

# 基于 shape from silhouette 方法的虚拟人体构造

沈军行 孙守迁 黄琦 潘云鹤

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

(浙江大学计算机科学与工程系, 杭州 310027)

**摘要** 逼真的人体三维模型(虚拟人体)在产品的设计、计算机动画、虚拟现实等领域都有着广泛的需求。为此,提出了一种基于 shape from silhouette 的人体三维模型构造方法。该方法所需要的器材只是一个普通的数码相机,通过从不同角度对人体进行拍摄,然后经过摄像机定标、体积生成、表面重建、纹理映射后就可重建出逼真的人体三维模型。实验结果表明,此方法精度较高,整个过程简单快捷,是一种非常实用的方法。

**关键词** 虚拟人体 三维重建 Shape from Silhouette 摄像机定标 表面重建 纹理映射

**中图分类号:** TP391.41 TP391.9 **文章标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)10-1089-05

## Virtual Human Construction Based on Shape from Silhouette Method

SHEN Jun-xing, SUN Shou-qian, HUANG Qi, PAN Yun-he

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

(Computer Science and Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** Realistic 3D Models of Humans are widely demanded in many fields such as production design, computer animation and virtual reality. A low cost method based on shape from silhouette is presented to construct a virtual human. Only one digital camera is used to take photos of a human from different position. Each view is calibrated individually with a calibration pattern placed on the ground. From these obtained calibrated camera views, the volume model of a person is estimated using shape-from-silhouette approach. An algorithm of surface reconstruction is used to extract the surface of the person from volume model. After texture mapping with original camera views, the realistic 3D Model of the person is obtained. In order to make the result model more realistic, some advanced techniques like texture filtering and texture synthesis are applied to the textured 3D model. Compared with some active scanning methods such as laser scanning and structured lights, the running experiment results show that this approach is very efficient and the accuracy is good enough.

**Keywords** Virtual human, 3D reconstruction, Shape from silhouette, Camera calibration, Surface reconstruction, Texture mapping

## 0 引言

用于重建人体三维模型的人体三维扫描仪在 20 世纪 90 年代中后期才开始在市场上出现,而且仅限于美、日、德、法、英等国。这些人体扫描仪一般采用的都是主动技术,包括激光扫描和结构光方法

等。如 WB4 系统运用激光扫描,在 17s 内,即可获得人体全身 400 000 个点的三维坐标和纹理信息。该系统运用 8 个激光二极管从不同方向发射激光线条,由反射镜、摄像机组成的 4 个扫描头用来检测射在人体上的激光线条,根据激光线条在人体上的变形情况计算出人体上各点的三维坐标,同时获得该点的颜色信息。4 个扫描头安装在 2 个固定的塔架上,

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(863 511-942-016)

国家计委产业化前期关键技术与成套设备研制开发资助项目(计高技[1998]2077)

收稿日期:2001-12-10;改回日期:2002-03-06

另有传动装置上下移动这 4 个扫描头,从而实现对人体全身扫描。采用类似技术的还有 Voxelan、BL (红外线)、VITUS pro & VITUS smart。另外也有一些人体三维扫描仪运用结构光方法,如 TriForm, [TC]<sup>2</sup>, SYMCAD 等<sup>[1]</sup>。

这些人体三维扫描仪一般都有较高的精度,但同时价格又非常昂贵,一般都需几十万美金,因此很难大规模地投入使用。于是寻求一种相对廉价但又有足够精度的人体三维扫描技术,便成为人们研究的目标。基于 Shape from Silhouette 方法的虚拟人体构造技术就能很好地满足这两方面的要求。

区别于激光扫描和结构光方法,Shape from

Silhouette<sup>[2,3]</sup>是一种被动技术,即不需要投射任何附加光到扫描对象上。该方法所利用的只是图象中保留的人体轮廓信息,通过体积相交获得人体的体积模型,而后经过表面重建和纹理映射就可重构出逼真的人体三维模型。

### 1 测量环境

Shape from Silhouette 方法需要从不同角度对人体拍摄,有如图 1 所示的 3 种不同的方式来进行拍摄。

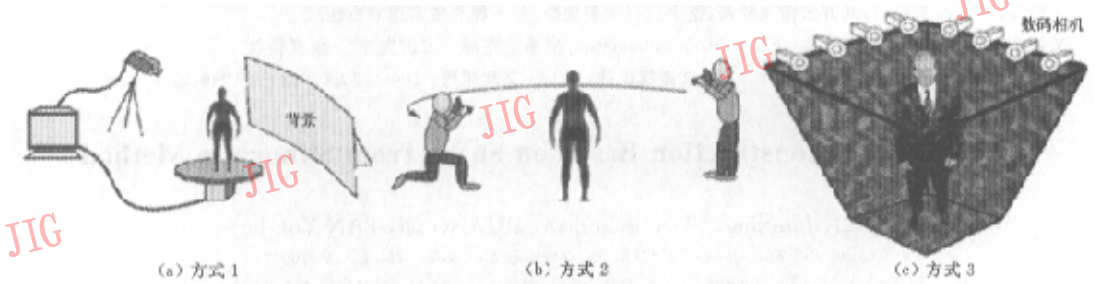


图 1 3 种拍摄方式

第 1 种方式采用一个摄像机,而人体站在转台上,转台的转动和摄像机的拍摄过程受一台计算机控制;第 2 种方式也采用一个摄像机,但人体静止不动,而是由摄像机自由移动,从不同角度对人体摄像;第 3 种方式采用多个摄像机,这些摄像机分布于人体周围,同时对人体摄像。这 3 种不同的拍摄方式具有各自的优缺点:第 2 种方式配置最简单,自由度最大,但每次拍摄时,摄像机都要重新定标;第 1 种和第 3 种方式虽然只需进行一次摄像机定标,但由于转台或多摄像机系统的采用,增加了设备开销和系统复杂度;第 3 种方式拍摄速度最快,可同时获得不同角度的人体图象,避免了前两种方式在拍摄过程中由于人体的活动引入的误差。为了节省器材经费,在实验过程中,采用了第 2 种拍摄方式。

每一种拍摄方式中的摄像机都需要进行定标,摄像机定标的准确与否,对最后的结果有着至关重要的影响。采用的定标方法是在文献[4]中提出的,其定标模板如图 2 所示。

### 2 体积生成

在所拍摄的人体图象中,将人体和背景分离,形

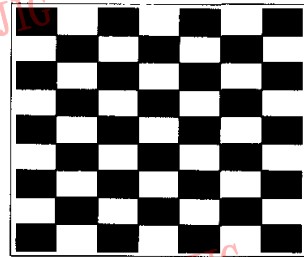


图 2 摄像机定标模板

成剪影图。从每一个摄像机的焦点出发,通过各轮廓点的视线在后面形成一个锥形的体积,各个锥形体积相交就形成人体三维体积模型,这就是体积生成的原理,如图 3 所示。

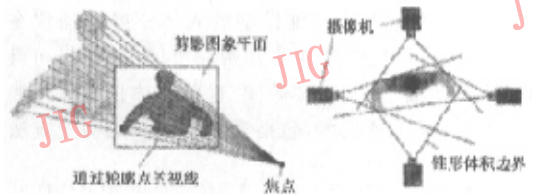


图 3 体积生成原理图

这个体积合理的表示必须能降低复杂度和提高运算速度. 一个行之有效的办法是八叉树表示<sup>[3]</sup>, 下面给出的方法, 首先确定物体的三维包围盒, 包围盒由条柱组成, 而条柱由单位立方体组成, 每个条柱是由它顶上和底下的单位立方体中心点来表示的(如图 4 所示); 然后确定每个条柱的哪些部分位于人体中, 为此, 将每个条柱连续地投影到所有剪影图中, 检测其相交部分进而分割条柱, 确定其位于人体内部的哪部分; 最后的体积模型就由这些经分割后的条柱来表示, 其过程如下:

- (1) 表示条柱的三维点投影到剪影图所在的图象平面, 如图 5(a)所示;
- (2) 图象平面上用直线连接投影点, 如图 5(b)所示;
- (3) 在直线上去除位于剪影图外面的点, 从而将该连接直线分割为新的直线段, 如图 5(c)所示;
- (4) 根据这些新的二维直线段, 分割条柱, 如图 5(d)所示.

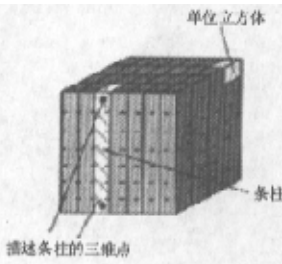


图 4 主要条柱组成的包围盒

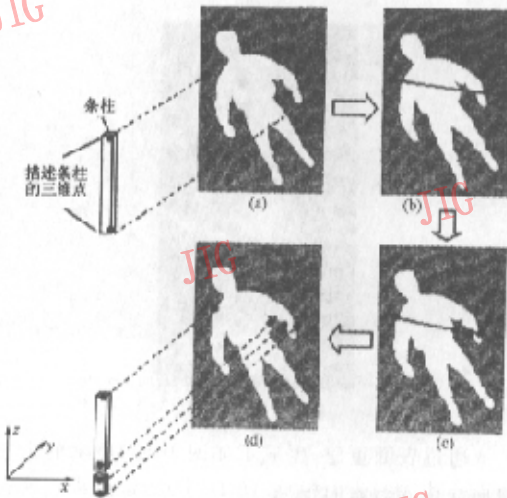


图 5 用条柱表示的体积生成过程

### 3 表面重建

从生成的体积模型中, 容易获得位于人体表面的点集, 设为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . 对每一点  $x_i$ , 分别对应一个平面  $T(x_i)$ , 几何上  $T(x_i)$  为曲面  $M$  在  $x_i$  处的线性逼近(见图 6), 在此称  $T(x_i)$  为点  $x_i$  处的微切平面,  $T(x_i)$  由中心点  $o_i$  和单位法矢  $n_i$  确定. 即  $T(x_i) = (o_i, n_i)$ .

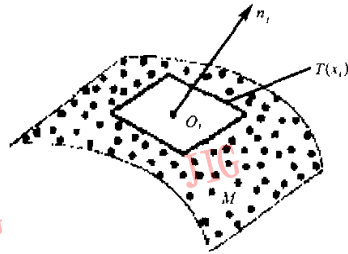


图 6 点  $x_i$  处的微切平面

由于曲面局部区域的形状信息包含在该区域的散乱点集中,  $x_i$  处的微切平面  $T(x_i)$  显然由  $x_i$  的邻近点集确定. 对于  $x_i \in X$ , 称  $X$  中距离  $x_i$  最近的  $k$  个点为点  $x_i$  的  $k$  邻域点集, 记为  $N(x_i) = \{p_1, \dots, p_k\}$ ,  $x_i$  处的微切平面  $T(x_i)$  由  $x_i$  的  $k$  邻域点集  $N(x_i)$  确定. 然后, 用  $N(x_i)$  的最小二乘逼近  $T(x_i)$ <sup>[5]</sup>, 设

$o_i = \sum_{j=1}^k p_j / k, p_j \in N(x_i)$ , 其到  $T(x_i)$  的距离  $d_j = n_i^T (p_j - o_i) = (p_j - o_i)^T n_i (j=1, 2, \dots, k)$ . 构造目标函数  $f$  来表示  $N(x_i)$  中的点到  $T(x_i)$  的距离平方和

$$f = \sum_{j=1}^k d_j^2 = \sum_{j=1}^k n_i^T (p_j - o_i) (p_j - o_i)^T n_i$$

$$= n_i^T \left( \sum_{j=1}^k (p_j - o_i) (p_j - o_i)^T \right) o_i \quad (1)$$

通过对目标函数  $f$  求极小值, 可以得到微切平面的未知量  $T(x_i)$  的法矢量  $n_i$ , 为计算  $n_i$  的值, 先构造协方差矩阵

$$C = \sum_{j=1}^k (p_j - o_i) (p_j - o_i)^T, \text{ 其中 } p_j \in N(x_i) \quad (2)$$

容易证明, 当  $n_i$  取  $C$  的最小特征值对应的单位特征向量时,  $f$  取到极小值(即为  $C$  的最小特征值).

为空间中的每个抽样点  $s$  定义一有向距离函数  $g(s)$  表示  $s$  到待构人体表面  $M$  的有向距离.  $g(s)$  的计算过程为:

- (1) 将  $s$  投影到各剪影图象平面, 判断  $s$  是否位

于人体内部,定义

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } s \text{ 在人体内部} \\ -1 & \text{如果 } s \text{ 在人体之外} \end{cases}$$

(2) 搜索距离点  $s$  最近的微切平面  $T(x_i)$ , 即  $T(x_i)$  中心点  $o_i$  到空间点  $s$  的距离最短;

(3) 由于  $T(x_i)$  是待构曲面  $M$  的线性逼近, 因此可以用点  $s$  到  $T(x_i)$  的有向距离近似点  $s$  到曲面  $M$  的有向距离. 由点到平面距离关系可得  $g(s) = \text{sgn}(s) |(s - o_i) \cdot o_i|$ .

在有了有向距离函数之后就可利用 Marching Cubes 方法提取出  $g(s) = 0$  的等值面, 此等值面即是人体表面  $M$  的近似.

#### 4 纹理映射

表面重建的结果是用三角面片表示的人体表面模型. 为了能逼真地再现人体表面, 还需要进行纹理映射, 表面上的每个三角形都必须从拍摄的某一幅图象中取得纹理. 每个表面三角形对应到观察方向和表面三角形法向量夹角最小的摄像机所拍摄的图象上, 然后根据摄像机参数将此表面三角形投影到图象上(如图7所示), 从而取得该表面三角形的纹理图和纹理坐标.

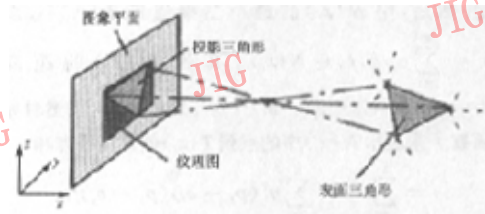


图7 为每个表面三角形赋纹理信息

由于人体各部位之间存在遮挡关系, 而拍摄也只是从有限数目的几个位置和角度对人体进行, 因此在所重建的人体表面上必然存在一些三角面片在所有的摄像图象中都是不可见的, 从而无法从拍摄的图象中为这些三角面片指定纹理. 另外, 两个相邻表面三角形的纹理可能来自不同的摄像图象, 而不同图象在拍摄时的光照条件不可能完全相同, 从而这些相邻表面三角形的边界将会呈现一些不和谐, 称之为纹理扭曲.

解决上述两个问题的方法是<sup>[6]</sup>:

(1) 在产生纹理扭曲的三角形边界上进行纹理滤波

如果两个相邻的三角形对应到不同的图象, 就在这两个表面三角形的纹理图之间进行滤波, 以降低纹理扭曲现象.

(2) 对从所有摄像图象上都不可见的三角形进行纹理合成

如果某个表面三角形在所有的摄像图象中都是不可见的, 则其纹理依据相邻可见三角形的纹理来合成.

#### 5 实验

算法采用 Visual C++ 实现, 图形平台为 OpenGL, 实验对象为一小玩具人.

首先, 提取各图象中棋盘模板的格点作为定标点(如图8), 运用文献[4]中的算法进行摄像机定标, 之后, 运用体积生成算法生成玩具人体积模型, 如图9所示.

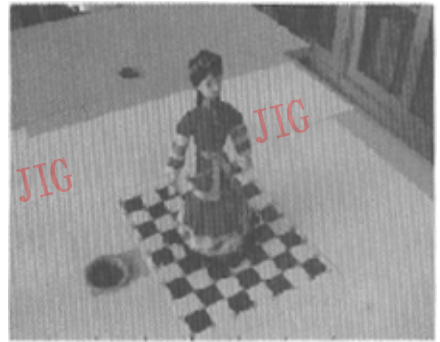


图8 提取棋盘格点作为定标点

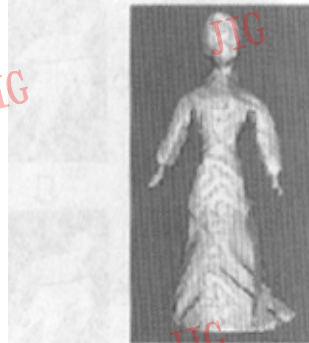
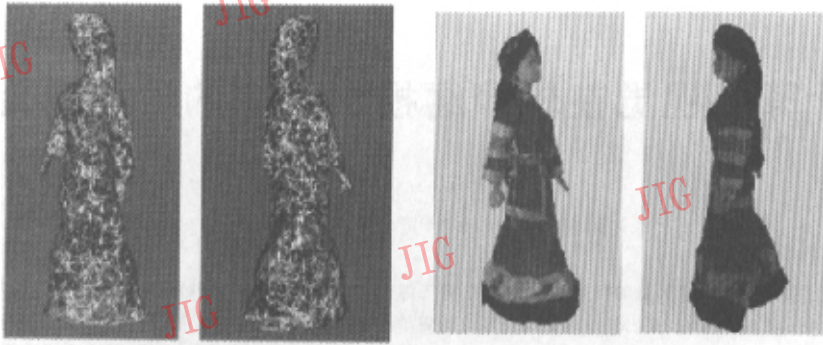


图9 体积模型

通过表面重建, 生成了如图10(a)所示的由三角面片构成的表面模型. 图10(b)是经过纹理映射后的最终结果.



(a) 表面重建结果

(b) 纹理映射后的模型

图 10

### 6 总 结

由上可见,计算机视觉中的 Shape from Silhouette 方法可成功地应用于虚拟人体的构造,并且由于算法的简捷性和可靠性,有望借此开发出具有竞争力的人体三维扫描仪。文中所采用的表面重建算法是对文献[5]中提出的算法的改进。在文献[5]中采用了极其复杂的法向一致性调整方法来确定采样点是否位于物体外部或内部,而本文通过将采样点反投影到各幅图象,巧妙地解决这个问题,从而大大提高了算法的效率。在本课题的研究过程中,最难以解决的问题就是图象的分割,如果背景不好或者采光条件不佳,都将严重影响最后的结果,这些将进一步进行研究予以解决。在以上实验过程中,采用的是单摄像机的拍摄方式,但在进行真实人体的三维重建时,应该采用多摄像机的拍摄方式,以此减小由于人体活动所引入的误差。

### 参 考 文 献

- 1 Daanen Hein A M, van de Water G Jeroen. Whole body scanners [J]. Displays, 1998, 19(3), 111~120.
- 2 Niem Wolfgang. Automatic reconstruction of 3D objects using a mobile camera[J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(2): 125~134.
- 3 Szeliski Richard. Rapid octree construction from image sequences[J]. CVGIP: Image Understanding, 1993, 58(1): 23~32.
- 4 Zhang Zhengyou. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[A]. In: Proc. ICCV'99[C]. Corfu, Greece; 1999, 1: 656~673.
- 5 Hoppe Hugues, DeRose Tony, Duchamp Tom et al. Surface reconstruction from unorganized points[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'92[C]. New York, USA, 1992: 71~78.

- 6 Niem Wolfgang, Broszio u H. Mapping texture from multiple camera views onto 3D-object models for computer animation [A]. In: Proceedings of the International Workshop on Stereoscopic and Three Dimensional Imaging [C]. Santorini, Greece, 1995.
- 7 Sebastian Weik. A passive full body scanner using shape from silhouettes[A]. In: Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition[C]. Barcelona, Spain, 2000: 750~753.
- 8 Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T et al. Numerical recipes in C(2nd edition)[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.



**沈军行** 1978年生,硕士研究生,主要研究方向为数字化人、计算机图形学、计算机视觉。



**孙守迁** 1963年生,博士,教授,主要研究方向为计算机辅助工业设计与概念设计、网络化媒体设计、数字化人、数字化产品开发等。



**黄琦** 1979年生,硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助概念设计、智能设计、虚拟设计。



**潘雪鹤** 1946年生,中国工程院院士,教授、博士生导师,主要研究方向为计算机辅助设计、人工智能、计算机图形学等。