

一种基于双幅图像的物体3维重建

刘晓平 徐伟 余烨

(合肥工业大学计算机与信息学院可视化与协同计算(VCC)研究室,合肥 230009)

摘要 随着虚拟现实技术的发展,对物体进行快速有效建模逐渐成为了研究热点。基于图像建模技术是一种有效的建模方法,其最大的优点是可以利用图像中的信息直接建立物体的几何模型,并且可以迅速构建出具有“照片级”真实感的3维模型。常规的方法是先求解摄像机内外参数,再求解空间中各点在世界坐标系下的位置。提出了一种基于两幅图像利用灭点性质进行建模的新方法。该方法首先利用灭点属性推导出了相机中心在世界坐标系下的坐标位置的解析表达式,再利用两幅图像之间的空间几何约束关系,从空间约束关系中反算出物体各点的空间位置从而重建出物体几何模型,最后进行纹理映射。在物体重建的过程中只利用到了相机内参数,而跳过了对相机外参数的标定,实验结果表明,该方法简单可靠,可用于实现对拥有规则表面的物体3维重建。

关键词 虚拟现实 基于图像建模 几何模型 灭点 相机标定

中图法分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)07-1453-05

Object 3D Reconstruction Based on Image

LIU Xiao-ping, XU Wei, YU Ye

(VCC Division, School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract With the development of virtual reality, 3D reconstruction based on image has drawn increasing attentions. The biggest merit of it is that the posture and texture information can be directly extracted from images to reconstruct geometric models with photo-reality simply and rapidly. The common method calibrates camera in the first step, the calculates space points position in a world coordinate. This paper shows a brand new method which reconstructs models from two images. Firstly, using properties of vanishing points to calculate the position of camera center in the world coordinate. In addition, according to the geometric restriction of the camera, the model posture and position can be acquired. Finally, we extract and rectify the texture from images. In this approach any extrinsic parameters is not needed. The result of experiments proves that the accuracy of this algorithm, and that it can meet the requirement of common object modeling.

Keywords virtual reality, image based modeling, geometry model, vanishing point, camera calibration

1 引言

如何真实地在计算机中表达现实世界一直是计算机图形学的一个重要研究方向。当前的方法一般分为3类:基于几何建模、基于图像建模^[1]以及基于几何和图像混合建模^[2]。其中基于图像建模分为基于标定摄像机的建模和非标定摄像机的建模^[3]。

基于标定摄像机建模的方法首先要在建模前在场景中放置标定物,对摄像机进行标定。所以此方法用在对物体的建模就很受限制。而基于非标定摄像机的建模,不需要在建模前单独对相机进行标定,常用的方法有基于绝对二次曲线或二次曲面的标定方法^[4],基本矩阵或本质矩阵的标定方法^[5]和基于灭点的标定方法^[6]。由于基于非标定相机使用之前无需特定的标定步骤,因此使用起来更为方便。

本文的工作属于基于非标定摄像机的建模中的利用灭点标定相机的范畴。首先利用灭点标定相机,再计算出两幅图像之间的空间位置关系,利用空间位置反算出物体各点的空间位置,最后进行纹理映射从而重建出该物体几何模型。实验表明,该方法简单可靠,完全可以满足虚拟现实系统的建模要求。

2 相关工作

从图像中恢复物体的 3 维模型,最直接的办法是使用深度图像。深度图像不仅包含颜色信息,还包含了深度信息,但因需要由专业设备来获得,使得该方法的应用受到限制。而从普通相片中恢复 3 维模型,都需要对相机进行标定以获得相机的内外部参数。

1990 年, Caprile 等人提出了利用 3 灭点进行相机标定的思想^[6]。Guillou 在 Caprile 思想的基础上从单幅图像中利用两个灭点对相机进行标定,并恢复旋转和平移矩阵的方法。但在恢复平移向量时,需要已知实际线段的长度。此方法的缺点是投影模型过于简单,重建模型的精度不高^[7]。Criminisi 分析了射影变化,并提出在含 3 灭点图像中利用交比不变性(cross-ratio)求直线长度的方法^[8]。Taehee Lee 利用类似的思想实现了一套基于单幅图片的建模的程序,但是操作过程相对复杂^[9]。Debevec 在他的文章中首次使用基于几何和图像混合的建模方法,建模的效果很好,但在建模前需要指定各物体之间的位置关系^[10]。文献[11]中使用两幅图像利用灭点进行相机标定,在相机标定过程中将相机的比例因子 λ 默认为 1,所以对重建后相机矩阵精确度方面造成不稳定。

3 两幅图像之间的约束

3.1 灭点位置的确定

灭点的定义为一组平行线投影后收敛于一点,而测量噪声的存在,图像线段一般不交于唯一的一点。通常灭点被估计为与所有被测量的直线最接近的点。但是,这并不是最优的结果,灭点和线段的最大似然估计(MLE)由真正相交于一点的直线集合确定,如图 1 所示,将测量线段的两端点到直线集合的垂直距离的平方和最小化。该最小化算法采用

Levenberg-Marquardt 算法来计算。文章限于篇幅,不再详述。有兴趣的读者,可以参看文献[12]。

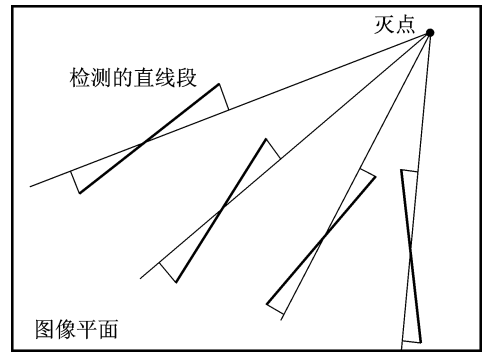


图 1 灭点位置的确定

Fig. 1 Vanishing point detection

3.2 相机内参数标定

相机标定参数分为内部参数(焦距、畸变因子、相机投影中心等)和外部参数(旋转和平移矩阵),此处使用理想的针孔模型来近似实际相机。针孔模型的几何关系实际上就是一种透视投影,畸变因子为零。假设空间中相机中心位置为 O 点,图像中 3 个主灭点分别为 u, v, w ,相机的投影中心为 Δuvw 的垂心,设为 k 点,在图像上的像素齐次坐标为 $(k_1, k_2, 1)^T$,3 个主灭点的图像上的像素齐次坐标分别记为 $(u_1, u_2, 1)^T, (v_1, v_2, 1)^T, (w_1, w_2, 1)^T$ 。则可以通过下式计算出相机焦距 f 。

$$\begin{cases} \vec{Ou} \cdot \vec{Ov} = 0 \\ \vec{Ov} \cdot \vec{Ow} = 0 \\ \vec{Ou} \cdot \vec{Ow} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (u_1 - k_1) \cdot (v_1 - k_1) + (u_2 - k_2) \cdot (v_2 - k_2) + f^2 = 0 \\ (w_1 - k_1) \cdot (v_1 - k_1) + (w_2 - k_2) \cdot (v_2 - k_2) + f^2 = 0 \\ (u_1 - k_1) \cdot (w_1 - k_1) + (u_2 - k_2) \cdot (w_2 - k_2) + f^2 = 0 \end{cases}$$

由此便得到了相机内参数,而文章中所提出的方法只需使用到相机的内参数,所以对相机外参数就不再进行计算。

3.3 计算相机中心在世界坐标系下的位置

为了方便理解,规定小写字母表示图像平面点,大写字母表示对应的空间中的点。如图 2 所示,世界坐标系原点为 A 点, x, y, z 轴方向如图所示, O 为摄像机中心位置, u, v, w 为世界坐标 x 轴, y 轴和 z 轴在图像平面(image plane)上的灭点,地面为一参考平面(reference plane)。利用灭点性质可知:

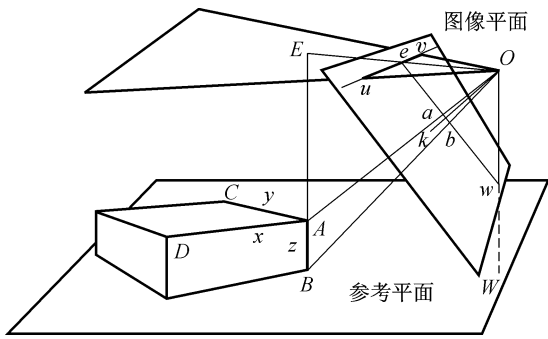


图 2 相机的空间位置
Fig.2 Camera space geometry

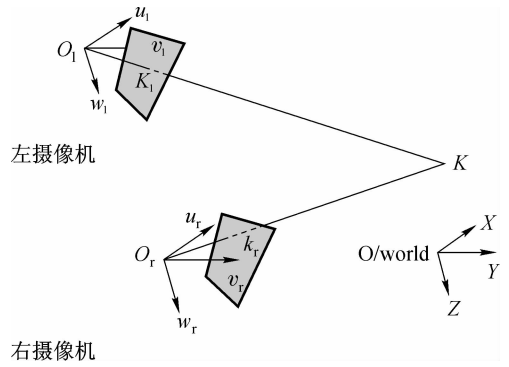


图 3 双幅图像的空间关系
Fig.3 Space relationship between two images

$\vec{O}u // \vec{A}D$ (x 轴); $\vec{O}v // \vec{A}C$ (y 轴); $\vec{O}w // \vec{A}B$ (z 轴) \Rightarrow 平面 $Ouw //$ 平面 $ACD //$ reference plane

为了方便推导出后续性质,做以下的辅助线:延长线段 Ow 与参考平面交于 W 点;延长线段 BA 与平面 Ouw 交于 E 点,连接 OE 交 uw 于 e 点。则可推出:

a, b, e, w 4 点共线

$$\|\vec{B}E\| = \|\vec{O}W\| \quad \vec{O}W // \vec{A}B \text{ (} z \text{ 轴)}$$

$\vec{O}W \perp$ reference plane $\Rightarrow \|\vec{O}W\|$ 即为相机中心 O 点与参考平面之间的垂直距离^[8]。

若 $\|\vec{A}B\|$ 已知,则可以推出:

$$\|\vec{O}A\| = \|\vec{A}B\| \times \sin \angle ABO / \sin \angle AOB$$

$$\|\vec{O}E\| = \|\vec{O}A\| \times \cos \angle AOE$$

而 $\angle ABO = \angle bOw = a \cos \left(\frac{bO^2 + Ow^2 - bw^2}{2bO \cdot Ow} \right)$, 而

$bO = \sqrt{Ok^2 + bk^2} = \sqrt{f^2 + bk^2}$; 同理可以求出 Ow , 这样就可以求出 $\angle ABO$ 的大小, 同理利用 $\angle AOB = \angle aOb$, $\angle AOE = \angle aOe$ 可以求出 $\angle AOB$, $\angle AOE$, 最后通过上面所提方法, 确定 3 维空间中直线段 $\|\vec{O}E\|$ 的长度。

由此可以推出此时的相机中心 O 点的世界坐标为 $(-\|\vec{O}E\| \times \cos \angle eou, -\|\vec{O}E\| \times \sin \angle eou, -\|\vec{O}E\| \times \tan \angle aoe)$ 。

3.4 两幅图像空间位置约束关系

设世界坐标系位置在 $O/world$ 点, 坐标系设置如图 3 所示, 左右摄像机位置分别为在如图所示的 O_l 和 O_r , u_l, v_l, w_l 为左摄像机的 x 轴, y 轴和 z 轴灭点方向, u_r, v_r, w_r 为右摄像机的 x 轴, y 轴和 z 轴灭点方向。则对两摄像机的 x 轴灭点方向所以可以得出下面的结论。

由灭点属性: 相机光心与灭点的连线与形成该灭点的空间平行线平行^[6,11]。

左视图可以得出: $\vec{O}_l u_l // x$ 轴; 右视图可以得出: $\vec{O}_r u_r // x$ 轴;

由于平行于同一条直线, 则可以推出: $\vec{O}_r u_r // \vec{O}_l u_r$

同理 y, z 轴灭点方向也有相同的性质: $\vec{O}_l v_l // \vec{O}_r v_r$; $\vec{O}_l w_l // \vec{O}_r w_r$ 。

即左右相机的灭点方向在空间中是平行关系。利用这个约束就可以进行物体 3 维重建, 物体 3 维重建主要是计算物体各点的在世界坐标系下的空间位置。如图 2 所示计算空间中任一点 k 在世界坐标系下的坐标, 设 K 点在左右摄像机的成像平面上的位置分别为 k_l, k_r 点。由于左右摄像机的空间位置可以由前所述的方法被计算出来, \vec{O}_l, K 可以用 O_l 世界坐标和 \vec{O}_l, k_l 方向的点法式方程来表示, 同理 \vec{O}_r, K 也可以表示为 O_r 世界坐标和 \vec{O}_r, k_r 方向的点法式方程。则反求 K 点的空间位置即为求空间中两条直线 $(\vec{O}_l, k_l$ 和 $\vec{O}_r, k_r)$ 的交点位置。同理若已知该点在两张以上图像上的位置, 可以利用 Levenberg-Marquardt 算法^[12] 来减小交点位置的误差。

4 算法步骤

- (1) 设定世界坐标系的位置, 包括世界坐标原点, 坐标轴方向;
- (2) 分别标定拍摄这两幅图像时相机的相关属性, 包括两张图像的相机中心在世界坐标系下的位置, 相机的焦距, 及两幅图像的空间约束关系;
- (3) 给出物体在两幅图像中对应点的图像坐

标,利用两幅图像的空间约束关系,计算出这些点的空间位置,以此来恢复出物体的几何模型;

(4)对建立好的几何模型进行纹理映射,使用 Opendgl 显示。

5 实验结果及分析

通过上文的分析,可以看出,本文所提出的标定方法在数学推导过程中是完全正确的。下面文章从实验方面,用实验来证明文章方法的正确性和有效性。利用上述方法,对物体进行了重建,重建效果如图 4、图 5 所示。其中将黄底蓝圈大号标记点作为世界坐标原点,(a)、(b)为源图像及点线标注,(c)、(d)为重建效果。选出了若干条边的重建进行分析,如图 4、图 5 中分别设白色箱子和桌子高度为基准,记为 1,则实际物体上各边的比例长度和重建后物体边之间的比例长度也如表 1 和表 2 所示。

由表 1 和表 2 可以看出,所提算法的重建的精度较高,可以满足虚拟现实的快速建模需要。笔者对文章中的误差研究认为,整体的误差是由 3 个阶段的误差累积产生的。(1)计算灭点阶段,灭点的位置的判断所产生测量误差的直接影响到最后标定的效果。为了减少原始误差,在测定灭点时,采用 Levenberg-Marquardt 算法来计算灭点位置。(2)利用两幅图像的空间约束关系,在计算 3 维空间中坐标点的坐标时会产生测量误差和舍入误差。(3)图像光栅化生成相片所造成的原始误差,这个误差无法消除,同时此误差也是精确度影响最大的误差。实际使用中若选用更高分辨率的相机进行拍摄,也可以有效减少测量误差和光栅化误差,从而提高重建的精度,此处使用 SONY DSC-H11 拍摄的 $2\ 592 \times$

1 944 像素的图片作为实验对象。



图 4 箱子的重建

Fig. 4 Reconstruction of boxes



图 5 桌子的重建

Fig. 5 Reconstruction of table

表 1 图 4 中边的长度比值

Tab.1 Length rates in Fig. 4

真实物体	1	0.464	0.911	0.911	0.464	0.466	0.634	0.625
重建效果	1	0.480	0.931	0.934	0.482	0.435	0.612	0.645
误差率(%)	—	3.45	2.19	2.52	3.88	6.65	3.47	3.20

表 2 图 5 中边的长度比值

Tab.2 Length rates in Fig. 5

真实物体	1	1.565	0.722	0.722	1	0.32	0.24	0.16
重建效果	1	1.626	0.759	0.760	0.956	0.302	0.230	0.153
误差率(%)	—	3.89	5.12	5.26	4.40	5.62	4.17	4.37

6 结 论

提出一种基于两幅图像利用灭点性质进行物体的3维重建的方法。该方法的贡献是:(1)推导出利用灭点属性计算相机中心在世界坐标系下位置的步骤;(2)由灭点属性和相机中心位置得出两张照片的空间约束关系。方法最后由约束关系利用三角形法对所拍摄的物体进行3维重建。整个流程只是通过灭点计算出相机的内参数,不需要特别的标定物也不需标定相机外参数。实践证明,该方法计算过程简单,计算精度较好可以满足对普通物体建模的需要。

本文方法的建模思想是通过计算若干个点的3维位置来进行物体的重建,所以对表面比较规整、不含有曲面的物体进行建模时会有比较好的效果。但该方法的不足之处在于在标定之前需要先计算两幅图像的灭点位置,此外由于无法看见物体的背面,所以只能对所见面进行建模。同时文章中使用的是以针孔摄像机为模型进行的标定,没有考虑到非针孔摄像机情况下造成的拍摄图像扭曲等因素。因此在保证精度要求的同时,简化建模步骤;通过多角度的拍照,利用多视图几何约束,减少因图像扭曲所造成的误差,并对整个物体进行全角度的重建便成为下一步研究的目标。

致 谢 文章的内容源于作者在合肥工业大学计算机学院VCC研究室从事的工作,在此向在VCC研究室的其他老师和同学的帮助和建议表示感谢!

参考文献 (References)

- 1 Cipolla R, Drummond T, Robertson D. Camera calibration from vanishing points in images of architectural scenes [A]. In: Proceedings of British Machine Vision Conference [C], Nottingham, English, 1999: 382-391.

- 2 Debevec P, Yu Yi-zhou, Borshukov G. Efficient viewdependent image-based rendering with projective texturemapping [A]. In: Proceedings of the Eurographics Rendering Workshop [C], Vienna, Austria, 1998: 105-116.
- 3 Kanatani K, Sugaya Y. Statistical optimization for 3-D reconstruction from a single view [A]. In: Proceedings of the Conference on Machine Vision Applications [C], Tsukuba Science City, Japan, 2005: 189-192.
- 4 Yang Chang-jiang, Sun Feng-mei, Hu Zhan-yi. Self-calibration of rotating camera using conic correspondences [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(3): 310-317. [杨长江, 孙凤梅, 胡占义. 基于二次曲线的纯旋转摄像机自标定 [J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 310-317.]
- 5 Michitaka Hirose. Image-based virtual world generation [J]. IEEE Multimedia, 1997, 4(1): 27-33.
- 6 Caprile B, Torre V. Using vanishing points for camera calibration [J]. International Journal of Comput Vision, 1990, 4(2): 127-140.
- 7 Guillou E, Meneveaux D, Maisel E, et al. Using vanishing point for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image [J]. The Visual Computer, 2000, 16(7): 396-410.
- 8 Criminisi A, Reid I, Zisserman A. Single view metrology [A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision [C], Corfu, Greece, 1999: 434-442.
- 9 Taehee Lee, Brynjar Gretarsson. 3D Models from a single view image [A]. In: Proceedings of the CS290I Digital Imaging, Winter Quarter [C], California State Polytechnic University, Pomona, USA, 2006: 1-12.
- 10 Paul Debevec, Camillo Taylor, Jitendra Malik. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry and image-based approach [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH [C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996: 11-20.
- 11 Yu Ye, Luo Yue-tong. The 3D object reconstruction using vanishing point [A]. In: Proceedings of the Progress of Computer Technology and Application [C], Ningbo, China, 2007: 66-70. [余烨, 罗月童. 一种基于灭点的相机标定方法 [A]. 全国第18届计算机科学与技术应用学术会议 [C], 宁波, 2007: 66-70.]
- 12 More Jorge. The Levenberg-marquardt Algorithm, Implementation and Theory. In GA. Watson, editor, Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics 630 [M]. New York: Springer-Verlag, 1977.