

一种基于三维模型的文物碎片线图生成方法

李 璨,耿国华,李 康,解国栋,马凯航
(西北大学 信息科学与技术学院,陕西 西安 710127)

摘 要:考古绘图是文化遗产的重要存档资料,传统方法由人工绘制得到,效率低、精度差。文中依据考古绘图的独特需求,针对陶土类文化遗存数字化三维模型,提出一种自动化生成考古线图的方法。该方法采用扫描得到的兵马俑碎片三维模型,预处理后提取三维模型的轮廓线和脊线特征,并据此生成其考古线图。该方法从数学和算法角度上可为自动生成矢量线图的具体实现提供理论依据,具有视角可变、可用性强的特点,显著提高了考古绘图效率。

关键词:三维模型;兵马俑碎片;考古线图;轮廓线;脊线

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)07-0025-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.007

A Method of Obtaining Cultural Debris's Line Chart Based on Three-dimensional Model

LI Can, GENG Guo-hua, LI Kang, XIE Guo-dong, MA Kai-hang
(College of Information Science and Technology, Northwest University,
Xi'an 710127, China)

Abstract: Archaeological drawing is an important archive of heritage which traditional method is made by manual work, with low efficiency and poor precision. In this paper, based on the unique needs of archaeological drawing for clay class cultural relics digital 3d model, put forward a method of automatically obtaining the archaeological line chart. The method uses a scanned fragments of Terracotta three-dimensional model, after pretreatment to extract the 3d model of contour line and ridge line features, and obtain the archaeology chart with it. The method from the angle of mathematics and algorithms could be used to automatically obtain the vector diagram provides the theory basis for the implementation, it has the characteristics of the angle variable, strong usability, significantly improving the efficiency of archaeological drawing.

Key words: 3d model; Pieces of the Terra Cotta Warriors; archaeological line chart; contour line; ridges

0 引言

随着信息技术的飞速发展,三维激光扫描、计算机图形处理、虚拟现实等技术大大促进了考古学发展。90年代后,非真实感图像学迅速发展,它能使计算机通过图像或模型自动生成原来依赖于手工绘制的图画,这与由计算机自动生成考古线图的目的是一致的。国外一些学者开展了对非真实感绘制技术的研究,这也为考古线图自动化绘制的实现带来了新的希望。后来有人将非真实感绘制技术应用于考古,并取得了一些成效^[1]。

国内外的非真实感绘制技术分为基于图像空间的绘制和基于三维场景的绘制。前者将图像作为输入,

后者则以三维场景的几何模型作为输入。三维非真实感用空间对模型进行夸张,其重要因素是投影和透视。Zorin等研究了透视变换和扭曲变形^[2];Max对投影到观察平面的变形进行研究并探索了半球形表面投影技术^[3];Dorsey等研究倾斜角在平面的投影^[4];李胜等提出了曲线追踪算法的非真实感绘制算法,使人可以看到物体的多面^[5];于金辉等将手工绘制过程建模,用于自动生成卡通作品^[6];Lake等利用纹理映射实现三维铅笔画的制作等^[7]。

文中研究基于非真实感绘制技术,通过扫描得到兵马俑碎片的三维模型,提取三维模型脊线特征,绘制得到碎片线图生成方法。首先在利用三维激光扫描仪

扫描得到兵马俑碎片的三维数据(三角网格模型)的基础上,通过去噪、补洞和简化对三维模型进行预处理,然后通过随机检测算法检测预处理后的三维模型的轮廓线,接着运用最小二乘法对每个顶点及其邻域内各顶点进行局部曲面拟合并通过计算曲率极值系数的方式判定出三维模型的脊点,最后通过“跟踪法”生成三维模型的脊线特征,完成兵马俑碎片的线图绘制,如图 1 所示。算法流程如图 2 所示。

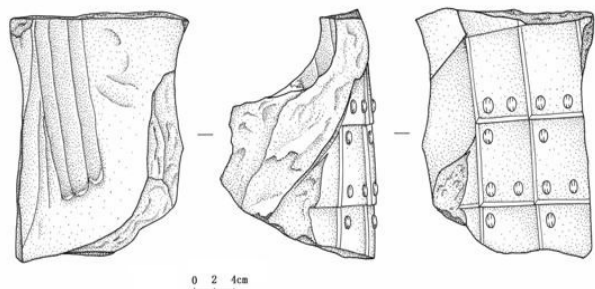


图 1 考古手绘线图示例

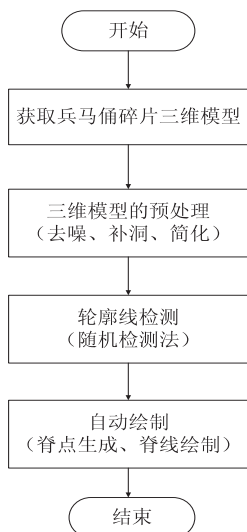


图 2 线图生成流程图

1 兵马俑碎片的三维模型采集及其预处理

1.1 俑片三维模型的采集

采用加拿大形创公司的 VIUScan 高精度手持式三维激光扫描仪采集文物碎片三维数据,构建三维模型,模型精度可达毫米级,数据采用 obj 格式保存。图 3 是一张经过 VIUScan 扫描后在计算机上重建的 obj 碎片模型效果图。

1.2 三维模型预处理

初步采集到的兵马俑碎片的三维模型因存在着冗余、噪声和孔洞,需对其进行预处理,主要分为去噪、补洞和简化三步。

第一,去噪。文中使用 K -邻域搜索算法与人工删除相结合的方法去除噪声^[8]。首先,需利用 K -邻域搜索算法确定离群的噪声点,删除这些噪声点以及它们

之间的拓扑关系;然后,通过鼠标选择模型中剩余孤立面片,并删除。重复这两个步骤,直至将模型中的明显的噪声完全去除。

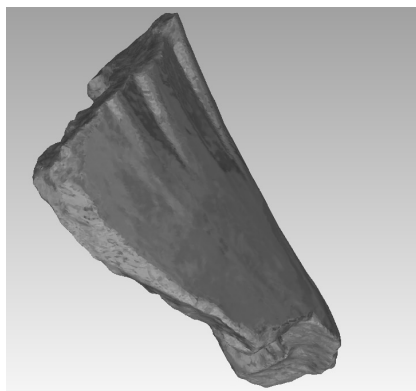


图 3 obj 格式碎片模型重建效果图

第二,补洞。修补三维模型的孔洞实际上是对缺失数据的再创造,目前并没有一个完善的标准来衡量孔洞的填补效果。文中采用西北大学可视化所自主研发的三角网格模型孔洞修补系统,对兵马俑碎片三维模型上的孔洞进行修补。该系统的算法思想是先提取模型孔洞的边界,利用孔洞边界的三角面片法向量信息将孔洞边界上的点投影到一个平面上,形成一个二维多边形区域,然后在多边形内部插入离散点并三角网格化,再利用移动最小二乘近似法求取内差点的高度值,完成对三角网格模型孔洞的修补。

第三,简化。对三维模型的简化采用资料中的方法,一种在 Garland 算法基础上引进三角形重要度概念的边折叠三角网格简化算法^[9]。Garland 在 1997 年提出了二次误差测度的边折叠方法,对每个顶点 $v = [v_x, v_y, v_z]^T$,定义其误差为 v 与其相关联平面集合 $\text{planes}(v)$ 的距离平方和。这个误差测度可写成二次型形式:

$$\Delta(v) = \sum_{p \in \text{planes}(v)} (p^T v)^2 = \sum_{p \in \text{planes}(v)} v^T (p p^T) v = v^T \left(\sum_{p \in \text{planes}(v)} K_p \right) v \quad (1)$$

其中, p 是由方程 $ax + by + cz + d = 0$ ($a^2 + b^2 + c^2 = 1$) 定义的与 v 相关联三角形所在平面; K_p 是平面 p 的基本误差二次型:

$$K_p = p p^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

而改进后的算法将 $\lambda_{v,p} = 1 - |n_v \cdot n_p|$ ($\lambda_{v,p} \in [0, 1]$) 定义为三角形 p 相对于顶点 v 的重要度。其中 n_v 是顶点 v 的法向量, n_p 是三角形 p 所在平面的法向量且 $|n_v| = 1, |n_p| = 1$ 。且该方法将三角形重要度加入了二次误差测度,修改后的二次误差测度可以写作:

$$\Delta'(v) = \mathbf{v}^T \left(\sum_{p \in \text{planes}(v)} (1 - |\mathbf{n}_v \cdot \mathbf{n}_p|) \mathbf{K}_p \right) \mathbf{v} = \mathbf{v}^T \left(\sum_{p \in \text{planes}(v)} \lambda_{v,p} \mathbf{K}_p \right) \mathbf{v} \quad (3)$$

由于引入了三角形重要度,新二次误差测度不但能够度量距离偏差,而且体现了局部表面变化程度。新的误差测度有利于特征的保持。

图4为经过预处理的碎片模型。

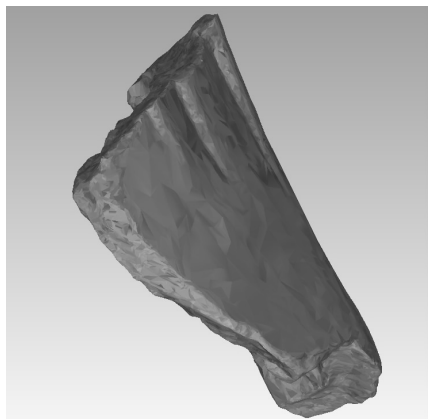


图4 经过预处理的碎片模型

2 轮廓线检测

轮廓线是三维模型的重要特征,它刻画了模型的大致轮廓和形状,呈现了三维模型的基本外观^[10]。轮廓线检测技术不仅关系到非真实感绘制最终效果的好坏,而且也是影响整体绘制速度的关键。

用计算机自动生成物体的轮廓线非真实感绘制的核心技术。该技术主要包括轮廓线检测和可见性问题两个方面。

2.1 轮廓线检测算法

轮廓线检测方面,文中采用物体空间的轮廓线检测技术中的随机检测算法^[11]。

该算法根据轮廓线的两个特性来实现轮廓线的检测。第一个特性是不会存在单一的轮廓线,轮廓线通常由多个轮廓边连接成。第二个特性是当视点位置发生较小变化时,上一帧中的大部分轮廓线会出现在下一帧中。

该算法基本思想是首先找到一小部分轮廓边,然后判断这些边的相邻边是否也为轮廓边,再以递归形式一直判断下去直至找到的轮廓边数量超过特定阈值。这种方法不需遍历三维模型所有的边,可以简单高效地完成轮廓线。

2.2 可见性问题

在非真实感绘制中,可见性问题至关重要。在三维模型中存在着面与面之间相互遮挡,导致并非所有轮廓线都是可见的。对于不可见的轮廓线可根据它的重要程度来决定将其用虚线绘制还是直接舍弃不绘

制。

文中采用后向面判别法和轮廓边的端点判别法相结合的方式,来处理兵马俑碎片轮廓线检测中的可见性问题。后向面判别法是指判别出不可见的后向面(外法线方向背向视点方向的面,即外法线向量与视点向量间的夹角大于90度的面)并将其全部剔除的方法。而轮廓线的端点判别法是指若轮廓边的两个端点都可见,则轮廓边可见;若两个端点都不可见,则轮廓边不可见;若两端点一个可见一个不可见,则将该轮廓边投影到 xoy 平面,求取它们投影间的交点,并求出该交点在轮廓边上的对应点,若此交点在面之后,则该交点为分界点,应予以保留,否则舍弃。文中将二者结合,以此实现在保证可见性判断结果准确的前提下,提高不可见轮廓线的剔除速度。

3 兵马俑碎片的平面线图自动绘制

特征线可用来传达物体的形状和纹理信息。平面线图自动绘制离不开特征线的提取。

3.1 脊线的定义

三维模型的脊线是与视点无关的特征线。这类特征线代表的是三维模型本身的几何特性,不会随视点选取不同而有所变化。选取脊线表达兵马俑碎片的几何特征。要提取脊线,首先要确定与提取三维网格模型的脊点。借助资料中给出的脊点定义,脊点是指三维模型上满足式(4)的点^[12]。

其中 k_{\max} 和 k_{\min} 分别为顶点的最大主曲率和最小主曲率, t_{\max} 和 t_{\min} 分别为相应的主方向, e_{\max} 和 e_{\min} 则称为极系数。提取到脊点后将其按一定序列连接起来便可得到三维模型的脊线。

$$\begin{cases} e_{\max} = \partial k_{\max} / \partial t_{\max} = 0 \\ \partial e_{\max} / \partial t_{\max} < 0 \\ |k_{\max}| > |k_{\min}| \end{cases} \quad (4)$$

3.2 脊点的提取

首先,为提取兵马俑碎片的三维网格上的脊点,需对三角网格各顶点处进行局部曲面拟合,根据所在局部曲面上的集合特征信息判断顶点是否为脊点。这里,采用Goldfeather等提出的邻接法线立方体拟合法^[13],对每个顶点及其邻域中的各顶点以最小二乘法按式(5)所示的三次多项式进行拟合。

拟合过程中采用的顶点集合取自网格上相应顶点的 $k(k=1,2,3\cdots)$ 邻域中的各顶点。 k 越大,曲面越光滑。

$$f(x, y) = \frac{1}{2}(b_0x^2 + 2b_1xy + b_2y^2) + \frac{1}{6}(c_0x^3 + 3c_1x^2y + 3c_2xy^2 + c_3y^3) +$$

$$\frac{1}{24}(d_0x^4 + 4d_1x^3y + 6d_2x^2y^2 + 4d_3xy^3 + d_4y^4) + \dots \quad (5)$$

然后,文中采用计算曲率极值系数的方法来判定脊点^[14]。曲率极值系数可由公式(6)计算得到。其中, $t=(t_1, t_2)$ 为局部拟合后坐标原点 $h(0,0)$ 处对应于主曲率 k 的主方向, c_0 到 c_3 是拟合所用的三次多项式(式(5))的系数。

$$e = \frac{\partial k}{\partial t} = \begin{pmatrix} t_1^2 \\ t_2^2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} c_0 & c_1 \\ c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

最后,根据得到的曲率极值系数,在某顶点处若同时满足式(4)中的三个条件,则该顶点是兵马俑碎片三维模型的脊点。

3.3 脊线的生成

由脊点生成脊线,首先要选取两个脊点 r_1, r_2 作为脊线 R 的起始点。然后分别以 r_1, r_2 作为搜索点,以主方向 $t_{\min}(r_1)$ 和 $t_{\min}(r_2)$ 作为搜索方向,在搜索点的二邻域内寻找后续点,“跟踪”生成脊线^[15]。具体分为以下几步:

(1)寻找起始点。若三角网格 T 中存在两个脊点 r_1, r_2 ,则以它们作为脊线 R 的起始点,先选择 r_2 的主方向 $t_{\min}(r_2)$ 作为搜索方向。并将 r_1, r_2 从网格的脊点序列中去除。

(2)寻找新的搜索点。首先查找搜索点的一邻域,若该邻域中存在脊点,则进一步判断它们和搜索点所构成的向量中是否存在与 $t_{\min}(r_2)$ 的最小夹角小于 θ 的情况。

若存在,则将满足该条件的脊点 s 作为新的搜索点,以 s 的主方向 $t_{\min}(s)$ 为新的搜索方向。若不存在满足条件的脊点,则在当前搜索点的二邻域进行判断。找到满足条件的脊点后,转步骤(3),否则转步骤(4)。

(3)将新搜索点 s 从网格的脊点序列中去除,并保存在脊线 R 中。重复步骤(2)。

(4)在沿 $t_{\min}(r_1)$ 方向搜索完成后,转至步骤(5)。否则,以 r_1 的主方向 $t_{\min}(r_1)$ 进行反向搜索。重复步骤(2)。

(5)重复步骤(1)到步骤(4),直到无法为新的脊线找到起始点。

图5为起始点与后续点寻找示意图。

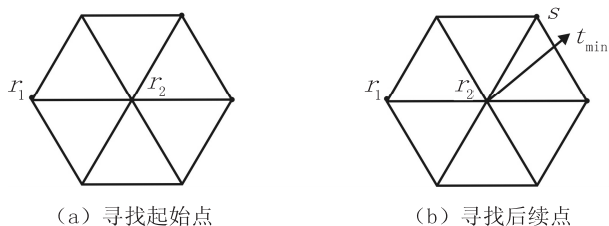


图5 起始点与后续点寻找示意图

至此,兵马俑碎片的线图生成工作已基本完成。

4 实现环境与结果展示

文中所述方法的实现基于以下环境:

系统环境: Windows 7 旗舰版 32 位/Windows XP 32 位;

软件平台: Matlab R2012a;

硬件配置: CPU 为 core i5 M460 2.53 G; 内存 DDR3 1333Hz 4 G。

结果图展示如图6所示。

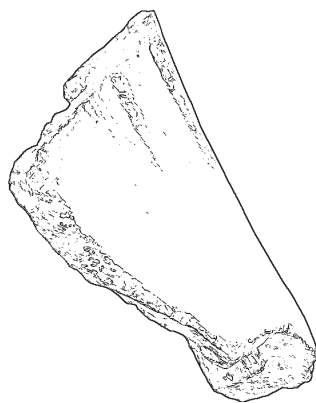


图6 碎片模型线图绘制结果展示

参考文献:

- [1] 李智慧. 基于图像的非真实感绘制—线条画绘制与素描画绘制[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- [2] Zorin D, Barr A H. Correction of geometric perceptual distortion in pictures[C]//Proceedings of the 22nd annual conference on computer graphics and interactive techniques. [s. l.]: [s. n.], 1995: 257-264.
- [3] Max N L. Computer graphics distortion for IMAX and OMN-IMAX projection[C]//Proceedings of NICOGRAPH'83. [s. l.]: [s. n.], 1983: 137-159.
- [4] Dorsey J B, Sillion F X, Greenberg D P. Design and simulation of opera lighting and projection effects[J]. Computer Graphics, 1991, 25(4): 41-50.
- [5] 李 胜, 孟祥旭. 基于曲线光线追踪的非真实感绘制算法[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 544-547.
- [6] 于金辉, 尹小勤, 彭群生. 一个卡通动画雨模型[J]. 软件学报, 2002, 13(9): 1882-1887.
- [7] Lake A, Marshall C, Harres M, et al. Stylized rendering techniques for scalable real-time 3D animation[C]//Proceedings of non-photorealistic animation and rendering. [s. l.]: [s. n.], 2000: 13-20.
- [8] Saleem W, Schall O, Patane G, et al. On stochastic methods for surface reconstruction[J]. Visual Computer, 2007, 23(6): 381-395.
- [9] 杜晓晖, 尹宝才, 孔德慧. 一种边折叠三角网格简化算法

样本中的异常值。

5 结束语

文中提出的基于改进 RBF 神经网络的异常检测算法克服了传统算法泛化能力弱,容易过拟合等问题,提高了混度预测的精确度,从而保证了异常检测的准确性。实验结果表明,改进的 RBF 神经网络模型与 RBF 神经网络模型相比,预测误差更小,利用 RBF 神经网络对具备混沌特性的电力负荷数据集进行异常检测是可行的。

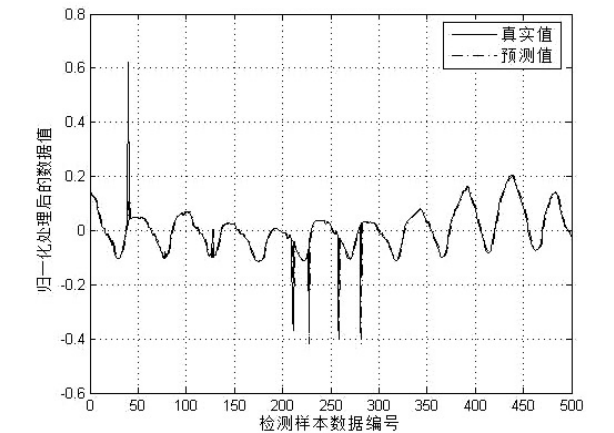


图4 检测样本值与预测值对比图

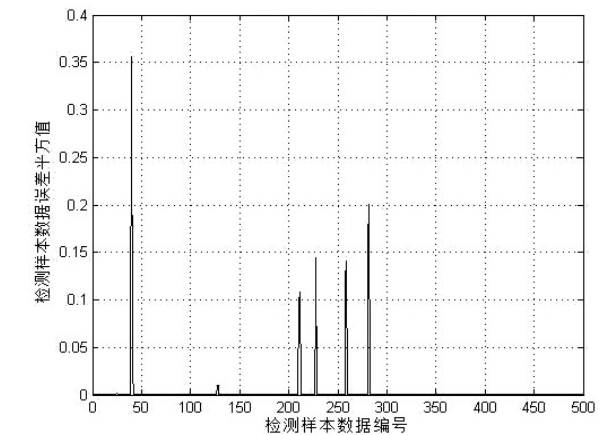


图5 检测样本误差平方值

参考文献:

[1] Angiulli F,Fassetti F. Very efficient mining of distance-based outliers[C]//Proc of the 16th ACM conference on information and knowledge management. New York, NY, USA: ACM Press,2007:791-800.

[2] Koufakou A,Secretan J,Reeder J,et al. Fast parallel outlier detection for categorical datasets using MapReduce[C]//Proc of IEEE international joint conference on neural network. Hong Kong, China: IEEE,2008.

[3] 王建州,马志新,李 廉. 基于混沌的异常数据的动态识别与挖掘[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(S1): 1753-1756.

[4] 张军峰,胡寿松. 基于一种新型聚类算法的 RBF 神经网络混沌时间序列预测[J]. 物理学报,2007,56(2):713-719.

[5] 谢忠玉. 电力短期负荷时间序列混沌特性分析及预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

[6] 张淑清,贾 健,高 敏,等. 混沌时间序列重构相空间参数选取研究[J]. 物理学报,2010,59(3):1576-1582.

[7] Liu Jinhai,Feng Jian,Guan Fusheng. Research on RBF neural network method of singularity detection in chaotic time series [C]//Proc of 2010 2nd international conference on signal processing systems. Dalian: IEEE,2010.

[8] Zhou P,Li D. A non-orthogonal and multi-width RBF neural network for chaotic time series prediction[M]//Green Communications and Networks. Netherlands: Springer,2012.

[9] 陆振波,蔡志明,姜可宇. 基于改进的 CC 方法的相空间重构参数选择[J]. 系统仿真学报,2007,19(11):2527-2529.

[10] 郭 伟. 基于互信息的 RBF 神经网络结构优化设计[J]. 计算机科学,2013,40(6):252-255.

[11] 杨 虎,王会琦,程代杰. 基于预测的序列异常数据挖掘[J]. 计算机科学,2004,31(4):117-119.

[12] 陶运信,皮德常. 基于邻域和密度的异常点检测算法[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2008,26(4):398-403.

[13] 曹安照,田 丽. 基于 RBF 神经网络的短期电力负荷预测[J]. 电子科技大学学报,2006,35(4):507-509.

[14] 胡迎松,陈 明,范志明. 一种电力系统短期负荷预测的 RBF 优化算法[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2003,20(3):8-10.

(上接 28 第页)

[J]. 计算机工程,2007,33(12):12-15.

[10] Decarlo D,Finkelstein A,Rusinkiewicz S,et al. Suggestive contours for conveying shape[J]. ACM Trans on Graphics,2003, 22(3):848-855.

[11] 沈映泉. 基于文物三维模型的考古绘图自动绘制方法研究与实现[D]. 西安:西北大学,2011.

[12] Ohtake Y,Belyaev A,Seidel H P. Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting [J]. ACM Transactions on

Graphics,2004,23(3):609-612.

[13] Goldfeather J,Interrante V. A novel cubic-order algorithm for approximating principal direction vectors [J]. ACM Transactions on Graphics,2004,23(1):45-63.

[14] 李 晔,王映辉,刘 晶. 基于脊谷特征提取的三维人脸识别[J]. 计算机工程与应用,2011,47(12):7-11.

[15] 谭一鸣. 网格模型上脊线与谷线的提取[D]. 杭州:浙江大学,2010.

作者：[李璨](#)，[耿国华](#)，[李康](#)，[解国栋](#)，[马凯航](#)，[LI Can](#)，[GENG Guo-hua](#)，[LI Kang](#)，[XIE Guo-dong](#)，[MA Kai-hang](#)
作者单位：[西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安, 710127](#)
刊名：[计算机技术与发展](#) 
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2014(7)

参考文献(15条)

1. [李智慧](#) [基于图像的非真实感绘制-线条画绘制与素描画绘制](#) 2012
2. [Zorin D;Barr A H](#) [Correction of geometric perceptual distortion in pictures](#) 1995
3. [Max N L](#) [Computer graphics distortion for IMAX and OMN-IMAX projection](#) 1983
4. [Dorsey J B;Sillion F X;Greenberg D P](#) [Design and simulation of opera lighting and projection effects](#) 1991(04)
5. [李胜;孟祥旭](#) [基于曲线光线追踪的非真实感绘制算法](#) 2000(05)
6. [于金辉;尹小勤;彭群生](#) [一个卡通动画雨模型](#) 2002(09)
7. [Lake A;Marshall C;Harres M](#) [Stylized rendering techniques for scalable real-time 3D animation](#) 2000
8. [Saleem W;Schall O;Patane G](#) [On stochastic methods for surface reconstruction](#) 2007(06)
9. [杜晓晖;尹宝才;孔德慧](#) [一种边折叠三角网格简化算法](#) 2007(12)
10. [Decarlo D;Finkelstein A;Rusinkiewicz S](#) [Suggestive contours for conveying shape](#) 2003(03)
11. [沈映泉](#) [基于文物三维模型的考古绘图自动绘制方法研究与实现](#) 2011
12. [Ohtake Y;Belyaev A;Seidel H P](#) [Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting](#) 2004(03)
13. [Goldfeather J;Interrante V](#) [A novel cubic-order algorithm for approximating principal direction vectors](#) 2004(01)
14. [李晔;王映辉;刘晶](#) [基于脊谷特征提取的三维人脸识别](#) 2011(12)
15. [谭一鸣](#) [网格模型上脊线与谷线的提取](#) 2010

引用本文格式：[李璨](#).[耿国华](#).[李康](#).[解国栋](#).[马凯航](#).[LI Can](#).[GENG Guo-hua](#).[LI Kang](#).[XIE Guo-dong](#).[MA Kai-hang](#) 一种基于三维模型的文物碎片线图生成方法[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(7)