐标系与第一个相机的相机坐标系重叠,则另一个相机的相机坐标系在世界坐标系中的位置和方向可以通过一个欧几里德变换求得。如果点  $P$  在两个相机坐标系中的 3 维坐标分别为  $X_1$  和  $X_2$ , 则它们之间的关系是如下的一个刚体变换(欧氏空间中的刚体运动保持刚性物体的距离、角度不变):

$$X_2 = RX_1 + T \tag{1}$$

其中,  $R$  是旋转矩阵,  $T$  是平移向量。

设  $x_1, x_2$  是一空间点  $P$  在两个不同视点位置的相机中的像,两个相机的相对位置变换满足式(1), 则  $x_1, x_2$  满足极线约束<sup>[2]</sup>:

$$\langle x_2, T \times Rx_1 \rangle = 0 \tag{2}$$

其中,  $\times$  表示向量叉积,  $\langle \rangle$  表示向量内积。

如图 2 所示,左边相机中心  $o_1$  和  $P$  点组成的向量,右边相机中心  $o_2$  和  $P$  点组成的向量,与两个相机中心  $o_1, o_2$  组成的向量形成一个三角形,因而这 3 个向量处于同一个平面上,式(2)说明它们的三元叉积(先两个向量做叉积,然后结果与第 3 个向量做内积)的值是这 3 个向量组成的平行六面体的体积,三向量共面,所以体积为零。

根据空间位置信息,可以在同一物体从不同角度所拍的两张照片上标定若干对数目的点,每对点是同一个点分别在两张相片上的投影,通常选取那些能生成物体大体轮廓的点,即关键点。Longuet-Higgins 的 8 点算法<sup>[2]</sup>使用 8 点或更多个对应点作为输入,利用式(2),可求得两个相机的相对位置(旋转矩阵  $R$  和平移向量  $T$ )。当已知相机的内部参数和外部参数时,就可以通过空间点在两个图像上的投影点来计算该点在空间中的 3 维坐标。由于每 3 个点可以构成三角面片,将物体表面的若干个三角面片拼合起来就重建了 3 维模型,但模型表面还没有纹理,需要从照片中提取透视变形的纹理,并进行校正,进而生成纹理图并映射到模型上。

## 3 投影变换

为去除纹理的透视变形需进行投影变换。

在 2 维空间齐次坐标表示法中,一个点用一个 3 维齐次列向量  $(x, y, z)^T$  来标识,表示其欧几里德坐标为  $(x/z, y/z)$ , (这里假设  $z \neq 0$ ),  $z = 0$  则表示点在无限远处。设几何实体用列向量来表示,并用粗体字母(如  $x$ )来代表列向量。不失一般性,设图像都是指矩形图像,并令图像坐标系以图像的左下顶点为原点,两条边为坐标轴,单个像素长度为单位长度。如果  $x$  和  $x'$  表示一个 3 维平面上任意某个点在两张相片上的齐次图像坐标,其之间的映射关系可以写成<sup>[3]</sup>:

$$x' = Hx \tag{3}$$

式(3)称为投影变换式。 $H$  是  $3 \times 3$  的齐次矩阵,称为单应矩阵。若  $x$  是存在透视变形的原始图像坐标,  $x'$  是校正后的图像坐标,那么如果知道了  $H$  和  $x$ , 就可以通过式(3),得到  $x'$ 。将校正图像中  $x'$  位

置的图像像素颜色值赋予原始图像中  $x$  位置的像素颜色值,就可以得到校正的纹理图。原始的图像坐标  $x$  可直接由原始图像中读取,关键是  $H$  的计算。

## 4 $H$ 的计算

在两视图重建过程中可获得点的 3 维空间坐标,利用这些坐标,以及相机校准矩阵  $K$  和点的 2 维图像坐标,可有多种算法来计算  $H$ 。

### 4.1 使用 DLT 算法来计算 $H$

给定 4 个 2 维到 2 维的对应点,可以使用 DLT (direct linear transformation) 来计算  $H$ <sup>[3]</sup>。对应点必须精确地选择,通常选取那些带有明显几何关系(如平行,垂直等)的对应线上的点。注意这些点必须在同一 3 维平面上,因为不同的 3 维平面对应不同的  $H$ 。通常选取 4 个构成矩形的点。此时,可以用已知的 3 维坐标来决定矩形的纵横比,并选取适当的长度作为宽或高,于是在要校正的平面上相应的点的坐标可取为  $(0, 0)$ ,  $(width, 0)$ ,  $(0, height)$ ,  $(width, height)$ ,从而用 DLT 算法来计算  $H$ 。当然可以选取更多的点以降低  $H$  的计算误差。

### 4.2 另一种计算 $H$ 的方法

上面的方法比较简单直观,而且不需要知道关于相机的信息,但是局限性也很明显。如果不存在 4 个有明显几何关系的点,就不能精确地定位在纠正图像上相应点的坐标,从而不能正确地进行纹理映射。为避免这个问题,需要利用相机的参数信息。

给定 3 个点的图像坐标和其 3 维几何坐标,这 3 个点所在的平面可被纠正为正面视图。

如图 3 所示为基本针孔相机模型。设透视投影的中心在欧几里德坐标系的原点,成像平面(焦平面)为  $z=f$ 。 $f$  为焦距。在此模型中,3 维空间的点  $X$  被映射到原点与  $X$  连线上与平面  $z=f$  的交点。法向量  $n_2$  与法向量  $n_3$  平行,而法向量  $n_1$  与  $n_3$  不平行,因而在法向量为  $n_1$  的成像平面上的三角形是扭曲的。产生透视变形的原因在于,成像平面与  $X$  所在的 3 维平面不平行。

设点的世界坐标和图像坐标均用齐次向量表示。用  $X$  表示 4 维齐次世界坐标向量  $(x, y, z, 1)^T$ ,  $x$  表示相应的 3 维齐次图像坐标向量,可有<sup>[2]</sup>

$$x = PX \quad (4)$$

$$P = K[R | t] \quad (5)$$

其中,  $K$  为相机校准矩阵,是两视图重建的必要参

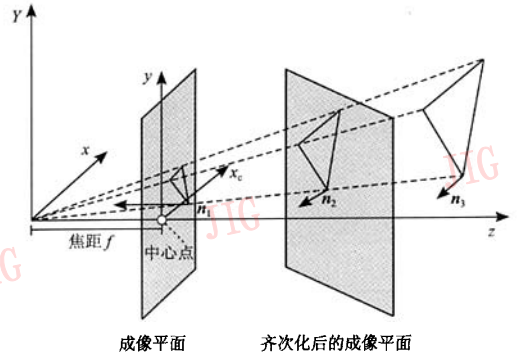


图 3 针孔相机模型

Fig. 3 Pinhole camera geometry

数,可由相机参数获得<sup>[4]</sup>。有关  $K$  以及相机参数的细节,可参见文献[5]~文献[7]。 $R$  为旋转矩阵,  $t$  为平移向量。

设  $x'$  表示纠正后图像上点的图像坐标,  $x$  表示未纠正图像上点的图像坐标,均用齐次表示法,可有

$$x = PX = K[R | t]X$$

$$x' = K[R_r | t]X$$

其中,  $R_r$  表示纠正图像对应的正交旋转矩阵。

目标是把  $R$  用  $R_r$  替换掉,  $R_r$  的最后一行是平行于 3 维平面的法向量。由于  $x'$  和  $x$  之间满足式(1),可推得  $H = KSK^{-1}$ ,其中,  $S$  是旋转矩阵,其最后一行为  $n^T R^{-1}$ ,  $n$  为 3 维平面的法向量,可由不在同一直线上的 3 个 3 维点坐标来计算,即通过向量的叉积来获得。可以使用 Householder Matrix 来计算  $S$ :

$$S = I - \frac{2vv^T}{v^T v}$$

其中,  $v = S_3^T + \|S_3\| \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  且  $S_3 = \frac{n^T}{\|n\|} R^{-1}$ 。

该算法细节可参见文献[8]。

为了保证所有的纹理图有相同的分辨率,应该对  $H$  进行适当的放缩。直接使用  $H$  可能会导致内存溢出。Loy 采用的方法是计算两个点的 3 维距离  $d_3$  和 2 维距离  $d_2$ ,然后对  $H$  的最后一行扩充  $d_2/rd_3$  倍,  $r$  为分辨率。实验中发现,对  $H$  的最后一行扩充一个常数倍(称此系数为  $H_{\text{coefficient}}$ )可以产生更好的效果。这个常数越小,图像质量越好,但计算时间也随之增加。原因是由于较小的  $d_2$  和  $d_3$  值产生的误差使得生成的  $H$  不是很稳定,导致纹理计算时间增加,却不能生成很好的效果,而且经常使得内存溢出。

### 5 纹理映射

当获得单应矩阵  $H$  以后,透视变形就可被去除。注意,应使得纠正后的图形为矩形以利用纹理映射技术将其映射在模型上。利用插值方法来获得校正后图像的颜色值可以生成较好的效果。如果纠正后的区域是矩形,就可以直接进行插值。但如果只是如图 4 中的三角形,由于透视投影变换的共线性和可逆性,纠正前的区域也是三角形。这时就需要计算纠正后三角区域的包围盒。然后利用不同的插值(线性,双二次,双三次,样条插值等)方法并利用逆变换求出插值点所对应的原始图像坐标,以取得对应的像素信息来生成包围盒的纹理图。

可以用纠正后的图像作为纹理映射到两视图重建的模型上。纠正后的纹理不一定是完全正确的,

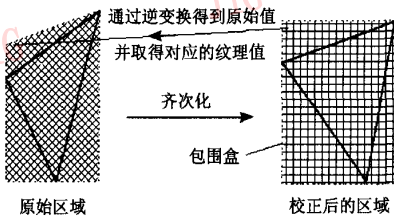


图 4 纹理生成示意图

Fig. 4 The process of texture generation

因为它可能只是要纠正图像的包围盒,但是可以通过指定纹理坐标,把需要的部分映射到模型表面上去,最终生成 vrmf(virtual reality modeling language)文件。有关 vrmf 中纹理坐标的设定,可参见文献[9]。

### 6 实验结果

对不同分辨率的图像进行测试,利用相应的两视图重建中生成的关键点的 3 维坐标和相机校准矩阵  $K$ ,以及点的 2 维图像坐标,校正其纹理并生成相应的 vrmf 模型。

图 1 和图 5 的分辨率为  $2032 \times 1354$ ,被用来进行两视图重建,其中图 1 是用于两视图重建的第 1 张图,图 5 是第 2 张图,并且图 1 的纹理被用作贴图。从下面的结果图(图 6)中可以看出其效果,尽

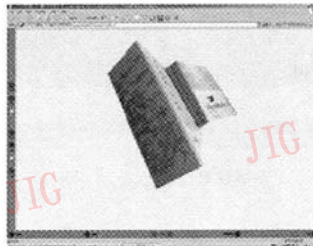


图 5 用于两视图重建的第 2 张图

Fig. 5 The second photo used for reconstruction of two views



(a) 两视图重建恢复的模型



(b) 纹理映射后的模型



(c) 模型上龙的纹理



(d) 模型的上方盒子顶面的纹理

图 6 重建结果

Fig. 6 The result of the reconstruction

管图 1 中上方盒子上表面倾斜角度很大,但仍然可以获得较清晰的纹理(图 6(d))。

以上生成纹理时,均用本文的方法来改变  $H$ ,如果使用 Loy 的方法,结果如图 7 所示,其中,  $r = 150$  时,由于两视图重建的误差,上方盒子的纹理不正确,  $r = 200$  时,内存溢出。

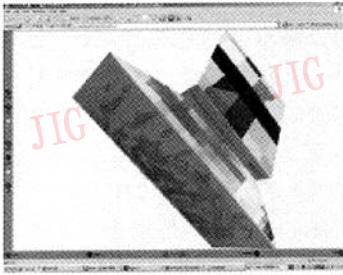


图 7 用 Loy 恢复的纹理

Fig. 7 The texture resumed by the method of Loy

图 8 和表 1 是用不同的  $H_{\text{coefficient}}$  和不同的插值方法测试结果对比。如前所述,当  $H_{\text{coefficient}}$  越小,图像效果越好,但计算时间也越长。在使用双三次插

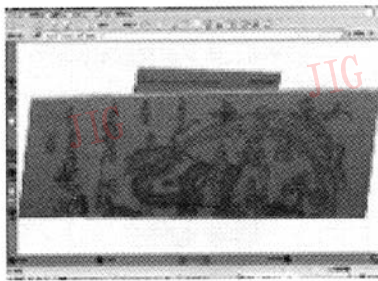
表 1 采用不同  $H_{\text{coefficient}}$  和不同的插值方法的时间对比

Tab. 1 The run time contrast using different  $H_{\text{coefficient}}$  and different interpolation method

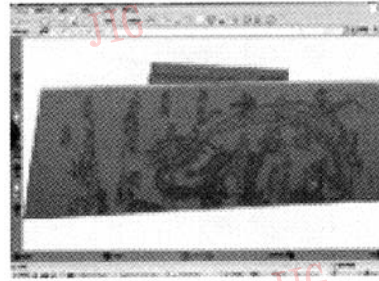
$H_{\text{coefficient}}$ 的值	2	2	2	5
插值方法	双线性插值	邻近插值	双三次插值	线性插值
运行时间 (s)	60.3423	52.9914	96.9406	31.0322

值时,两个三角面片之间的交线比较明显,但用双线性插值时就不会出现这种情况,并且运行时间也较短,可见双线性插值是优于双三次插值的。用邻近插值法是最快的,但生成的图像效果不如双线性插值。样条插值计算量过大,导致内存溢出。

在尝试用两幅图像中更大的三角区域去映射模型以获得更清楚的纹理时发现,在相同平面上用来自两幅图像上的纹理去映射模型时,由于计算的误差会使得三角面片的交线处存在明显的错位(图 9)。所以在同一平面上的纹理最好来自同一张照片。在不同平面上的纹理可以取自不同的图像,但要确保两张图片有相似的光照以免由此产生不真实的视觉效果。



(a) 双线性插值( $H_{\text{coefficient}} = 2$ )



(b) 邻近插值( $H_{\text{coefficient}} = 2$ )



(c) 双三次插值( $H_{\text{coefficient}} = 2$ )



(d) 双线性插值( $H_{\text{coefficient}} = 5$ )

图 8 采用不同的  $H_{\text{coefficient}}$  和不同的插值方法的效果对比

Fig. 8 The effect contrast using different  $H_{\text{coefficient}}$  and different interpolation methods

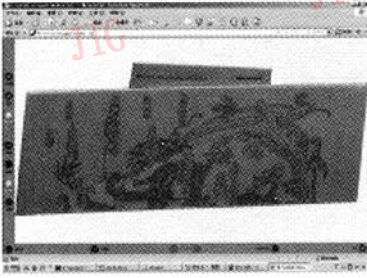


图 9 使用两张图中较大的面片进行贴图

Fig. 9 Texture mapping using the bigger area of the two photos

## 7 结 论

通过投影变换可以去除平面纹理的透视变形,从而纠正纹理以映射 3D 模型。利用相机校准矩阵  $K$ , 以及两视图重建中获得点的 3 维空间坐标, 可以计算出单应矩阵  $H$ 。对  $H$  进行适当的放缩, 利用点的 2 维图像坐标及插值技术对原照片进行插值即可获得纠正的纹理。双线性插值可以获得较好的效果。用两张照片恢复纹理时要注意两者有相似的光照。算法的缺点是若照片上的纹理被遮挡, 则无法生成正确的纹理。本文中只考虑了平面纹理, 曲面可看成是一系列三角形的组合, 但还有待研究。

### 参考文献 (References)

1 Yi Ma, Stefano Soatto, Jana Košecká, et al. An Invitation to 3-D Vision From Images to Geometric Models [M]. New York: Springer-Verlag, 2004: 117 ~ 123.

- 2 Longuet-Higgins H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections [J]. Nature, 1981, 293: 133 ~ 135.
- 3 Hartley Richard. Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003: 25 ~ 63, 239 ~ 241.
- 4 Sun Xiaobing, Sun Jizhou. Simple zoom-lens digital camera calibration method based on EXIF [A]. In: Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE) [C], San Jose, California, USA, 2004: 79 ~ 86.
- 5 Matsuoka R. A study on calibration of digital camera [A]. In: International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing [C], Austria Graz, 2002, 34: B-176.
- 6 Heikkilä J, Silvén O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [A]. In: Proceedings of 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Puerto Rico, 1997: 1106.
- 7 Clarke C, Fryer J G. The development of camera calibration methods and models [J]. Photogrammetric Record, 1998, 16(91): 51 ~ 66.
- 8 Loy Gareth. Planar Rectification and Texture Mapping [EB/OL]. <http://rsise.anu.edu.au/~gareth/vision.htm>, 2002-04-29.
- 9 Ames Andrea L, Nadeau David R, Moreland John L. VRML 2.0 Sourcebook [M]. Translated by Zong Zhifang, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997: 249 ~ 309. [[美] Ames Andrea L, Nadeau David R, Moreland John L 著. VRML 2.0 资源手册 [M]. 宗志方等译, 北京: 电子工业出版社, 1998: 249 ~ 309.]
- 10 Foley J D. Computer Graphics Principles and Practice Second Edition in C (2nd) [M]. Translated by Tang ZeSheng et al. Beijing: China Machine Press, 2004. [[美] Foley J D 著. 计算机图形学原理与实践——C 语言描述 (原书第 2 版) [M]. 唐泽圣等译, 北京: 机械工业出版社, 2004.]
- 11 Sun Jianguang. Computer Graphics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. [孙家广. 计算机图形学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.]