

多视角可视外壳生成算法

郭清溥¹, 程 铭², 郭永锋³

(1. 河南财经学院, 郑州 450002; 2. 湖南师范大学 数学与计算机科学学院, 长沙 410006;

3. 中原工学院, 郑州 450000)

摘 要: 提出一种从图像序列重建三维物体多面体的算法, 与传统算法相比, 具有数据冗余度较低、精度较高、健壮性较好等优点. 实验结果表明, 使用该算法计算、生成的物体可视外壳更加逼近真实物体.

关键词: 多视角; 可视外壳; 三维重建; 线段相交

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-4978(2010)03-0303-04

A Robust Visual Hull Computation Method

GUO Qing-pu¹, CHENG Ming², GUO Yong-feng³

(1. Henan University of Finance and Economics, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Mathematics and Computer Science, Hunan Normal University, Changsha 410006, China;

3. Zhongyuan College of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In this paper, a new algorithm for reconstructing a visual hull of an object from its silhouette is proposed. Compared with the traditional methods, this algorithm has lower degree of data redundancy and higher precision, robustness, etc. The experiments show that the result of reconstruction is better approximation of the real objects.

Key words: multi-angles of view; visual hull; 3-D reconstruction; segment intersection

快速准确获取物体表面三维模型信息的技术, 在机械加工、影视特技制作、虚拟现实、服装设计、三维通讯以及医学诊断等领域有着广泛的应用. 目前, 获取三维模型的方法有三种^[1]. 第一种方法是利用建模软件, 如 AutoCAD、3DMax 等来构造三维模型, 可以达到精确构造虚拟物体并渲染奇特的效果, 但这些软件使用复杂, 建模周期较长. 第二种方法是利用三维扫描设备获取物体的三维信息, 建模精度高, 周期短, 但设备较为昂贵. 第三种方法则是根据拍摄到的影像序列来构造三维模型, 影像序列的获取只需使用普通数码相机围绕目标进行拍摄, 通过照片信息的连续性重建模型. 由于第三种方法所需采集设备简单, 而且效率较高, 设备低廉, 已经成为计算机视觉技术的重要研究对象. 本文采用影像序列的三维重建方法, 研究可视外壳^[2]生成算法.

1 健壮的可视外壳生成算法

简单地说, 可视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凸包, 当利用透视投影的方式从多个视角观察某一空间物体时, 在每一个视角上都会得到一条该物体的侧影轮廓线, 这条侧影轮廓线和对应的透视投影中心将共同决定一个三维空间中一般形状的锥体. 显然, 该物体必将落于这个锥体之内; 而由所有已知侧影轮廓线和对应的透视投影中心决定的锥体的交, 最终将决定一个包含该物体的凸包, 这个凸包就是物体的可视外壳. 在多数情况下, 空间物体的可视外壳是该物体的合理逼近^[3]. 图1给出了物体和它所对应的可视外壳的二维情形.

收稿日期: 2010-01-18

基金项目: 河南省重点攻关项目(08210224003)

作者简介: 郭清溥(1963—), 男, 河南郑州人, 副教授, 研究方向: 数字图像处理, 数据库应用.

1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一般基于可视外壳的算法, 可以定义为

$$vh_R = \bigcap_{r \in R} vh_r.$$

式中, vh_r 为拍摄相机视点和图片侧影轮廓线所形成的锥体, 锥体的母线穿过图片 r 上的侧影轮廓线, vh_r 就是物体重建后的可视外壳, 它是由多个锥体求交所产生的结果, R 是照片的集合. 由于相机视点和侧影轮廓所产生的锥体把物体包括在内, 所以只能得到与真实物体逼近的模型.

Martin^[4] 等最早提出了用多幅照片生成可视外壳的方法, 他们基于真实物体, 在照片上的侧影轮廓线实现了物体的三维重建. Chien^[5] 等采用了八叉树结构来表示物体的可视外壳, 该八叉树结构是通过预先在平行投影照片上生成表示物体的四叉树的基础上建立的. R. Szeliski^[6] 在 Chien 的基础上提出了八叉树改进算法, 但输入改为从任意视角拍摄的透视投影照片. 上述方法中, 在从每一个视角拍摄的照片上, 都要进行物体的侧影轮廓线与所有八叉树节点投影的求交测试. 由于八叉树节点在图像平面上的投影为多边形, 所以上述求交测试是一项非常耗时的工作. 为此, 研究人员提出了不同方法来克服这一问题. Liu^[7] 等通过引入自适应采样距离场来简化求交过程, Matusik 等采用了计算机视觉中的极线几何技术来加速可视外壳的计算. 20 世纪 90 年代以来, 可视外壳生成技术在虚拟现实等领域中得到了成功的应用, 人们实现了众多基于多视角视频图像的动态建模和绘制系统. 早期的工作是由 Moezzi 等完成的^[8], 他们构建了一个由放置在不同位置的 17 架摄像机组成的动态场景建模系统, 但该系统需要离线处理. Matusik 等将可视外壳的求交运算转换到图像空间进行, 大大加快了求交速度, 实现了场景的实时建模和绘制. Gross^[9] 等对 Matusik 等的方法做了改进, 他们采用点采样和点绘制的方式同样构建了一个实时建模和绘制系统.

综合以上基础, 本文提出通过线段空间叠加求交, 中心线性过滤与线段集合多边形检测的方法计算物体的可视外壳, 克服了传统线段求交与表面边界检测不准确的缺点, 同时保证算法结果的精确度, 增强了算法的健壮性.

1.1 原理

可视外壳是由多个相机视点和图片侧影轮廓线构成的锥体求交得到的结果, 如果将图像侧影轮廓线离散为紧密相连的点, 就可以将物体看成是从相机视点到侧影轮廓离散点的所有射线的交集集合. 物体表面所有线段的集合不仅构成了物体的可视外壳, 而且这些线段集合之间有相互关联的空间关系, 这样就可以通过线段集合检测多边形, 再通过多边形集合重构物体表面, 这也是本算法的理论基础.

1.2 算法及流程

对于一条从相机视点到侧影轮廓边缘射出的射线会穿过其他所有锥体, 并且和每个锥体都会有相交的情况, 其相交结果可能是一条相交线段或切于一点, 那么这条射线会被其他锥体分割为多条相互之间重叠或存在部分重叠的线段集合, 将这些线段集合进行求交运算得到的结果就是物体可视外壳信息. 但这些线段集合并不一定能得到准确的交集结果, 因为它们不能准确决定射线在每一个锥体内的部分, 所以线段集合在进行交集运算后会产生空集的现象. 在此, 本文提出一种改进的扫视法快速求交算法, 计算线段集合的近似最大交集.

利用扫视法^[10] 快速求交的基本思想是以任意一点为坐标原点, 建立平面直角体系. 从 y 轴开始, 在局部区域内, 自左向右扫描第一象限内的所有线段, 当 y 处于某一位置 (如 $x = m$) 时, 所有与 y 接触的线段可按此坐标系中 x 值的大小建立一个全序关系, 若当移动的 y 轴接近相交线段的交点 x 坐标时, 这两条相交线段在求得的全序关系中一定相邻. 因此, 在与 y 轴相交的线段中, 只需检查全序关系中没有比较过的相邻线段是否相交. 坐标系中线段的位置关系如图 2 所示.

通过上述思想可以发现, 传统的扫视法在求 y 轴在 $x = m$ 的全序关系时, 存在大量重复的计算, 并且所有线段的权重相等, 在表面重建时不能突出物体的有用信息. 为了充分利用已求得的全序关系, 并在求解过程中, 给线段赋予不同的权重, 最大程度得到这些线段的近似交集结果, 从而弥补传统线段求交算法中信息的缺失. 假定线段的左端点 (对应 x 值较小的端点) 为靠近交点的已知点, 一个加权计数器 l , 扫视线在任一位置所接触线段的全序关系可按这些线段的左端点 y 值的大小来建立, 并记录通过该点线段的个数.

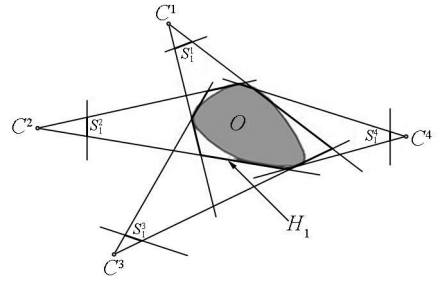


图 1 可视外壳的二维图像

Fig. 1 2-D image of visual hull

当扫视线移动过程中遇到线段的左端点时, 则按此线段的左端点 y 值的大小将此线段加入到全序集中, 并比较新插入的线段与其相邻线段是否相交, 修改其权重. 当遇到线段的右端点时, 此线段已超出局部求交的范围, 则将此线段从全序集中删除, 修改其权重.

在求得的线段集 $S_i = \bigcup_{k \in \{1, 2, \dots, m\}} [a_{ik}, b_{ik}]$ 中, $a_{ik} \leq b_{ik} \leq a_{i,k+1}$, $\{S_i\}_{i=1}^n$ 是一组在 R 中的线段集, 则 $S = [a_i, b_i] ([a_i, b_i] \in l)$ 就是加权线段求交运算的结果. 图 3a 中线段的最大加权系数为 3, 图 3b 中线段的最大加权系数为 4, 说明线段的颜色越暖, 它的加权系数就越高.

划分图像上物体轮廓线信息为排列整齐的点信息, 通过视点中心射向点信息的射线依次整齐排列. 根据上文提出的改进的扫视法快速求交算法, 可以得到其中一条射线和其他空间锥体的相交结果, 依次计算所有点信息所形成的射线图形和所有空间锥体的相交情况, 得到一组排列整齐的交集结果. 但是, 此方法得到的线段集合会由于噪声的影响而产生偏离, 因此本文提出一种基于局部线段集合平滑的方法, 使得求交后的结果自动调整, 表达信息更加准确.

假设 $\{S_i\}_{i=1}^n$ 是一组在 R 中的线段集合, 并且 $S_i = [a_i, b_i] (a_i < b_i)$. 这组线段集合的局部线性平滑器 $\{S_i'\}_{i=1}^n$; $l_i = b_i - a_i$; $l_i' = \sum_{j=-n}^n h_j * l_{i+j}$. 其中, $\sum_{j=-n}^n h_j = 1, n \in \{3, 5, 7\}$. 则 $a_i' = (b_i + a_i)/2 - l_i'/2, b_i' = (b_i + a_i)/2 + l_i'/2$.

假设同时使用 $b_i' = \sum_{j=-n}^n h_j * b_{i+j}, a_i' = \sum_{j=-n}^n h_j * a_{i+j}$ 进行平滑处理, 则会出现过滤后线段集合错位的现象. 通过改进的扫视法快速求交算法能够最大限度的求得物体近似模型, 对于那些仍然存在的异常线段集合, 可以使用基于局部线段集合平滑的方法进行二次处理, 得到较规整的结果, 从而便于恢复物体的本体信息. 图 4 给出了原始线段集合与过滤后线段集合的对比.

对于摄像机拍摄到的物体侧面不同体位的 n 张照片, 同时被 n 张照片所捕捉的侧面信息最终一定会落在物体可视外壳的内部. 该侧面与其他物体侧面信息所形成的物体模型即为物体的可视外壳信息, 该方法的计算量与问题的规模成指数级关系, 因此对于多视角可视外壳重建效率低下. 本文采用多边形检测的方法, 根据多边形距离的不同来重建物体的表面: 首先需要对待检测线段集合中的线段进行分类, 根据线段方向区分各个线段集合. 在进行分类时, 对于不同方向上的线段集合自动求取阈值, 通过所得阈值和每条线段的向量进行对比来区分线段所属集合. 根据已分类的线段集合, 可以得到共面的线段集合. 然后通过每个平面到原点的不同距离来区分不同平面, 并记录所有不同平面到原点的距离构造距离矩阵. 最后根据所构造的距离矩阵, 按某一方遍历所有相邻平面, 同时计算相邻平面的交线, 并保存交线信息, 通过所得到的交线信息和其他相邻面进行线面相交计算得到多边形的顶点. 具体步骤如下.

- 1) 根据获取的阈值把线段划分到多个不同的类型的线段集合中, 根据以已分类的线段集合, 得到每类线段集合所在的平面;
- 2) 设定原点, 然后根据平面到原点的距离区分每一个平面, 依次计算每两个平面之间的距离得到距离矩阵;

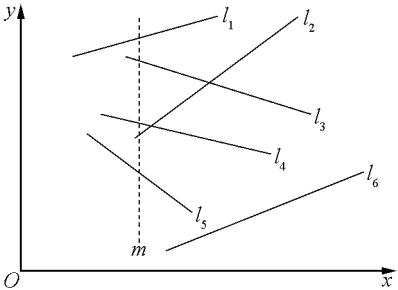


图 2 平面直角体系中线段的位置关系
Fig. 2 Relation between line position in plane rectangular system

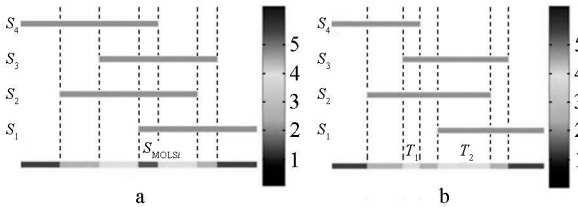


图 3 加权线段求交运算的结果
Fig. 3 The result of weighted line intersection

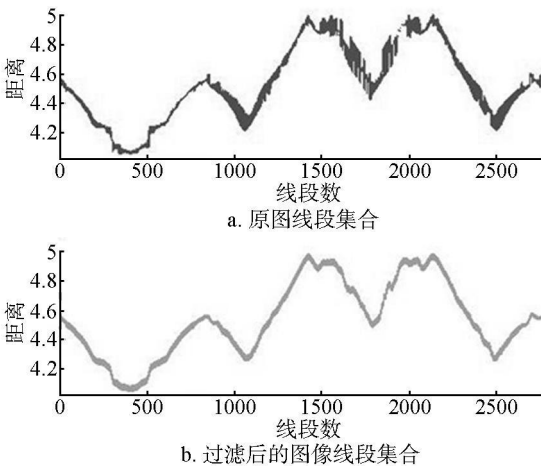


图 4 线段集合过滤前后对比
Fig. 4 Comparison of line set before and after filtration

3) 通过距离矩阵在每一个面中查找相邻的平面, 并计算面 and 它相邻面之间的交线, 得到每个平面的边界。

当按上述步骤对所有平面处理后, 就得到了物体可视外壳的多边形表面信息(如图 5 所示)。

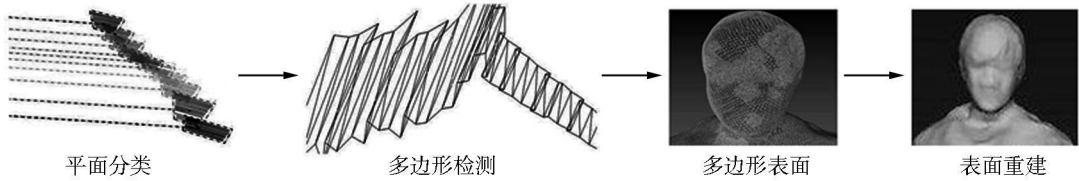


图 5 表面重建算法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the surface reconstruction algorithm

2 仿真结果与结论

本文使用 C++ 语言和 OpenGL (微机为 Intel Pentium Dual CPU E2160, 1.80 GHz, 内存 1 G), 验证了基于影像序列的多视角可视外壳生成算法, 并对若干实例进行了测试。在本算法中, 需要搭建拍摄场景, 准确地获取物体在每幅图片上的侧影轮廓线。采用边界检测算法, 分离图片中物体的轮廓和背景, 从而将物体和背景分别记录。在实现算法的过程中, 实验数据不包括照片的拍摄时间和侧影轮廓线的提取时间。

实验采用 12 幅分辨率为 620×620 照片序列为例, 对算法进行了实现和实验, 测试对象是人体模型。图 6 给出了采用本文算法重构人体姿态的结果图, 重建结果从不同角度展示了人体的姿态, 很好地利用影像序列包括的信息, 构建三维模型, 得到了较好的重建结果。



图 6 用 12 张照片对人体姿态的重构结果

Fig. 6 Reconstruction result with 12 photos on the posture

3 结束语

基于多视角的可视外壳生成算法在复杂度上优于传统的基于图像的重构算法, 其健壮性强, 且算法实现简单, 能真实重构物体的本体信息。实验结果表明, 算法的重构效果较好, 且对于照片的误差具有较好的容错性。

参考文献:

- [1] Liu Gang. Studies on geometry and texture reconstruction from multiple images [D]. 浙江: 浙江大学, 2004.
- [2] LAURENTINI A. Visual hull concept for silhouette-based image understanding [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(2): 150—162.
- [3] FRANCO J S, BOYER E. Efficient polyhedral modeling from silhouettes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(3): 414—427.
- [4] MARTIN W N, AGGARWAL J K. Volumetric descriptions of objects from multiple views [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(2): 150—158.
- [5] CHIEN C H, AGGARWAL J K. Volume/surface octrees for the representation of three dimensional objects [C] // Proceedings of Computer Vision, Graphics and Image Processing [s. n.], 1986: 100—113.
- [6] Szeliski R. Rapid octree construction from image sequences [J]. Cvgip-Image Understanding, 1993, 58: 23—32.
- [7] 刘钢, 王锐, 鲍虎军, 等. 一种可见外壳生成算法 [J]. 软件学报, 2002, 13(9): 1823—1829.
- [8] Moezzi S, Katkera A, Kuramura D Y, et al. Reality modeling and visualization from multiple video sequences [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(6): 58—63.
- [9] Gross M, Würmlin S, Naef M, et al. Blue2c: A spatially immersive display and 3D video portal for telepresence [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 819—827.
- [10] 程昌秀, 严泰来. 关于优化 n 条线段求交算法的研究. 测绘工程, 2001, 10(3): 29—31.