

一种可视外壳的快速拓扑生成算法

余峰 陈越

(浙江大学计算机科学与工程学院, 杭州 310027)

摘要 针对各种传统可视外壳生成算法中数据冗余及健壮性不足等问题,提出了一种新的从阴影图像中快速重构物体可视外壳的稳健的算法,即首先利用物体表面的拓扑结构直接生成外壳,然后使用改进的 SurfaceNet 算法光滑三维表面,从而在保留经典的体求交方法健壮性的基础上,克服对于物体内部点的冗余计算和存储问题,不仅使得计算的时间复杂度降低到仅线性依赖于外壳上结点的数目,而且降低了像片数对算法复杂度产生的影响,实验结果表明,在算法复杂度和健壮性上优于诸如八叉树等传统可视外壳算法。

关键词 计算机图形学 基于图像 可视外壳 拓扑 三维造型

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)05-0604-07

A Fast Algorithm for Topologically Generating Visual Hull

YU Feng, CHEN Yue

(College of Computer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract The traditional volumetric visual hull generating methods were not applicable to huge-volume objects due to redundant calculations. Other methods based on ray intersections were sensitive to input perturbations and were hence lack of robustness. A fast new algorithm was represented in this paper for reconstructing an object's visual hull from its silhouette. The topological structure of the object's surface was taken into consideration, and the surface mesh was reconstructed directly without having to compute the redundant information of all the voxels inside. Then, an improved SurfaceNet algorithm was adopted to smooth the 3d surface. The robustness of the classical volume carving method was reserved, while the time complexity was reduced to only linearly depend on the number of vertices on the final surface. The dependence of the time complexity on the number of photos was reduced as well. The results of the experiments show that this topological generation algorithm is superior to some classical visual hull methods, as far as its reconstruction function for practicality is concerned.

Keywords computer graphics, image-based, visual hull, topological, 3D modeling

1 引言

基于图像的建模与绘制 (Image-based modeling and rendering) 是计算机视觉中的重要研究领域,而从系列二维图像中重构三维物体信息也是 IBMR 研究的关键^[1~3]。如今得到物体三维信息的方式有如下两种:一种是主动重构,如激光扫描^[4,5],这种方式虽然能够得到精确的表面信息,但是由于需要用到的设备非常昂贵,并且必须接触物体,因此对大型的物体不适用;另一种方式是被动重

构,它是相对廉价的基于图像的方法,其适用于任何大小的物体,这种方式的另一个特点是能够通过图像信息绘制复杂物体的表面来得到物体的贴图^[6,7]。遗憾的是,当今许多基于图像的被动重构算法(如,基于阴影的算法,基于立体视觉的算法,基于光线跟踪的算法等)都比较复杂,使得生成一个三维物体需要耗费较多的计算资源。本文提出的可视外壳拓扑生成算法,由于是从物体的空间拓扑结构出发对表面进行搜索,因此不仅能快速地生成三维实体的可视外壳,而且算法实现简便,同时所消耗的时间及空间的计算资源较少。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60373031)

收稿日期: 2003-04-17; **改回日期**: 2004-01-15

2 已有的研究基础

本文的算法是基于 Laurentini 提出的可视外壳 (Visual hull) 理论^[8,9]。Visual hull 的思想是从一组二维阴影图像序列的轮廓信息中获取三维物体,若所取的二维图像角度越多,则获取的三维物体表面越逼近真实的物体,且这种表面通常是等于或紧紧包围实际物体的(如图1所示)。

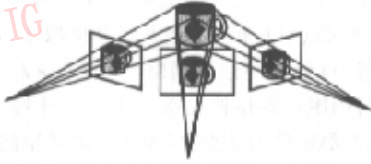


图1 Visual hull 理论

实验的输入数据为:(1)系列二维投影图像,(2)设备标定参数;输出数据为可视外壳信息。Visual hull 的思想是从一组二维阴影图像序列的轮廓信息中获取三维的实体,若所取的二维图像角度越多,则越逼近真实的物体,且这种表面通常是等于或紧紧包含实际物体的。大多数基于 Visual hull 理论的算法,其本质都可以定义为

$$V = \bigcap_{r \in R} C_r$$

其中, C_r 是与一张阴影像片 r 对应的锥体,锥的顶点 c 为视点(即相机原点),锥的母线穿过像片 r 上的阴影边界点。 V 是物体可见外壳,它由所有 C_r 相交得到。 R 是像片 r 的集合。由于 Visual hull 产生的光锥总是包含了物体,因此各个光锥相交生成的物体是大于真实实体的^[8]。基于 Visual hull 理论的算法通常分为体裁减与体求交两类。

通常体裁减的方法是利用在物体表面附近的空间点对预估计物体所在空间进行切割,并将这些点保存在八叉树结构当中。这种空间表达方式能够高效地存储物体体信息,并能简化运算。体裁减时,首先将八叉树中的点投影到像片上,通过判断是否落在阴影区间来区分该点是否包含于实体中,而后运用 Marching Cubes 算法^[10]或是其他的平滑表面算法来得到物体表面信息。Chien 等最先提出用八叉树来表示可见外壳^[11,12],但该算法所需的投影像片有平行拍摄的限制。Potmesil 与 Szeliski 分别提出了可以从任意角度拍摄投影像片的八叉树改进算法^[13,14]。总的来说,这类算法共有的缺点是:(1)即

使引入八叉树等概念,仍有较高的时间、空间复杂度;(2)由于表面是间接生成的,因此对于大多数情况,计算出的体信息是无用的。

而体求交的方法则能够解决上面提出的第2个缺陷。Matusik 提出了多边形求交算法^[15],Eu 也提出了相应的算法^[16]。笔者提出的光线跟踪算法^[17]也建立于体求交。此类算法可用相机原点与阴影轮廓形成的光锥直接相交产生可视外壳。由于它的初始值是估计得到的,而后依次用像片形成的光锥切割形成物体表面,因此它可直接记录下物体的表面信息,但是这种算法仍没有解决第1个缺陷,却引入了一个新问题,即当像片数量增加的时候,由于求交得到的物体表面非常复杂,因而使得计算复杂度急剧上升。

人们对物体的认知一般都是以可视表面为主,因此在某些环境的应用当中,并不需要得到实体的全部体信息,只要求对物体的表面进行造型即可。Visual hull 算法的输出结果是可视外壳的信息,因此,理想条件下基于该理论的算法在时间复杂度上可以达到 $O(n)$, n 为物体表面所有的点数。本文描述的拓扑生成算法是首先从三维表面的拓扑关系中直接搜索物体表面空间点,然后用改进的 SurfaceNet 算法^[18,19]来生成表面三角网格。本算法不仅解决了体裁减与体求交算法的缺陷,而且使得算法的复杂度达到了 $O(n)$ 。

3 三维表面拓扑生成算法

3.1 算法原理

3.1.1 物体内部点的判断

通过空间点 p 在像片集 R 上的投影,就可以判断出该点是否存在于物体内部。本文将空间的点投影变换到二维像片时,使用的是线性算法。由于相机是已定标的,因此可采用直接线性变换(DLT)^[20,21]来表示相机的内部参数。其计算公式如下

$$\begin{cases} x = \frac{l_1 X + l_2 Y + l_3 Z + l_4}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} \\ y = \frac{l_5 X + l_6 Y + l_7 Z + l_8}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} \end{cases} \quad (1)$$

其中, (X, Y, Z) 为空间点 p 的坐标, (x, y) 为 p 在像片 r 上的投影点坐标, $l_1 \sim l_{11}$ 为对应于像片 r 的相机内部参数。应用该公式,可以将空间中任意一点投影到相应的像片上,以实现三维坐标到二维坐标的转换。

定义 $P(p, r)$ 为空间点 p 在像片 r 上投影取值

函数, 值域为 $\{1, 0\}$, 即 p 在像片 r 上投影点 (x, y) 是否为阴影。因为本文关心的是可视外壳的生成算法, 所以不讨论将物体从背景分割的处理技术, 算法的输入是经过二值化处理的投影像片。

定义物体内部点判断函数 $I(p)$

$$I(p) = \begin{cases} 1 & (\sum_{r \in R} P(p, r) \geq T) \\ 0 & (\sum_{r \in R} P(p, r) < T) \end{cases}, T \leq |R|$$

T 为设定阈值, R 为像片 r 的集合。由于相机的非精确标定以及输入像片的精确程度对算法的影响不大, 因此可以通过调节 T 的值来加以限制。

对于给定的空间点, 可以用 $I(p)$ 函数来判断其是否在物体内部。

3.1.2 表面外壳搜索与表面生成

如果将空间用网格进行划分, 就可以将物体看成是体像素(voxel)的集合。物体表面所有体像素的集合不仅构成了物体的表面外壳 H , 而且这些体像素之间有相互关联的空间拓扑关系, 这样找到了其中一个点之后就可以按照相连的拓扑关系找到整个 H , 这也是本算法的理论基础, 即单个物体的表面一定是连通的, 因此从表面某点出发必定可以到达表面上的任意点。

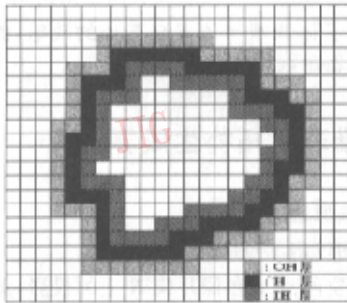


图 2 物体剖面图

(算法搜索的范围为 OH 层、H 层、IH 层, 厚度一个体像素)

算法的搜索范围限定为以下 3 层(图 2): 外壳外层(OH)、外壳层(H)、外壳内层(IH), 每层的厚度为一个体像素。H、IH 层上体像素 $I(p)$ 值为 1, OH 层上体像素 $I(p)$ 值为 0。由于搜索是有方向的, 因此当搜索到 OH、IH 层时, 算法就会向 H 层收缩, 从而使得搜索区域集中在表面外壳内外, 以提高搜索的效率与精度。这种搜索呈地毯式铺展开去, 其计算结果即为外壳层(H)的体像素集合。

搜索时, 首先, 在空间中找到外壳层 H 中的一个体像素作为起始点。因为物体所在空间的大概位

置可以估计得出, 所以用一根穿过物体位置的空间直线进行线性探测, 交点必落于外壳层 H 上。如果物体是环状的, 那么所用的空间直线与物体可能没有交点, 但是从不同的角度、位置放置直线, 则一定会与物体有交点。这样从找到的第 1 点出发, 就可以开始搜索所有的外壳层 H。

众所周知, 拓扑生成算法是对 18 叉树的广度优先搜索(图 3)。由图 4 可知, 某体像素是表面外壳层 H 上的充要条件是其周围 18 个方向的体像素中至少有一个是外壳外层 OH 上的点, 同时有另一个外壳层 H 上的点与其相连。当判断某体像素 v 是否在 H 层上时, 可分别搜索 v 周围 18 个体像素, 同时记录下 v 与周围点的拓扑关系。如 v 在 H 层上, 则周围 18 个点都是待确认点, 但由于可能从别的方向已经搜索到了这些点, 或是有些点存在于 OH 层, 因此不必将与 v 相邻的所有 18 个点都放入待确定的点集合 W 中, 而只是将没有进入过待确定的点集合 W 的物体内部点放入。算法结束的条件是待确认的点集合 W 为空, 因为这样才能够保证之前所有放入到待确认的点集合 W 中的所有外壳层 H 上的点都可找到与其相邻的外壳层 H 上的点, 即所有外壳层 H 上的点都已经找到。由于只把已经确定为外壳层 H 上点周边的点放入待确定的点集合 W , 因此搜索的

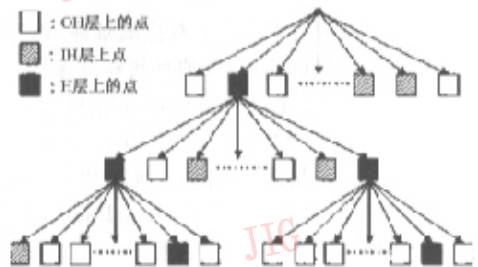


图 3 拓扑算法是对 18 叉树的广度优先搜索

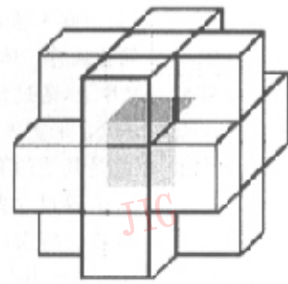


图 4 体像素被 26 个空间点包围, 与它表面相邻的共有 18 个体

范围就是OH、H、IH3层,而体裁减的算法则需要计算物体所有内部点的信息。

选定物体周围18个探测方向,而不是6个方向的原因是物体表面可能为如图5所示的阶梯状,如只探测6方向,则会因此而产生断层和使得生成物体的表面上存在空洞。

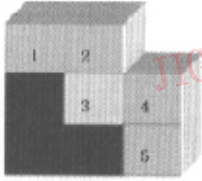


图5 物体剖面图

(假设从1开始探测外壳,如果只探测6个方向,则在2的位置会停止;而探测18个方向,外壳2就会与4连通)

当得到外壳层H及其周围体像素信息之后,就可以先用SurfaceNet算法^[4,7]来光滑生成四边形表面网格,并生成三角网格,然后根据H层上体像素顶点相邻点的位置计算顶点偏移,再经过多次迭代之后即可得到光滑的表面。

3.2 算法描述

一般可用散列表M存储所有的体像素信息,队列Q存储待确认外壳点,链表L存储已确认外壳点。用伪代码将算法描述如下:

```

找到H上的一个体像素,放入Q与M;
while(Q不为空){
    v=弹出Q中的第1个体像素;
    遍历v周围18个方向{
        if(在这个方向与v相临的体像素f不在M中){
            将f的信息放入M;
            记录这两个体像素之间的空间关系;
        }
    }
    if(v至少有一个相邻体像素的I(p)值为0,即有相邻OH层上体像素){
        将从未放入过Q的物体内部点,即H、IH层上体像素放入Q;
        将v放入L;
    }
}

```

使用SurfaceNet算法光滑由L中元素生成的三角表面;

由此可以看到,重构的时间复杂度为 $O(m+3n)$,空间复杂度为 $O(3n)$,其中m为探测第1个H层上点的复杂度,由于是线性探测,因此复杂

度值为 $O(1)$,n为H层上顶点的个数。表面生成的时间复杂度为 $O(n)$ 。由于 $m \ll n$,因此三维表面拓扑生成算法的时间复杂度为 $O(n)$ 。

3.3 算法的缺陷与改进

由于算法是基于单个物体表面空间拓扑结构的,因此一次只能识别一个单连通物体。我们可以对投影像片做预处理,如在阴影像片出现中有n个非连通区域,则表明有n个物体存在。再根据n个非连通区域的空间位置,即可分别找出n个物体的表面。

因为算法是基于visual hull的,所以同样存在着对于凹物体难以表现、易受相机非精确定标的影响以及物体阴影不易提取等问题。

4 实验结果与分析

现已用C++语言在PⅢ1.0G,256M的微机上实现了上述三维表面拓扑生成算法,并用实际数据与Szeliski的八叉树算法^[1]进行了比较,并用已知内部参数的数码相机与旋转平台组成了数据采集系统,拍摄像片的分辨率为 640×480 ,试验数据不包括像片处理时间。

第1个测试是在相同分辨率、不同输入像片数条件下输出可视外壳上点的重构实验对比,测试对象是埃菲尔铁塔模型。从表1中可以得出,在相同分辨率空间、相同像片数的条件下三维表面拓扑算法的性能都优于八叉树算法。特别是当输入像片数目增加时,八叉树算法复杂度上升极快,而拓扑生成算法的复杂度则受输入像片数目影响较小。设判断空间点p投影在一张像片上的时间为t,如增加一张像片,则计算物体可视外壳的时间增加 $3nt$,n为可见外壳顶点个数。由于t相对于空间点的拓扑关系计算时间来说是微小的,因此增加像片的数量对计算时间的影响并不是非常明显;而对于体裁减或是体求交来说,由于引入一张像片就相当于对物体空间增加一次切割或求交,因此其算法复杂度是与像片数目相关的。

表1 相同分辨率下拓扑生成算法与八叉树算法的性能比较

算法	像片数	可视外壳顶点	运行时间(ms)
八叉树算法	18	7907	1653
	36	7678	2285
	72	7505	4757
拓扑生成算法	18	7980	1002
	36	7835	1122
	72	7278	1262

第2个测试是在不同分辨率,相同像片数的条件

下进行的实验对比,被测试物体是一个茶杯,共有 36 张投影像片。从图 6 中可以看出,拓扑生成算法的复杂度与分辨率是成线性的,并且性能优于八叉树算法。

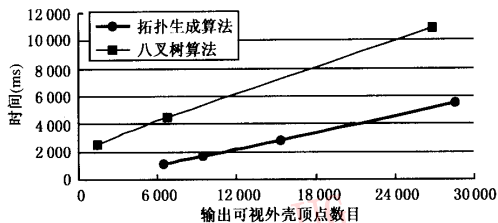


图 6 茶杯的重构
(相同像片数,不同分辨率下拓扑生成算法与八叉树算法的性能比较)

第 3 个实验是对实物的造型测试与容错测试,其中每个实例中都有一张或两张为黑点或白点的阴影数据像片,其中一些阴影图片仍留有物体影子。表 2 为实验数据,图 7、图 8、图 9 分别为相应的造型效果。

表 2 对埃菲尔铁塔模型、茶杯、玩具鹿重构的实验结果

实例	埃菲尔铁塔	茶杯	鹿
像片数	36	36	36
错误数据像片数	1(全白点)	1(全黑点)	2(全黑点)
可视外壳顶点数	7 835	15 323	16 162
三角化顶点数	11 687	24 526	26 003
三角网格数	23 484	49 654	53 520
重构时间(ms)	1 122	2 844	2 573
表面化时间(ms)	280	671	341
总运行时间(ms)	1 402	3 515	2 914

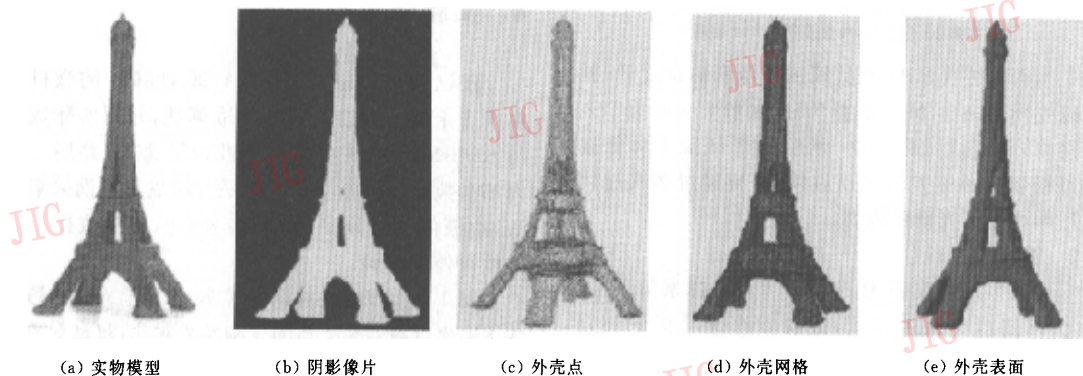


图 7 用 36 张像片对埃菲尔铁塔进行重构的结果

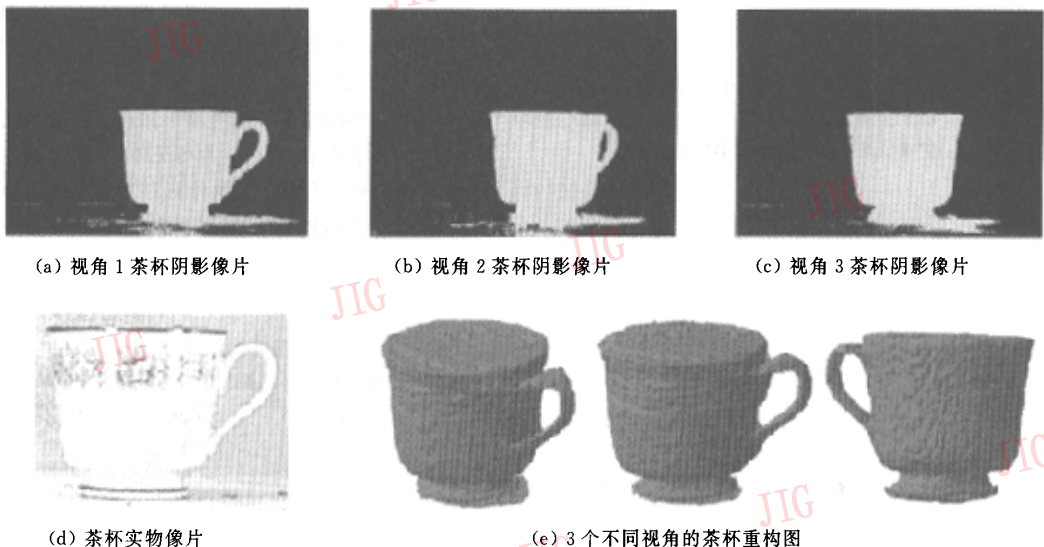
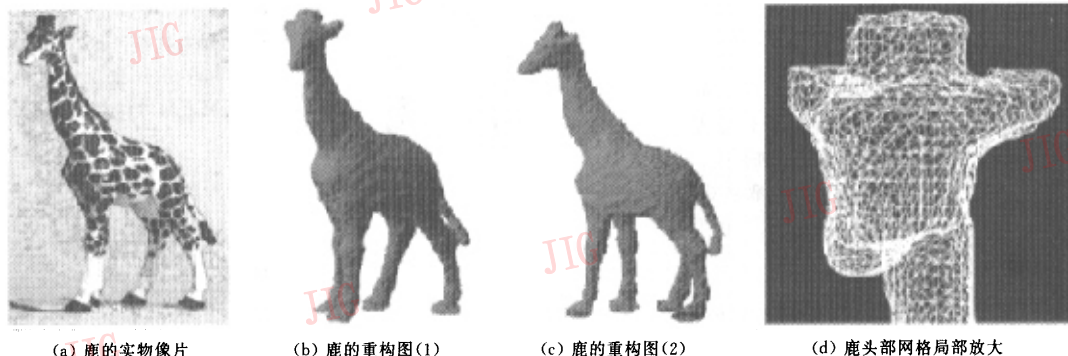


图 8 用 36 张像片对茶杯的重构



(a) 鹿的实物像片

(b) 鹿的重构图(1)

(c) 鹿的重构图(2)

(d) 鹿头部网格局部放大

图9 用36张像片对鹿模型的重构

5 结论与展望

综上所述,基于图像的三维表面拓扑生成算法在复杂度上优于传统的基于图像的重构算法,其不仅达到了理论最优的程度,且算法实现简单,能在较短时间内搜索到物体空间信息。通过实验可以看到,算法对于凸的单连通物体都能有很好的重构效果,且对于像片的误差有很好的容错性。由于算法建立于体像素网格之上,因此可以利用所获得的拓扑信息计算出光滑的物体表面,并为之后的表面绘制提供帮助。

参考文献

- 1 Baumgart B G. Geometric modeling for computer vision[R]. Technical Report AIM-249, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, Palo Alto, CA, USA, October 1974.
- 2 Baker H. Three-dimensional modeling[A]. In: Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C], Cambridge, MA, USA, 1977:649~655.
- 3 Faugeras O. Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint[M]. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993.
- 4 Rioux M, Bird T. White laser, synced scan[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1993,13(3):15~17.
- 5 Besl P J, Jain R C. Three-dimensional object recognition[J]. Computing Surveys, 1985,17(1):75~145.
- 6 Gortler S J, Grzeszczuk R, Szeliski R, et al. The Lumigraph [A]. In: Proceedings of Special Interest Group on Computer Graphics '96[C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996,8:43~54.
- 7 Debevec P E, Taylor C J, Malik J. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach[A]. In: Proceedings of Special Interest Group on Computer Graphics '96[C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996,8:11~20.
- 8 Laurentini A. The visual hull concept for silhouette based image understanding[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994,16(2), 150~162.
- 9 Laurentini A. The visual hull: A new tool for contour-based image understanding[A]. In: Proceedings of 7th Scandinavian

conference. Image Analysis, 1991:993~1002.

- 10 Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm[J]. Computer Graphics 1987, 21(3):163~172.
- 11 Chien C H, Aggarwal J K. Identification of 3D objects from multiple silhouettes using quadtrees/octrees [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1986,36(2/3): 256~273.
- 12 Chien C H, Aggarwal J K. Volume/surface octrees for the representation of three-dimensional objects [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1986, 36(1): 100~113.
- 13 Potmesil M. Generating octree models of 3D objects from their silhouettes in a sequence of images [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987,40(1):1~29.
- 14 Szeliski R. Rapid octree construction from image sequences[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding, 1993,58(1):23~32.
- 15 Matusik W, Buehler C, McMillan L. Polyhedral visual hulls for real-time rendering [A]. In: Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering[C], London, England, June 2001:115~125.
- 16 Eu D, Toussaint G T. On approximating polygonal curves in two and three dimensions[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Graphical Models and Image Processing, 1994,56(3):231~246.
- 17 陈越,余峰. 从二维系列摄影图片提取剪影重构三维实体的光线跟踪算法[J]. 中国图象图形学报,2002,7(8):806~813.
- 18 Gibson S. Using distance maps for smooth surface representation in sampled volumes[A]. In: Proceedings of IEEE Symposium on Volume Visualization[C], Los Angeles, CA, USA, 1998:23~30.
- 19 de Bruin P W, Frans V, Frits H P, et al. Improving triangle mesh quality with surfaceNets[A]. In: Proceedings of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention [C], 2000: 804~813.
- 20 Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[A]. In: Proceedings of the American Society of Photogrammetry Symposium on Close-range Photogrammetry[C], Falls Church, VA, USA, 1971:1~18.
- 21 Marzan G T, Karara H M. A computer program for direct linear transformation solution of the collinearity condition, and some applications of it[A]. In: Proceedings of American Society of

Photogrammetry Symposium on Close-range Photogrammetry
[C], Falls Church, VA, USA, 1975:420~476.



余 峰 1979年生,2001年获浙江大学学士学位,现为浙江大学计算机科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为三维造型与绘制、数字图像处理。



陈 越 1967年生,浙江大学计算机科学与工程学院教授,1996年获美国 University of Connecticut 数学系博士学位。目前主要研究方向为自由曲面造型理论。

第13届中国多媒体学术会议(NCMT2004)征文通知

2004年10月14~17日,宁波

<http://medialab.cs.tsinghua.edu.cn/~ncmt04>

主办:中国计算机学会 中国图象图形学会

由中国计算机学会多媒体专业委员会及中国图象图形学会多媒体专业委员会联合召开的第十三届全国多媒体技术学术会议定于2004年10月14~17日在风景秀丽的浙江宁波市召开。会议由宁波大学承办,会议期间将组织著名学者就宽带和无线网络、新型计算模式、流媒体、数字版权管理等热点领域做大会特邀报告和广泛的学术讨论。欢迎各位同行踊跃投稿。

一、征文内容(不局限)

- 多媒体信息处理和编码:多媒体全信息处理和压缩、嵌入式多媒体处理、内容分析、基于内容的检索、数字版权管理(DRM)和信息安全
- 多媒体系统支持和网络技术:网络协议、无线网络、操作系统、中间件、流媒体服务器、多媒体服务质量保证(QoS)、数据库、传感器和执行元件、客户终端、流媒体技术
- 多媒体工具、应用系统:超媒体系统、用户接口、著作工具、多媒体教育系统、分布式多媒体系统和应用、虚拟空间的设计和应用、系统集成
- 计算机图形、虚拟现实、多媒体人机交互、多媒体与CSCW

二、关于投稿的重要日期:

投稿截止日期(以邮件寄出日期为准):2004年7月20日;录取通知:2004年8月4日以前;正式稿件发回:2004年8月20日以前

NCMT2004上的优秀论文将推荐到国内著名学术刊物上发表,其中包括电子学报、系统仿真学报等。

程序委员会主席:钟玉琢 教授(清华大学计算机系) 组织委员会主席:蒋刚毅 教授(宁波大学信息学院)

三、征文要求:

1. 反映在多媒体及相关技术领域中的技术和应用研究成果
2. 未在其他会议或刊物上公开发表
3. 每篇来稿篇幅不超过6页,按A4纸排版,论文格式参见会议主页
4. 每篇论文务请附上作者联系信息(电话、通讯地址、电子邮件)
5. 来稿请寄:北京清华大学计算机系人机交互与多媒体集成研究所 孙立峰 收,邮编:100084
同时将论文电子版以 word 或 pdf 格式用 E-mail 方式发至 ncmt04@media.cs.tsinghua.edu.cn

四、联系方式

联系人:孙立峰 田淑珍 (清华大学计算机系) 电话:010-62786910,62784141 传真:010-62771138

电子邮件:ncmt04@media.cs.tsinghua.edu.cn

有关会议的更详细信息请访问 <http://medialab.cs.tsinghua.edu.cn/~ncmt04>