

自由拍摄视点下的可见外壳生成算法*

刘钢^{1, 2} 王章野¹ 彭群生^{1, 2}

1 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027

2 浙江大学数学系, 杭州 310027

摘 要 作为一种重要的基于图像建模方法, 利用侧影轮廓线信息的可见外壳建模方法正在受到广泛的关注. 以往方法大多采用固定位置的已定标相机或借助机械转台等装置辅助定标, 因此对图像的拍摄方位和重建场景的规模都产生了一定的限制. 本文给出了一种使用自由运动的手持相机拍摄得到的多幅图像构造可见外壳的方法, 从而可以非常灵活地获取某些较大规模的室外场景的几何模型. 实验结果表明, 利用本文方法生成的可见外壳模型准确真实, 能够满足虚拟现实等应用中的要求.

关键词 基于图像建模 可见外壳 自由视点 视点相关纹理映射

1 引 言

在采用基于图像方法生成物体的三维模型时, 物体投影在图像平面上的侧影轮廓线是理解物体几何形状的一条重要线索. Laurentini 最早提出了可见外壳的概念^[1], 简单地说, 可见外壳就是由空间物体的所有已知侧影轮廓线决定的该物体的空间包络. 一般而言, 当拍摄视角足够多时, 可见外壳就可以被认为是空间物体的一个合理的逼近. 作为一种重要的基于图像建模方法, 可见外壳建模技术可以仅仅利用由普通相机(摄像机)拍摄得到的多幅亮度图像(视频)生成静态或动态的复杂曲面模型^[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], 因此得到了计算机图形学研究者的广泛关注. 在可见外壳建模方法中, 一个重要的问题就是相机的定标, 即确定每一幅参考图像所对应的相机的拍摄方位和取景参数. 以往方法大多采用固定位置的已定标相机或借助机械转台等装置辅助定标, 因此对图像的拍摄方位和重建场景的规模都产生了一定的限制, 进而使得已获取的侧影轮廓线无法反映某些重要的几何特征, 并可能使几何模型表面的重建纹理存在较大的缺陷. 鉴于上述原因, 本文给出了一种使用自由运动的已定标相机拍摄的多幅图像构造可见外壳的方法, 该方法克服了使用固定位置相机以及利用机械转台辅助定标等带来的诸多问题, 从而可以非常灵活地获取某些较大规模的室外场景的几何模型.

2 多幅参考图像拍摄方位的确定

给定采用自由运动的已定标相机^[11]拍摄的多幅图像, 为了利用这些参考图像生成物体的可见外壳, 关键在于确定拍摄这些参考图像时相机的空间方位. 为此, 本文首先选取图像序列中的两幅图像建立一

* 本课题得到国家自然科学基金(60033010)和国家重点基础研究发展规划(2002CB312101)资助. 刘钢, 男, 1975 年生, 博士研究生, 主要研究方向为基于图像的建模和绘制、计算机图形学、计算机视觉与可视化等. 王章野, 男, 1965 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为计算机图形学、图像处理、红外成像仿真技术等. 彭群生, 男, 1947 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、红外仿真成像技术等.

个初始的重建框架, 进而将后续图像逐一加入上述框架, 从而确定图像序列中每一幅参考图像的拍摄方位。

为了建立初始重建框架, 我们首先需要选取两幅图像并利用其上的对应特征点求出它们之间的基础矩阵。鉴于本文所使用的多幅测试图像的拍摄位置相距较远, 传统的特征点自动检测和匹配方法一般难以取得很好的效果, 因此, 我们采用手工交互的方式拾取若干对对应特征点。又由于获得精确的基础矩阵对本文方法具有重要的意义, 我们采用了 LMedS 方法来求解基础矩阵^[12], 从而减少了一些不准确特征点对求解结果的影响。此外, 正如 Hartley 所指出的, 在求解基础矩阵之前对特征点的像素坐标进行归一化处理可以有效地提高求解精度^[13]。得到基础矩阵后, 我们就可以建立初始重建框架。假定两幅图像所对应的内参矩阵分别为 \mathbf{K} 和 \mathbf{K}' , 不妨令第一幅图像的相机坐标系与世界坐标系重合, 并令第二台相机相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量分别为 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} , 则两台相机的投影矩阵可分别表示为 $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{I} | \mathbf{0}]$ 和 $\mathbf{P}' = \mathbf{K}'[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$, 对它们分别加以变换, 即可以得到归一化的投影矩阵 $\mathbf{P}_{cam} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{P}$ 以及 $\mathbf{P}'_{cam} = \mathbf{K}'^{-1}\mathbf{P}'$ 。又设两幅图像间的基础矩阵为 \mathbf{F} , 则对两幅图像间的本质矩阵 $\mathbf{E} = \mathbf{K}'^T \mathbf{F} \mathbf{K}$ 进行奇异值分解, 即 $\mathbf{E} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T$, 就可得到第二台相机的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} :

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{U} \mathbf{W} \mathbf{V}^T \quad \text{或} \quad \mathbf{U} \mathbf{W}^T \mathbf{V}^T \\ \mathbf{t} &= \mathbf{u}_3 \quad \text{或} \quad -\mathbf{u}_3 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathbf{u}_3 是矩阵 \mathbf{U} 的最后一列, 且

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

这样, 我们就得到了 \mathbf{P}'_{cam} 关于 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 的四种组合。事实上, 上述几种组合中只有一种是具有正确几何意义的解, 我们可以通过考察某一重建空间采样点相对于两台相机的空间位置来找出这个正确的解, 即只有当该点同时位于两台相机的镜头前方时才是有效的解, 此时的 \mathbf{P}'_{cam} 也就是正确的投影矩阵。至此, 我们就可以确定出第一台和第二台相机的投影矩阵, 进而利用两幅图像上的对应特征点重建出更多的空间采样点。

接下来我们就可以将后续图像逐一加入到上述重建框架中去。具体地, 只要已知若干重建采样点和后续图像中二维特征点的对应关系(至少 6 对), 我们就可以容易地求出后续图像的投影矩阵 $\mathbf{P}_k (k \geq 3)$ 。需要指出的是, 在加入后续图像的过程中, 我们可以利用新加入图像中含有的二维特征点与已加入图像中含有的二维特征点间的对应关系重建出若干新的空间采样点, 这些采样点同样可以被用于确定后续图像的投影矩阵。在实际处理过程中, 每加入一幅新的图像, 我们还可以对原有的重建进行更新: 对于每一个已经重建的空间采样点 \mathbf{M} , 若在新加入的图像中再次出现了与其对应的二维特征点, 则可利用下面的加权迭代求解方法对该空间点的三维坐标进行更新:

$$\frac{1}{\mathbf{P}_{k3} \mathbf{M}} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{k3} \mathbf{u}_k - \mathbf{P}_{k1} \\ \mathbf{P}_{k3} \mathbf{v}_k - \mathbf{P}_{k2} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{M}} = 0, \quad (3)$$

其中 \mathbf{M} 和 $\hat{\mathbf{M}}$ 分别是上次和本次迭代的解, $\mathbf{P}_{ki} (i=1,2,3)$ 是 \mathbf{P}_k 的第 i 行, (u_k, v_k) 是与重建采样点对应的图像特征点的坐标(若存在的话)。一般而言, 上述迭代过程仅需迭代几次即可得到满意的解。重复以上过程, 我们就可以将所有的参考图像都关联起来。最后, 我们还可以对重建结果进行集中优化, 集中优化的目标是通过已经求出的所有投影矩阵 \mathbf{P}_k 和三维空间点 \mathbf{M}_i 进行精化调整, 使得所有图像特征点 \mathbf{m}_{ki}

到重建采样点在图像平面上的投影点 $P_k(M_i)$ 的距离的平方和最小:

$$\min_{P_k, M_i} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n D(m_{ki}, P_k(M_i))^2. \quad (4)$$

此时, 我们可以使用 Levenberg-Marquardt 方法^[14]对上式进行优化求解。经过这样的优化调整之后, 我们就得到了所有参考图像的投影矩阵。

3 可见外壳的构造

在得到了各幅参考图像的投影矩阵之后, 我们就可以开始重建物体的可见外壳。此时, 我们首先采用手工交互的方式得到物体在每一幅图像上的侧影轮廓线; 进而采用文献[5]中给出的算法生成物体的可见外壳, 该算法可以简化可见外壳生成算法中复杂的求交过程并能自然地保证重建模型的密闭性; 最后, 我们还采用了视点相关的纹理映射方法对重建模型进行纹理映射^[7]。

4 算法实现与结果

我们已经在 PC 机上用 C++语言实现了上述自由拍摄视点下的可见外壳生成算法, 并对一些实例进行了测试, 图 1 中给出了采用本文方法得到的两个测试实例的实验结果。由实验结果可以看出, 采用本文方法得到的可见外壳模型具有较高的重建精度, 经过纹理映射后具有高度的真实感, 从而完全可以满足虚拟现实等应用中的要求。

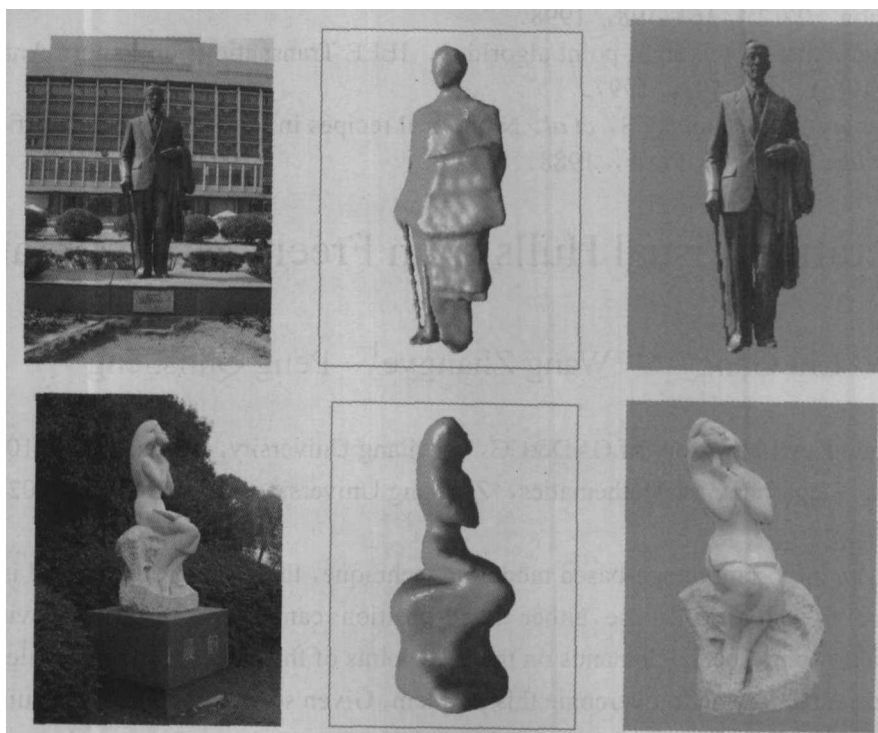


图 1 基于实拍图像的可见外壳建模实例: 左图为多幅参考图像中的一幅; 中间图为重建的几何模型; 右图为添加纹理后的绘制结果。

参 考 文 献

- [1] Laurentini A. The visual hull concept for silhouette based image understanding. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(2), 150–162, 1994.
- [2] Chien C H, Aggarwal J K. Identification of 3D objects from multiple silhouettes using quadtrees/octrees. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 36, 256–273, 1986.
- [3] Potmesil M. Generating octree models of 3D objects from their silhouettes in a sequence of images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 40(1), 1–29, 1987.
- [4] Szeliski R. Rapid octree construction from image sequences. *CVGIP: Image Understanding*, 58(1), 23–32, 1993.
- [5] 刘钢, 王锐, 鲍虎军, 等. 一种可见外壳生成算法. *软件学报*, 13(9), 1823–1829, 2002.
- [6] Matusik W, Buehler C, Raskar R, *et al.* Image-based visual hulls. In: *Proceedings of SIGGRAPH '00*, New Orleans, Louisiana, 2000. 369–374.
- [7] Matusik W, Buehler C, McMillan L. Polyhedral visual hulls for real-time rendering. In: *Proceedings of Twelfth Eurographics Workshop on Rendering*, Vienna, Austria, 2001. 115–125.
- [8] Matusik W, Pfister H, Ngan A, *et al.* Image-based 3D photography using opacity hulls. In: *Proceedings of SIGGRAPH'02*, San Antonio, Texas, 2002. 427–437.
- [9] Moezzi S, Katkare A, Kuramura D Y, *et al.* Reality modeling and visualization from multiple video sequences. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(6), 58–63, 1996.
- [10] Gross M, Würmlin S, Naef M, *et al.* blue-c: A spatially immersive display and 3D video portal for telepresence. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), 819–827, 2003.
- [11] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334, 2000.
- [12] Zhang Z. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review. *International Journal of Computer Vision*, 27(2), 161–198, 1998.
- [13] Hartley R. In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(6), 580–593, 1997.
- [14] Press W, Flannery B, Teukolsky S, *et al.* *Numerical recipes in C: The art of scientific computing*. New York: Cambridge University Press, 1988.

Generating Visual Hulls from Freely Moving Camera

Liu Gang^{1, 2} Wang Zhangye¹ Peng Qunsheng^{1, 2}

¹ State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027

² Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract As an important image-based modeling technique, the visual hulls method is attracting great attentions. Since previous work use either fixed-position cameras or rotation devices to simplify calibration, it makes some special demands on the viewpoints of the cameras and the scale of the scene. In this paper, we present a method to overcome this problem. Given some photographs acquired with a freely moving camera, our method can obtain realistic models of some large-scale outdoor scenes. Practice shows the results are correct and reliable so as to meet the requirements of virtual reality applications.

Keywords Image-based modeling; visual hull; free viewpoint; view-dependent texture mapping