

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)04-0634-06
论文索引信息: 胡峰, 赵晓林, 张利. 增量式精确多面体可见外壳 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(4): 634-639

增量式精确多面体可见外壳

胡峰, 赵晓林, 张利

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 提出一种新的增量式计算精确多面体可见外壳的算法 IEPVH。首先, 在新视图的图像平面, 计算旧可见外壳的边被新光锥切割得到的交点。然后, 恢复旧可见外壳的边上交点的局部方向信息并同时获得新光锥边上的交点。接着, 恢复新光锥边上交点的局部方向信息。最后, 新可见外壳的多边形面片通过一次遍历网格的边的过程被识别出来, 并为了便于显示而被划分为三角面片。与 EPVH 等其他算法相比, IEPVH 不但能够让用户更多地参与基于图像 3 维重建的过程, 而且具有空间计算复杂度小。实验证明此算法的高效和鲁棒性。IEPVH 的特点使其更易于在移动设备中得到应用。

关键词: 基于图像; 3 维重建; 侧影轮廓线; 可见外壳; 多面体网格; 增量式处理

Incremental exact polyhedral visual hulls

Hu Feng, Zhao Xiaolin, Zhang Li

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract: A new image-based algorithm named IEPVH is proposed to perform exact polyhedral visual hull reconstruction in an incremental fashion. First, edges of visual hull model are chopped by viewing cone of the new view. Second, local orientation information of intersection vertices on edges of visual hull model are retrieved and at the same time intersection vertices on edges of viewing cone are added into the mesh. Third, local orientation information of intersection vertices on the edges of viewing cone are retrieved. Finally, faces of viewing hull are identified by traversing edges of the new model and then triangulated for rendering. IEPVH enables interactions with users during the computation. Moreover, IEPVH has the merit of less memory consumption. Modeling results are presented to demonstrate IEPVH's robustness and effectiveness. IEPVH's merits make it preferred by mobile device.

Keywords: image-based; 3D modeling; silhouette; visual hull; polyhedral mesh; incremental processing

0 引言

基于图像的 3 维建模是计算机视觉领域的一个重要课题, 且在虚拟现实、医学诊治、文物保护等领域有着广阔的应用前景。与基于激光扫描等设备的主动式 3 维建模方式相比, 基于图像的 3 维建模方法在成本、自动化程度以及操作简便性等方面有着

明显的优势。

利用物体在不同角度摄像机成像平面上的侧影轮廓线反向投影锥体的相交获取可见外壳是基于图像的 3 维重建的一种基本且重要方法。Baumgart^[1] 首先提出了这种方法的基本思想。Laurentini^[2] 则给出了可见外壳的精确定义。简单来说, 如式(1)所示, 可见外壳 VH 就是由不同位置不同角度的 N 个光锥 $VC_n (n = 1, \dots, N)$ 相交得到的凸包。其中,

收稿日期: 2010-01-11; 修回日期: 2010-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972022)。

第一作者简介: 胡峰(1985 —), 男, 清华大学电子工程系硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉等。E-mail:

huf07@mails.tsinghua.edu.cn。

每个角度的光锥 VC 由其对应的摄像机投影矩阵 P 和图像平面的侧影轮廓线 S 决定。

$$VH_N = \bigcap_{n=1}^N VC_n \quad (1)$$

Lazebnik 等人^[3]指出对于表面光滑的物体,其可见外壳表面是广义多面体。广义多面体的顶点为光锥曲面的交点,边为光锥曲面相交得到的曲线片段,面为光锥曲面的部分。若将光滑表面物体在各视图中的侧影轮廓线分段线性表示,则其可见外壳表面为一般意义下的多面体。如图1所示,多面体可见外壳的顶点 V 是3个相邻面片 F_{left} , F_{right} , F_{front} 的交点,且通过3条边与另外3个顶点 V_{left} , V_{right} , V_{back} 相连。

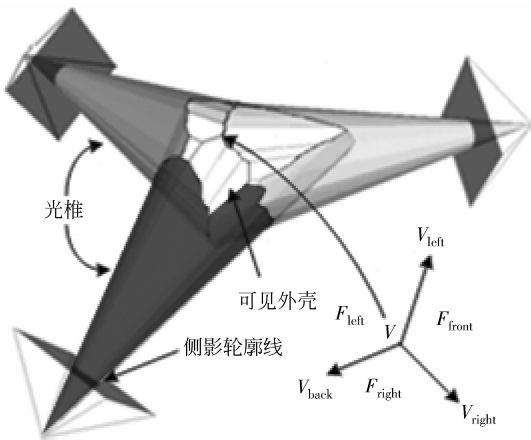


图1 多面体可见外壳^[4]

Fig.1 Polyhedral visual hull

计算可见外壳的算法主要有2类:基于体的方法和基于表面的方法。

基于体的方法由于其鲁棒性高和易于实现等特点而被广泛使用。物体在3维空间的包围盒被分割成小的体素,并检验每个体素的投影处于各个视图侧影轮廓线的外部还是内部。八叉树算法^[5]是一种经典的基于体的算法。Marching Cubes^[6]算法通常被用来提取最终的表面网格结构。因为要把空间规则地划分为一个个小的体素,因而基于体的方法重建得到的模型只是近似的可见外壳。在构造低精度模型时,模型表面有明显的锯齿现象;在构造高精度模型时,基于体的方法计算量会迅速增大。

基于表面的方法利用光锥或者侧影轮廓线之间的相交来计算可见外壳表面网格的点、线和面。Giblin等人^[7-9]用二阶曲面近似可见外壳的局部表面,由对极几何约束计算两个临近光锥在物体表面

的交点,再通过分析交点的局部方向信息将交点连接成网格。Cross等人^[10-13]则利用3维空间点和面的对偶性由光锥的面来计算可见外壳的表面点。上述基于表面的方法输出的模型都是近似的可见外壳表面模型。Lazebnik等人^[3]指出精确可见外壳的表面是广义多面体。她们设计的PVH算法^[3]利用方向性射影几何^[14]和微分几何^[15]的数学理论来计算可见外壳表面由各个光锥表面的部分构成的条带。Franco等人^[4]在PVH的基础上给出了在侧影轮廓线用分段线性多边形表示的情况下计算精确多面体可见外壳的算法EPVH。EPVH算法的鲁棒性较高,但实现困难且由于采用了批处理的方式而导致空间计算复杂度大。

本文提出一种新的计算精确多面体可见外壳的方法IEPVH(incremental exact polyhedral visual hull)。IEPVH采用增量式处理模式,能够允许用于在3维建模过程有选择地更新3维模型的局部,且具有空间计算复杂度小的优点。

1 算法描述

1.1 算法思想与流程

IEPVH算法的主要流程如下:

输入:分段线性侧影轮廓线 S_n 及其对应投影矩阵 P_n ($n=1, \dots, N$)

输出:多面体可见外壳模型 VH_N

初始化可见外壳模型 VH_0 或 VH_2 。

[更新可见外壳模型]

For $n=1$ 或 $3, \dots, N$

 计算可见外壳 VH_{n-1} 的边被 VC_n 切割所得的交点。

 恢复 VH_{n-1} 边上交点的局部方向信息。

 连接 VC_n 边上交点的局部方向信息。

 遍历新可见外壳 VH_n 。

End

IEPVH首先计算旧可见外壳被新视图的光锥切割所得的相交点,然后在分析相交点的局部方向信息的同时计算新视图的光锥被旧可见外壳切割所得到的交点。IEPVH属于基于表面的方法,但其思想源于基于体积的方法,因而更易于理解和实现。基于体的方法检验体素在光锥的内部还是外部,而IEPVH检验旧可见外壳边上的点在新视图的光锥内部还是外部。

1.2 可见外壳的初始化

在采取增量方式更新可见外壳之前,需要计算

得到一个初始的可见外壳模型。这里,我们提供两种初始化策略:①计算得到物体的包围盒作为初始模型 VH_0 ;②使用 EPVH 算法由前两个视图计算得到初始模型 VH_2 。因为生成的可见外壳模型中不存在 3 个光锥的交点,两张视图的情况对于 EPVH 来说很容易处理。

1.3 切割旧可见外壳的边

增量式地更新可见外壳的第 1 个步骤是用新视图的光锥切割旧可见外壳的所有边。图 2 所示为 $n=3$ 时的情形。图 2 中,绿色和蓝色的面属于旧视图 1 和 2 的光锥 VC_1 和 VC_2 ,红色的面属于新视图 3 的光锥 VC_3 。图右上方为 2 维图像平面求相交的示意图,虚线表示 VH_2 的边被 VC_3 切割掉的部分。具体地,将旧可见外壳 VH_{n-1} 的边投影到新视图的图像平面,然后利用 Bresenham 算法^[16]计算它们与新视图的分段线性侧影轮廓线 S_n 的交点。通过式(2)可以由新视图图像平面交点 v 求出 3 维空间交点 V 。其中, V_{st} 和 V_{ed} 为投影与 S_n 交于 v 的 VH_{n-1} 的边的两端点, P_n^i 为 P_n 的第 i 行, \sim 表示向量用齐次坐标表示。

$$w = \frac{(v_x \tilde{P}_n^2 - \tilde{P}_n^0) \tilde{V}_{ed}}{(v_x \tilde{P}_n^2 - \tilde{P}_n^0) \tilde{V}_{st}} = \frac{(v_y \tilde{P}_n^2 - \tilde{P}_n^1) \tilde{V}_{ed}}{(v_y \tilde{P}_n^2 - \tilde{P}_n^1) \tilde{V}_{st}}$$

$$V = (V_{ed} - wV_{st}) / (1 - w) \quad (2)$$

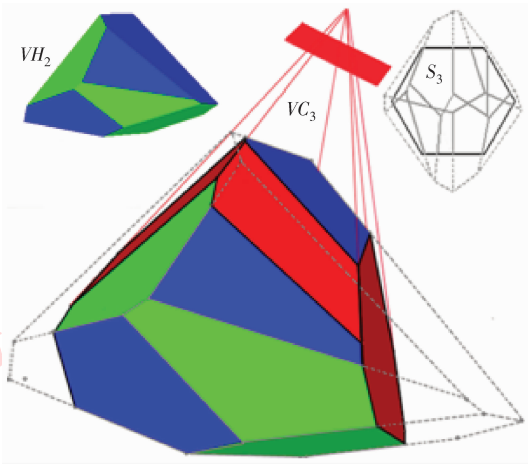


图 2 新光锥 VC_3 切割旧可见外壳 VH_2 的边

Fig. 2 Viewing cone VC_3 chops edges of visual hull VH_2

1.4 恢复旧可见外壳上交点的局部方向信息

如图 3(a) 所示,交点 V_{new} 的左右面片 F_{left} , F_{right} 以及连接到旧可见外壳 VH_{n-1} 的方向 $[V_{new}, V_{back}]$ 可以由位于同一条 VH_{n-1} 边上的顶点 V 或者 V_{back} 的局

部方向信息得到;面片 F_{front} 为新视图光锥 VC_n 面的一部分。

为了寻找 V_{new} 的左右连接 V_{left} 和 V_{right} ,先将交点按照侧影轮廓线的方向(如图 3(b)所示,阴影区域为物体在图像平面投影,外侧影轮廓的方向为逆时针,内侧影轮廓的方向为顺时针)排序,然后在每个旧可见外壳的面片上将交点左右连接起来。如图 3(c)所示,图中实线为侧影轮廓线 S_n 的片段, p_1-p_5 为 S_n 的顶点,虚线为 VH_{n-1} 面片 F 的边的投影, v_1-v_6 是虚线与实线的交点,也即 VH_{n-1} 边上交点 V_1-V_6 在 S_n 上的投影。图 3(c)中红线所示的连接即对应了 V_1-V_6 的左右方向连接情况。同时我们计算由 p_2-p_4 发出的光线与面片 F 的交点则得到新光锥边上的交点 P_2-P_4 。

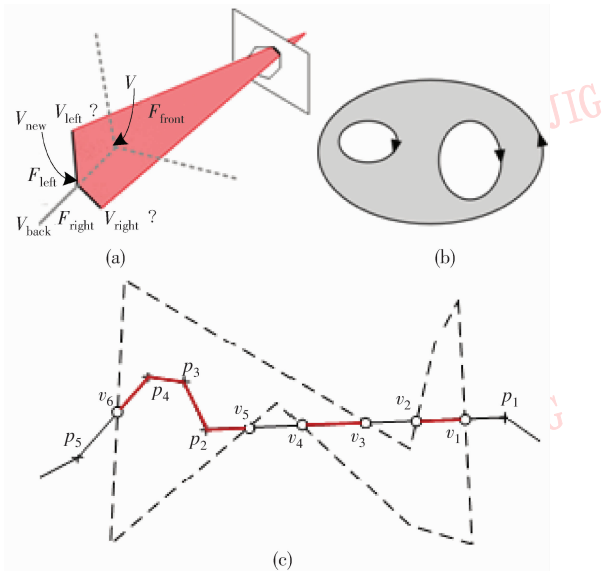


图 3 恢复新交点的局部方向连接信息示意图

Fig. 3 Illustration of retrieving connections of new vertices

当新视图中存在很短的侧影轮廓线时,新光锥边上的交点可能无法在恢复旧可见外壳上交点的局部方向信息时得到。只需在处理每个面片时,验证其投影是否包围了一条完整的侧影轮廓线。若是,则计算并添加此侧影轮廓线的顶点出发的光线与该面片在 3 维空间的交点为新光锥边上的交点。

1.5 恢复新光锥边上交点的局部方向信息

对于新光锥边上交点, V_{left} 和 V_{right} 在恢复旧可见外壳上交点的局部方向信息时得到。 F_{left} 和 F_{right} 为光锥面的一部分, F_{front} 为所交的旧可见外壳的面片。 V_{back} 为同一条光锥边上的相邻交点。

1.6 遍历新可见外壳

在计算得到了 VH_n 的所有顶点及每个顶点的局部方向信息后,只需遍历所有的 VH_n 的顶点和边,即可获知 VH_n 的每个面片有哪几个顶点构成。

2 实验结果与分析

对 IEPVH 算法在不同的数据集上进行测试。实验计算机的配置为 2 GB 内存,1.80 GHz 酷睿 2 CPU,Windows XP 操作系统。图 4 为 4 个测试模型。它们分别包含 20, 19, 24, 24 张各个不同角度拍摄的物体图像和对应的摄像机参数。

使用 Adobe Photoshop 软件手工分割出每张图

的前景区域,然后用 Rennesson 等人^[17]给出的直线识别算法由前景提取出分段线性的侧影轮廓线。4 个模型每张视图上的分段线形侧影轮廓线的平均顶点数为分别为 65, 145, 350, 636。图 5 给出了 Cat, David, Skull, Alien 测试模型的第 1 张视图的分段线性侧影轮廓线,其中蓝绿相间的是外侧影轮廓线,紫黄相间的是内侧影轮廓线。

图 6 给出了 IEPVH 算法计算得到的可见外壳模型,每排第 1 个模型为由 2 张视图得到的初始模型,最后 1 个模型为最终的可见外壳模型。在每个模型的下方,给出了模型多面体表面网格的顶点数 V ,多边形面片数 F 以及经过剖分后得到的三角形面片数 T 。



图 4 Cat, David, Skull, Alien 测试模型^①
Fig.4 Test models of Cat, David, Skull and Alien

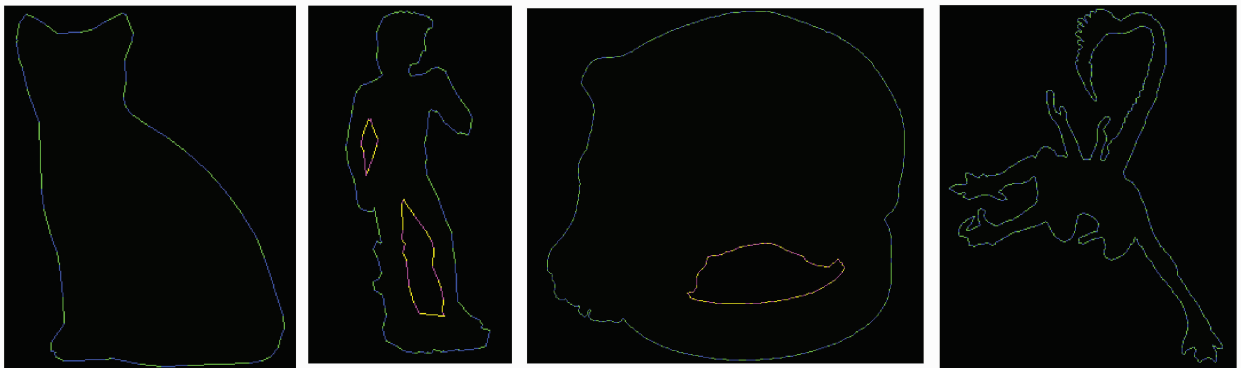
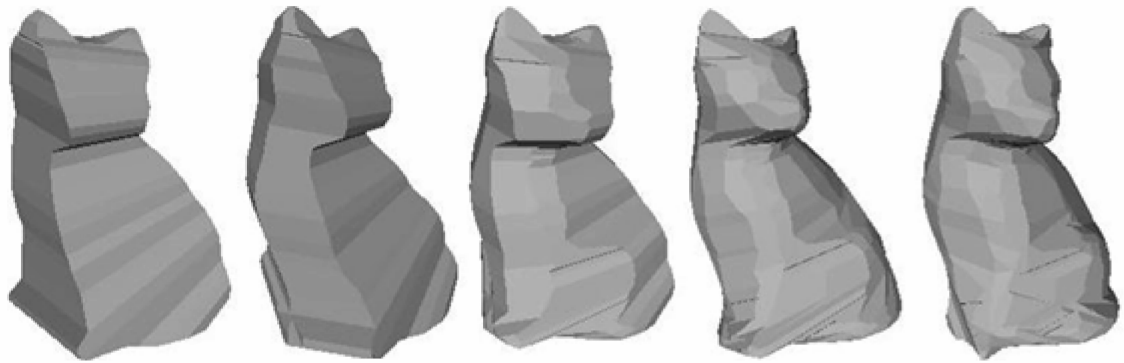


图 5 分段线性侧影轮廓线
Fig.5 Piecewise linear contour of the models

^① Cat 和 David 模型来源于 <http://i.cs.hku.hk/~kykwong/>, Skull 和 Alien 模型来源于 http://www-cvr.ai.uiuc.edu/ponce_grp/data/visual_hull/。



V251, F128, T500

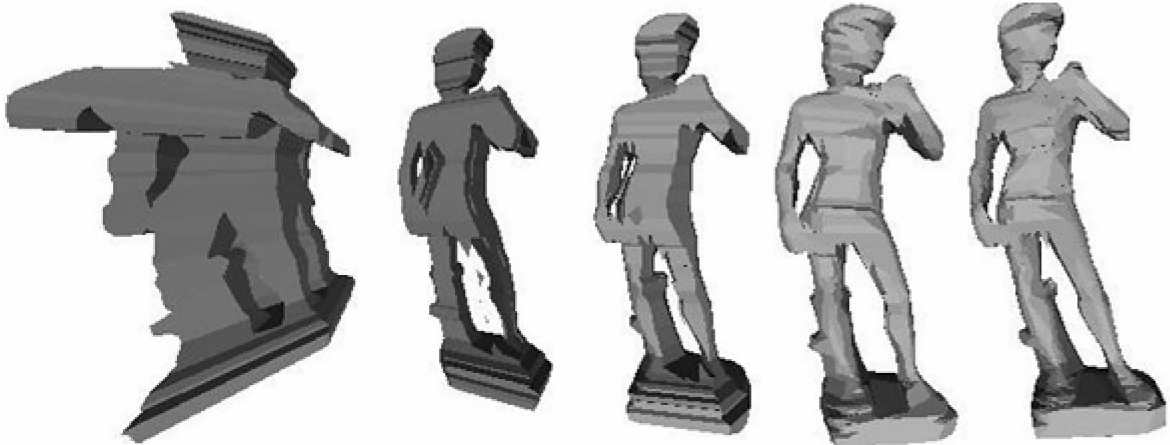
V936, F200, T788

V646, F325, T1288

V1162, F583, T2320

V1962, F965, T3848

(a) Cat



V1146, F563, T2312

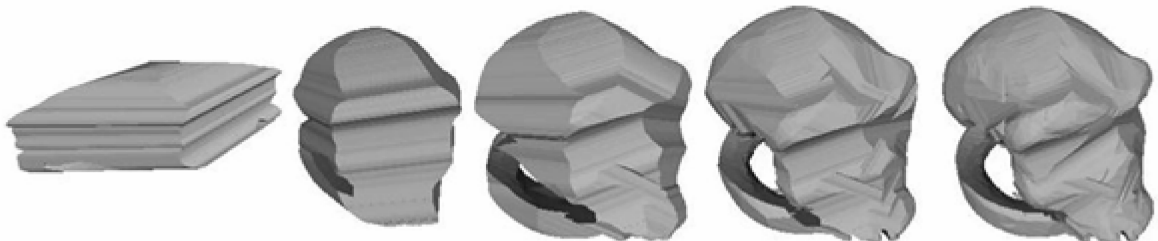
V1710, F847, T3436

V1998, F997, T4000

V3800, F1902, T5296

V5296, F2658, T10572

(b) David



V1802, F897, T3612

V2958, F1473, T5928

V4086, F2491, T9976

V9596, F4754, T18980

V16042, F8019, T32088

(c) Skull



V5930, F2963, T11864

V8174, F4109, T16304

V12564, F6288, T25115

V15360, F7686, T30708

(d) Alien

图 6 IEPVH 算法计算得到的可见外壳模型

Fig. 6 Visual hull models reconstructed from sequences using IEPVH

同时实现并测试 EPVH 算法。实验过程中 EPVH 和 IEPVH 消耗的内存空间大小以及时间被统计在表 1 中。从表中可以看出,相较于 EPVH, IEPVH 虽然计算时间稍长,内存消耗却小了 1 个数量级。这是因为 EPVH 算法采用批处理模式,需要读入所有视图的数据并保存大量中间变量,其空间复杂度随着视图个数的增长而增长,而 IEPVH 每次只需读入并处理一个视图的数据,内存消耗明显降低。然而,由于 IEPVH 需要计算增量式处理过程中的每个模型,因而需要相对更多的计算时间。

表 1 EPVH 和 IEPVH 内存和时间统计

Tab.1 Memory and time statistics of EPVH and IEPVH

模型	内存消耗/MB		计算时间/s	
	EPVH	IEPVH	EPVH	IEPVH
Cat	31.2	2.7	3.15	6.57
David	41.2	3.5	8.19	19.49
Skull	505.3	27.8	46.28	105.24
Alien	385.8	19.7	31.12	96.92

另外,从模型的对比中,验证在输入相同的分段线性侧影轮廓和投影矩阵的情况下,IEPVH 和 EPVH 输出完全一致的精确多面体可见外壳网格模型,点坐标和拓扑结构均相同。

3 结 论

提出一种新的增量式重建精确可见外壳的算法 IEPVH。在更新可见外壳的过程中,首先用新视图的光锥切割旧可见外壳的边。在恢复旧可视外壳边上交点的局部方向信息的同时,获得了新可视锥体边上的交点并恢复其局部方向信息。最后,通过遍历新可视外壳的边,得到可见外壳整体的拓扑结构。增量式处理模式使得 IEPVH 方便用户在 3 维重建过程有选择性地更新重建模型的局部部位。实验表明,提出的 IEPVH 算法比流行的 EPVH 算法在空间上的计算复杂度小 1 个数量级。空间计算复杂度小的特点使得 IEPVH 算法更容易在手机等小型移动设备中应用。

参考文献 (References)

[1] Bruce G Baumgart. A polyhedron representation for computer vision [C] // Proceeding of AFIPS Joint Computer Conference.

- New York, NY: ACM Press, 1975:589-596.
- [2] Laurentini A. The visual hull concept for silhouette based image understanding [J]. IEEE Trans. PAMI, 1994, 16 (2) : 150-162.
- [3] Lazebnik Svetlana, Furukawa Yasutaka, Ponce Jean. Projective visual hulls [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(2): 137-165.
- [4] Franco Jean Sebastien, Boyer Edmond. Efficient polyhedral modeling from silhouettes [J]. IEEE Trans. PAMI, 2009, 31(3):414-427.
- [5] Szeliski R. Rapid octree construction from image sequences [J]. CVGIP: Image Understanding, 1993, 58(1):23-32.
- [6] Lorensen William E, Cline Harvey E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm [C] // Proceeding of the 14th SIGGRAPH. New York, NY: ACM Press, 1987: 163-169.
- [7] Giblin P, Weiss R. Reconstruction of surfaces from profiles [C] // Proceeding of the 1st ICCV. London: IEEE Computer Society, 1987:136-144.
- [8] Cipolla R, Blake A. Surface shape from the deformation of apparent contours [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2):83-112.
- [9] Boyer E, Berger M O. 3D surface reconstruction using occluding contours [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22(3):219-233.
- [10] Coros G, Zisserman A. Quadric reconstruction from dual-space geometry [C] // Proceedings of the 6th ICCV, Bombay, India: IEEE Computer Society, 1998:25.
- [11] Kang K, Tarel J, Fishman R, et al. A linear dual-space approach to 3D surface reconstruction from occluding contours [C] // Proceedings of the 8th ICCV. Vancouver, Canada: IEEE Computer Society, 2001:198-204.
- [12] Brand M, Kang K, Cooper D B. Algebraic solution for the visual hull [C] // Proceedings of CVPR. Washington D C: IEEE Computer Society, 2004:30-35.
- [13] Liang C, Wong K Y K. Complex 3D shape recovery using a dual-space approach [C] // Proceedings of CVPR. San Diego: IEEE Computer Society, 2005:878-884.
- [14] Laveau S, Faugeras O. Oriented projective geometry for computer vision [C] // Proceedings of the 4th ECCV. Cambridge, UK: Springer-Verlag, 1996: 147-156.
- [15] Do Carmo M. Differential Geometry of Curves and Surfaces [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1976.
- [16] Bresenham J E. Algorithm for computer control of a digital plotter [J]. IBM System Journal, 1965, 4(1): 25-30.
- [17] Debled Rennesson I, Reveilles J P. A linear algorithm for segmentation of digital curves [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1995, 9(6): 635-662.