

多视觉环境下联合多约束的三维目标体重建

陈 宁,李秀秀,郑江滨

(西北工业大学 计算机学院, 西安 710129)

(hellochenning@163.com)

摘 要:提出了一种联合多种约束条件的体元重建方法。首先将场景空间离散为体元,并从多视获取的二维图像中提取目标轮廓信息;其次利用侧影轮廓约束及颜色一致性约束,恢复目标三维信息;针对重建模型存在漂浮体元和毛刺现象,提出加入平滑约束解决该问题;最后提出模型修复算法对模型表面空洞进行填补,解决重建模型空洞问题。实验结果表明,该方法可重建颜色纹理信息准确的目标外形,且模型光滑细腻,表面空洞得到有效填补。

关键词:体元重建;侧影轮廓;体元一致性;外形获取;空洞填补

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

3D voxel reconstruction under multiple constraints in multi-view environment

CHEN Ning, LI Xiu-xiu, ZHENG Jiang-bin

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract: A new voxel reconstruction under multiple constraints was proposed. Firstly, the scene was discretized to voxel, and target silhouette information was extracted in multi-view-obtained 2D image. Secondly, two constraints were used to recover target 3D information, which were silhouette constraint and the color consistency constraint. Smooth constraint was used to solve the problem that reconstructed model had float voxel and glitch. Based on the composition of the three forces, the floating voxels and the burrs could be restrained efficiently. Finally, a model recovering algorithm was proposed to fill the holes on the surface of the reconstructed model. The experimental results demonstrate that the method can reconstruct the target appearance with correct color and texture information, also the model is smooth and delicate, thus the hole can be filled effectively.

Key words: voxel reconstruction; silhouette; voxel consistency; shape acquisition; hole filling

0 引言

多视环境下真实目标的三维重建作为计算机视觉领域中一项关键技术,已成为当今世界的一大研究热点,广泛应用于影视、动画、游戏等数字媒体制作,生物力学分析,虚拟现实等多个领域,具有极高的社会价值、巨大的经济效益以及高速增长的市场需求。

基于体表示的真实目标获取技术^[1-2]是三维重建领域的一个重要分支,体重建技术将整个场景空间离散为体元,通过原始图像上目标轮廓或图像间的相关性等约束,判断体元是否属于目标表面。基于侧影轮廓的方法^[3]在体重建技术中有重要应用,该方法提取目标在输入图像上的侧影轮廓线,通过摄像机投影中心和投影轮廓线的对应关系来判断体元属性,从而获取目标粗糙的外形估计,但无法获取颜色纹理信息。体元着色算法^[4]是体重建技术中的经典算法之一,通过计算体元在输入图像投影像素集的颜色一致性,判断体元是否属于目标表面。该算法能够有效地获取三维目标物体的颜色纹理信息,避免了图像间的相关特征匹配问题,解决了局部遮挡问题,但限制了摄像机位置。广义像素着色(Generalized Voxel Coloring, GVC)算法^[5]提出了无摄像机位置约束的体重建方法,改变了体元着色算法中体元的遍历顺序,提高了体

元可见性的计算效率。之后的许多算法在上述几种算法基础上进行改进。Anwar 等人^[6]利用降低标定误差的方法提高重建的精确度。Slabaugh^[7]改进了颜色一致性检测方法,提出的自适应检测方法能解决图像中含有尖锐边的情况,但需要选择两个阈值参数。Stevens 等人^[8]提出了基于直方图的一致性检测方法,该方法通过建立体元投影像素集的颜色直方图来计算颜色相关性,不需要调整参数阈值,但易受噪声影响,不够鲁棒。

综上所述,体元着色算法、GVC 算法等方法均可较为方便准确地获取具有颜色纹理信息的目标三维表面模型,但重建模型仍存在一些问题。一方面,由于标定误差、投影误差等因素的影响,一些本应雕刻掉的背景体元被误重建,由此产生漂浮体元及毛刺现象^[9],导致模型表面不光滑;另一方面,由于视点不足,不良反射以及标定误差等因素影响,模型表面存在空洞^[10],视觉效果上连续性较差,不够细腻。针对上述问题,本文利用目标轮廓信息、颜色一致性约束以及平滑约束相结合重建目标表面模型,改善模型表面的漂浮体元及毛刺问题;并提出模型空洞修复算法,对重建结果的表面空洞进行填补。

1 基于体表示的目标表面模型获取

假设场景表面满足 Lambertian 表面光照条件,即场景空

收稿日期:2010-07-21。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60970069);西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(Z2010070)。

作者简介:陈宁(1987-),女,山东郓城人,硕士研究生,主要研究方向:多媒体智能信息处理;李秀秀(1982-),女,山西怀仁人,博士研究生,主要研究方向:计算机视觉、图像处理;郑江滨(1971-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向:计算机多媒体信息处理、计算机视觉、图像处理。

间表面每一点的辐射具有各项同性且所有的入射光都被反射,摄像机的参数信息已经定标获取。

初始确定目标的立方体包围盒,将其离散为大小相同的立方体体元;根据体元与摄像机平面的距离,将包围盒分割成一系列的体元层,依照距离约束单向单层遍历场景体元;联合侧影轮廓约束、颜色一致性约束以及平滑约束对体元一致性进行判断,从而确定体元是否属于目标表面。

1.1 侧影轮廓约束

提取输入图像上目标的侧影轮廓线,利用已得到的摄像机标定信息,将体元反投影到每幅输入图像上获取投影区域,根据投影区域是否落在目标的轮廓区域内,判断体元的类别,如果投影区域完全落在目标轮廓外,则体元不属于目标,应将其剔除;反之则保留下来。

利用侧影轮廓约束得到的只是目标的大致外形凸壳,包含目标表面以及内部体元,无法获取目标的颜色纹理信息。

1.2 颜色一致性约束

颜色一致性约束是大多数体元着色算法中极为关键的一步,颜色一致性原则认为若一个体元属于目标物体表面,则该体元在所有对其可见图像投影内的像素颜色应是相同的。但在真实场景中,由于各视角光照条件不同,体元在图像投影区域内的像素颜色不会完全相同。因此需要对体元在图像投影区域内的像素集的颜色一致性进行判断。

结合侧影轮廓约束,在计算体元投影像素集的颜色一致性时,若投影区域完全落在目标轮廓外,则认为该体元不属于目标,不必进行颜色一致性判读,将其剔除;反之计算投影像素集的颜色一致性,通过和给定阈值比较,判断体元是否可见。若可见,则认为体元属于目标表面,将体元保留,进行着色;如果不可见,则认为其不属于目标表面,将其剔除。

颜色一致性通过比较体元投影像素集的颜色方差和阈值来判断。设 $Pro(v)$ 为体元 v 反投影在 K 幅输入图像上的像素集, $Con(v)$ 为 $Pro(v)$ 的颜色一致性函数, λ 为给定阈值。设 v 在图像 m 上投影像素的 RGB 三通道分别表示为 (R_m, G_m, B_m) , $m \in \{1, 2, \dots, K\}$ 。

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{K-1} \left(\sum_{m=1}^K X_m^2 - \frac{1}{K} \left(\sum_{m=1}^K X_m \right)^2 \right); X \in \{R, G, B\} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_G^2 + \sigma_B^2} \quad (2)$$

取颜色一致性 $Con(v) = \sigma - \lambda$, 若 $Con(v) < 0$, 则投影像素集满足颜色一致性,体元 v 可见。

结合侧影轮廓约束和颜色一致性约束,可以提高体元一致性的判读效率,重建颜色纹理信息准确、较为逼真细致的目标外形模型,如图1所示。图1(a)、(b)是不同视角观看模型效果图,图1(c)为(a)、(b)中图框部分的局部放大图。由图1(c)可看出,重建模型主要存在两个问题:重建模型存在一些漂浮体元且表面带有毛刺,模型不够光滑;模型表面存在很多空洞,导致模型表面连续性较差,不够细腻。

1.3 平滑约束

由于重建过程受标定误差、投影误差等因素的影响,一些背景体元通过一致性检测,作为目标体元保留下来。由此导致漂浮体元以及表面毛刺的存在,模型在视觉效果上不光滑。针对这一问题,本文提出在体元一致性检测过程中,加入平滑约束,减少漂浮体元和毛刺现象,使重建模型更加平滑。

每个体元的邻域体元的类别属性可以辅助判断该体元是否属于目标表面。换言之,体元的邻域体元对其有一定的保护作用。剔除的邻域体元越多,中心体元暴露部分越多,若邻域体元完全被剔除,则中心体元成为脱离模型的漂浮体元;反之,保留下的邻域体元越多,中心体元被剔除的可能性越小。

设体元 v 的 26 个邻域体元中被雕刻的体元数为 $Car(v)$, ρ 为平滑约束阈值,平滑约束函数 $S(v)$ 可定义为:

$$S(v) = Car(v)/26 - \rho \quad (3)$$

若 $S(v) < 0$, 则认为体元被剔除的可能性较小,将其保留。

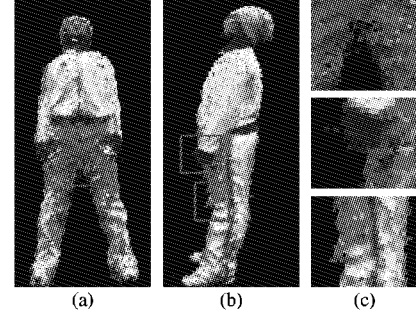


图1 三维重建效果图

1.4 联合多约束的三维目标体重建

联合侧影轮廓约束、颜色一致性约束以及平滑约束,定义体元一致性检测函数 $F(v)$ 为:

$$F(v) = Con(v) + \alpha S(v) \quad (4)$$

其中 α 为平滑约束权重值。若 $F(v) > 0$ 则认为体元不属于目标表面,将其剔除;反之将其保留并着色。

对初始的三维包围盒运行如下算法,按照距离约束单向多层次扫描包围盒,并对图像中每个像素定义一个标识位,用来标识像素是否经过处理。算法流程如下:

1) 初始化包围盒为大小是 $l \times w \times h$ 的立方体元空间。

2) 提取输入图像上目标轮廓线。

3) 遍历体元,对于每个体元:

① 计算其在输入图像反投影中未标记像素集;

② 若投影像素集未完全落在目标轮廓外,根据式(4)计算体元一致性;

③ 若通过体元一致性检验,将1)中像素集的平均颜色信息赋予该体元,标记像素集中的像素点,将该体元加入到可见体元集合 V_1 中。

4) 根据体元集合 V_1 中体元的位置、颜色等信息输出目标三维外形。

2 模型修复

由于颜色一致性阈值的选取、标定误差以及目标的颜色纹理等因素的影响,重建模型表面易产生空洞。本文提出模型表面修复算法对重建结果表面空洞进行填补。记体元着色算法中保留的体元集为 V_1 , 剔除的体元集为 V_2 , 从 V_2 中选取属于目标表面的体元,利用待修复体元的邻域体元的均值进行填补。分析 V_2 中体元的邻域体元的类别属性,若体元 v 的邻域体元集 $N(v)$ 中保留下来的体元较多,则认为 v 为可修复的体元,进行下一步判断。计算待修复体元的邻域体元的颜色一致性,并阈值 μ 进行比较,若大于阈值,则放弃填补。

设 V 表示待检验的体元集, $|V|$ 表示体元集中的体元个数, X_v 表示体元 v 各颜色通道, q 为一个整数,邻域体元颜色

一致性函数为 $NCon(V)$, 如式(5)所示。

$$NCon(V) = \frac{1}{|V|-1} \left(\sum_{v \in V} X_v^2 - \frac{1}{|V|} \left(\sum_{v \in V} X_v \right)^2 \right) \quad (5)$$

空洞填补算法流程如下:

- 1) 对 V_2 中的体元 v , 求其邻域体元集 $N(v)$;
- 2) 若 $|N(v) \cap V_1| > q$ 且 $NCon(N(v) \cap V_1) < \mu$, 则用 $N(v) \cap V_1$ 中体元的均值对 v 填补;
- 3) 将 v 从 V_2 中删除, 加入到 V_1 中。

3 实验结果与分析

实验采用 16 路摄像机围绕表演者进行拍摄, 捕获图像大小为 648×490 , 从不同视角拍摄的目标图像如图 2 所示。

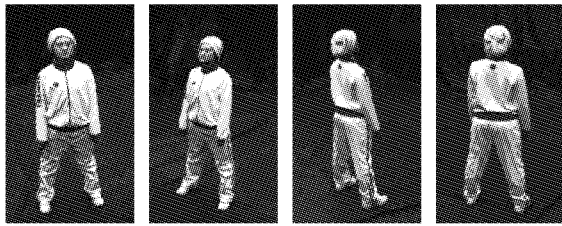


图2 不同视角拍摄表演者

利用多约束联合的体重建算法对表演者外形进行重建, 体元大小为 10, $\lambda = 40$, $\rho = 0.49$, $\alpha = 50$ 重建模型的不同视角如图 3 所示, 重建结构较为完整, 颜色纹理逼真, 模型表面较为平滑, 可以从任意视角观看模型。与未加入平滑约束的算法重建结果图 1 相比, 模型的漂浮体元以及毛刺现象明显减少, 模型表面更加平滑, 局部对比结果如图 4 所示, 由对比结果可以看出, 平滑约束有效避免了模型表面的漂浮体元和毛刺现象。

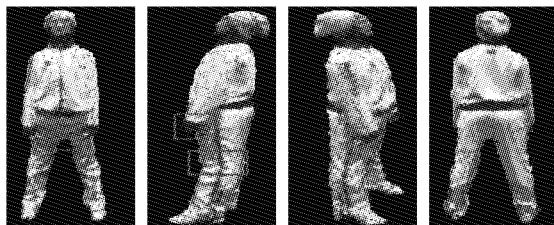


图3 不同视角显示三维重建模型



(a) 加入平滑约束前局部模型

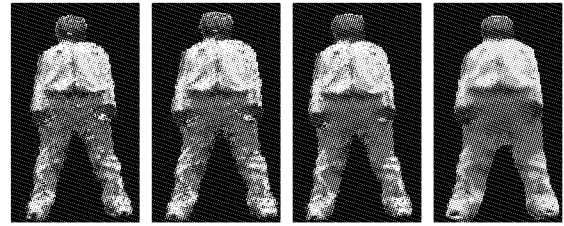


(b) 加入平滑约束后局部模型

图4 加入平滑约束前后局部模型对比图

取 $q = 10$, $\mu = 60$, 模型修复结果如图 5 所示, 图 5(a) 为修复前的三维模型, 存在大量空洞; 图 5(b) 为模型修复算法迭代 1 次后的效果图, 只能填补少量空洞; 图 5(c) 为算法迭代 3 次后的效果; 图 5(d) 为算法迭代 6 次后的效果, 可以修补大面积的空洞, 但细节信息模糊失真。实验结果表明: 运行 1 次修复算法后, 模型表面依然存在很多空洞, 由于视点不足导致的大面积空洞无法得到有效填补; 算法迭代多次之后将得到更好的填充效果。迭代次数过多, 虽然可以修复由于视点不足导致的大面积空洞, 但修复表面细节模糊失真。因此,

算法迭代次数需视具体要求而定, 空洞修复效果和表面细节效果需要一定的折中。



(a) 修复前 (b) 迭代1次 (c) 迭代3次 (d) 迭代6次

图5 模型修复算法效果图

4 结语

本文针对真实场景中目标的三维外形获取问题, 提出了联合多种约束的三维体重建方法。有效地抑制了漂浮体元及毛刺问题, 获取的目标三维外形模型表面平滑细腻, 精确度较高, 真实感强。并针对重建模型表面空洞问题, 提出了模型表面修复算法, 能够有效修复模型空洞, 使获取的模型更加完整。由于标定误差、投影误差等多种因素的影响, 重建模型与真实目标仍有一定差距, 重建模型失真和空洞问题也有待进一步解决。

参考文献:

- [1] SLABAUGH G, CULBERTSON W B, MALZBENDER T, *et al.* Methods for olumetric reconstruction of visual scenes[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 57(3): 179-199.
- [2] 史文波, 郑江滨. 真实场景中基于体表示的目标外形和纹理获取[J]. *计算机应用*, 2009, 29(3): 732-735.
- [3] SLABAUGH G, CULBERTSON W B, MALZBENDER T, *et al.* A survey of methods for volumetric scene reconstruction for photographs [C]// *International Workshop on Volume Graphics*. New York: Stony Brook, 2001: 81-100.
- [4] SEITZ S M, DYER C R. Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1999, 35(2): 1067-1073.
- [5] CULLBERTSON W B, MALZBENDER T, SLABAUGH G. Generalized voxel coloring[C]// *Proceedings of the Vision Algorithms Theory and Practice Workshop*. New York: Springer, 1999: 100-115.
- [6] ANWAR Z, FERRIE F. Towards robust voxel-coloring: Handling camera calibration errors and partial emptiness of surface voxels [C]// *18th International Conference on Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005.
- [7] SLABAUGH G G. Novel volumetric scene reconstruction methods for new view synthesis[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, 2002.
- [8] STEVENS M R, CULBERTSON B, MALZBENDER T. A histogram-based color consistency test for voxel coloring[C]// *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 118-121.
- [9] LIU XIN, YAO HONGXUN, CHEN YILIN, *et al.* An active volumetric model for 3D reconstruction[C]// *International Conference on Image Processing*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 101-104.
- [10] ZHAO CHENGGUI, XIAO WENJUN. A parallelizing and improving on voxel coloring technology for 3D reconstruction based on images [C]// *International Conference on Mechatronics and Automation*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 2185-2189.