

引用格式:陈 强,张立红. 数字博物馆文物图像真实性再现仿真系统设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 195-200

Chen Qiang, Zhang Lihong. Design of simulation system for authenticity reproduction of cultural relics in digital museum[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 195-200

数字博物馆文物图像真实性再现 仿真系统设计

陈 强 张立红

(南京博物院,南京 210016)

摘 要 为了解决传统系统噪声抑制能力差、容易出现空洞缺失、文物图像再现质量差、细节不丰富等问题,设计了一种数字博物馆文物图像真实性再现仿真系统。将 Visual C++ 和 VTK 当成系统设计平台,利用 FSL 总线完成对三维重建 IP 核与 MicroBlaze 软件间的连接,设计系统硬件结构图。引入聚类思想,通过点云双边滤波器滤除小尺度噪声。针对点云数据三角剖分过程中的孔洞现象进行填补处理。选用 B 样条函数最小二乘法进行曲面拟合,通过 UV 映射建立二维纹理坐标,把图像纹理映射至曲面网格,实现文物图像三维重建。结果发现:设计系统展示结果有逼真的细节纹理;得到的三维重建结果信息熵、平均梯度、信噪比和等效系数均较优。

关键词 数字博物馆 文物图像 真实性 再现 仿真系统

中图分类号 TP391; **文献标志码** A

数字博物馆是为了满足文物专家与文物爱好者对文物的研究设立的,其把文物数据保存在网络中供用户下载^[1,2]。数字博物馆中的文物三维数字模型为了最大程度展示文物原貌,具有文物的形状与颜色信息,大部分通过三维扫描仪扫描得到^[3]。

为了使数字博物馆文物图像真实性再现,需准确重建文物三维模型,通过虚拟现实技术进行三维可视化展示,使得人们可在三维虚拟环境中多角度浏览文物图像^[4]。

通过三维扫描仪采集的文物图像数据存在大量噪声,需对其进行预处理,通常通过插值方式进行曲线拟合,达到三维重建的目的。传统顶点样条方法具有能量极小性质,重建质量好,然而处理数据规模小,不适于大规模数据三维重建;加权方法需利用求解联立方程组的方式获取插值曲面,对整个数据进行细化处理,效率低下^[5]。设计了一种新的数字博物馆文物图像真实性在线仿真系统,对文物图像数据进行去噪处理,进行三角网格剖分,对网格孔洞进行填补,在此基础上通过 B 样条函数最小二乘法拟合实现三维重建,在开发平台完成三维展示,达到数值博物馆文物图像真实性再现的目的。

1 系统结构设计

1.1 开发平台

把 Visual C++ 和 VTK 当成系统设计平台,利用 Visual C++ 实现对系统界面的设计,并进行核心算法编程^[6,7]。VTK 面向对象实现,其内核通过 Visual C++ 建立,基本上可在每个 Unix 平台上完成操作,主要用于实现可视化处理。

VTK 视觉化工具函数库是一种图像应用数据库^[8],存在开放源码、支持跨平台操作的特性,主要有图像处理、可视化处理和显示功能。文章图像处理即针对数字博物馆文物图像进行三维重建,通过可视化处理对三维重建结果进行真实性再现,展示给用户。

1.2 系统硬件结构

在设计系统中,对数字博物馆文物图像原始数据进行预处理,将其变成三维点云数据场,进行三维重建处理^[9]。硬件利用 FSL 总线完成对三维重建 IP 核与 MicroBlaze 软件间的连接,从而达到硬件加速的目的,图 1 描述的是系统硬件结构图。

2 文物图像真实性再现仿真研究

2.1 三维点云数据去噪

数字博物馆中文物图像数据通常通过三维激光扫描仪采集,含大量噪声,大部分是高频噪声,去噪可利用低通滤波原理将高频噪声滤除^[10]。然而很

2018 年 11 月 7 日收到

第一作者简介:陈 强(1981—),男,汉族,江苏盐城人,硕士,馆员。
E-mail:chenqiang23@2980.com。

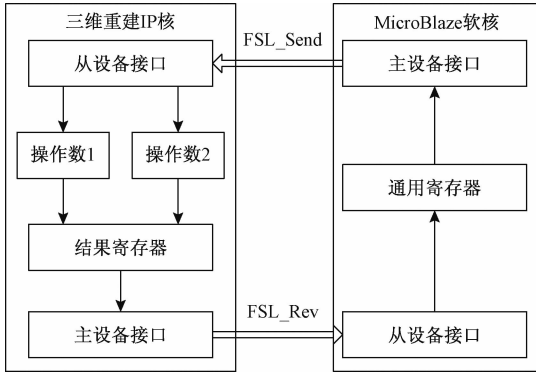


图1 系统硬件结构设计

Fig.1 Design of hardware structure of the system

多文物图像尖锐特征也属于高频信息,低通滤波去噪会导致文物图像数据的尖锐噪声被滤除,不能有效实现文物图像真实性再现。

为了解决以上问题,引入聚类思想^[11],把三维点云数据中的噪声划分成大尺度噪声与小尺度噪声,通过优化 C 均值算法滤除大尺度噪声,通过点云双边滤波器滤除小尺度噪声。

优化的 C 均值聚类算法引入模糊权重因子 ω ,可对数据集中离群点特征进行扩大,提高聚类精度^[12]。优化后第 m 个对象到第 i 个聚类中心 c_i 的欧式距离可通过式(1)求出:

$$d_{im}^2 = \left\| \frac{\mathbf{u}_m - \mathbf{c}_i}{\omega_{im}} \right\|^2 \quad (1)$$

式(1)中, ω_{im} 用于描述第 m 个对象到第 i 个聚类中心的模糊权重因子 $\omega_{im} = \frac{h_{im}}{\omega_i}$, h_{im} 用于描述数据集 $D = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中第 m 个对象隶属度函数; ω_i 用于描述第 i 个聚类中心的模糊权重因子。通过引用的权重因子可减小噪声的干扰。

采用优化的 C 均值聚类算法进行大尺度噪声去噪的过程为,若对象 u_m 辐射范围内临近点数量低于阈值,则认为对象 u_m 是噪声数据,将其滤除;反之将 u_m 移向聚类中心。

针对小尺度噪声,通过点云双边滤波,公式如下:

$$s = s + \varepsilon N \quad (2)$$

式(2)中, s 用于描述数据点; ε 用于描述双边滤波权因子; N 用于描述数据点 s 的法向。对于法向 N 可通过主成分分析法与空间平面最小二乘拟合法确定^[13]。

双边滤波的重点在于求出权重因子,能够使数据点顺着法向方向移动,通过下式对双边滤波权因子 ε 进行计算:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{m_{ij} \in H(s_i)} G_{\chi_a}(\|s_i - m_{ij}\|) G_{\chi_s}(\langle N_i, s_i - m_{ij} \rangle) \langle N_i, s_i - m_{ij} \rangle}{\sum_{m_{ij} \in H(s_i)} G_{\chi_a}(\|s_i - m_{ij}\|) G_{\chi_s}(\langle N_i, s_i - m_{ij} \rangle)} \quad (3)$$

式(3)中, $H(s_i) = \{s_{ij}\}$, $i \leq j \leq m$ 用于描述数据点 s_i 邻域点的隶属度。光顺滤波即使用标准的高斯滤波,公式描述如下:

$$G_{\chi_a}(x) = e^{-\frac{x^2}{2\chi_a^2}} \quad (4)$$

特征保持权重函数为

$$G_{\chi_s}(y) = e^{-\frac{y^2}{2\chi_s^2}} \quad (5)$$

式中, χ_a 用于描述数据点 s_i 与各邻域点间的距离相对点 s_i 的影响因子; χ_s 用于描述数据点 s_i 与邻近点间的距离向量相对点 s_i 法向 N_i 上的投影对 s_i 的影响因子。通过点云双边滤波进行小尺度去噪的过程如下:

(1) 对文物图像数据点 s_i 的 k 个邻近点 m_{ij} 进行计算,这里 $j = 1, 2, \dots, k$ 。

(2) 对 m_{ij} 光顺滤波函数的参数进行计算, $x = \|s_i - m_{ij}\|$, 用于描述数据点 s_i 与邻近点 m_{ij} 间的距离;对特征保持权重函数的参数进行计算, $y = \langle N_i, s_i - m_{ij} \rangle$, 用于描述数据点 s_i 与邻近点 m_{ij} 的距离向量 $s_i - m_{ij}$ 和数据点 s_i 的法向 N_i 的内积。

(3) 先通过式(4)与式(5)对光顺滤波函数 G_{χ_a} 与特征保持权重函数 G_{χ_s} 进行计算,再通过式(3)对双边滤波权因子 ε 进行计算。

(4) 求出滤波后的新数据点 s_i , $s_i = s_i + \varepsilon N_i$ 。

(5) 完成各数据点 s_i 的更新,退出程序。

2.2 三角剖分网格化处理

通过三角剖分建立数据点拓扑关系,完成文物图像三维重建。三角剖分基本思想如下:在文物图像数据点集中,任取一点 A , 在剩下点中搜寻和 A 间隔最小的点 B , 将 AB , 相连,获取 AB 的中垂线 EF , 和 AB 相较于点 Q 。依据数学原理可以看出, AB 的外接圆圆心一定在 AB 的中垂线上,随着圆心的改变,半径逐渐增加,一定有第三点 C 符合共圆条件,同时圆内没有其余顶点,也就是 C 符合 Delaunay 三角形条件^[14]。

设圆心为 $O(x, y)$, 其通过改变在中垂线上的位置调整半径尺寸,由此确定第3点,根据 A 、 B 两点坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 建立直线方程,即:

$$(x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y = \frac{x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2}{2} \quad (6)$$

根据半径公式可以知道,若有第3点 $C(x_c, y_c)$ 符合共圆条件,则存在:

$$(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = (x_c - x)^2 + (y_c - y)^2 \quad (7)$$

随着 $O(x, y)$ 位置的变化,半径逐渐增加,在 $C(x_c, y_c)$ 符合式(7)的情况下, C 为第三点,连接 AC 、 BC , 建立三角形。将 AC 与 BC 看作待扩展边,重复上述操作,完成对点云的三角剖分处理。

针对点云数据三角剖分过程中的孔洞现象,利用人机交互的形式对其进行识别,通过优先前序网格技术构造匹配网格,对网格孔洞进行填补^[15]。

2.3 曲面拟合

完成上述处理后,进行曲面拟合,通过 UV 映射建立二维纹理坐标,把图像纹理映射至曲面网格,实现文物图像三维重建,达到真实性再现的目的。

本节曲面拟合选用 B 样条函数最小二乘法曲面拟合法,曲面拟合是线性插值的反问题,主要为了找到光滑插值基函数,建立含全部文物图像点云数据的最小矩形,把矩形部分规则化,拟合曲面控制点网格的值,通过线性插值逼近原始数据。

假设存在 M 个文物图像点云数据点 $f_i(x, y)$, 针对双自变量点集 $I = \{(x_i, y_i, z_i) | z_i = f(x_i, y_i)\}$, 建立平面控制点网格矩阵。假设 I 的极值量为 $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$, 则水平和垂直方向网格单元数量为:

$$U_r = \text{int}\left(\frac{U_{\max} - U_{\min}}{\xi_{\text{size}}}\right) + 1 \quad (8)$$

$$V_r = \text{int}\left(\frac{V_{\max} - V_{\min}}{\xi_{\text{size}}}\right) + 1 \quad (9)$$

则可通过 xOy 平面中最小平面矩形区域 $\Pi = \{(x, y) | 0 \leq x \leq U_r, 0 \leq y \leq V_r\}$ 对数据点集 I 在平面的投影部分进行描述。

一个文物图像点云数据可通过和其相邻的控制点网格确定。假设用 P 描述控制点网格 W_{ij} 的邻域点集,则有:

$$P = \left\{ (x_i, y_i, z_i) \in I \mid i-2 \leq x_i < i+2 \right. \\ \left. j-2 \leq y_i < j+2 \right\} \quad (10)$$

邻域点集 P 中各点形成的 W_{ij} 存在差异,为了获取 W_{ij} 值,通过最小二乘法拟合曲面,假设目标函数是 W_{ij} 点对函数 f 在点 (x_i, y_i) 处的实际贡献和期望值之差的平方和,则有:

$$J = \sum_{i=1}^M \left| f(x_i, y_i) - \sum_u \sum_{j_t} W_{iu, j_t} \varphi(x_i - x_{iu}) \times \right. \\ \left. \varphi(y_i - y_{j_t}) \right|^2 \quad (11)$$

式(11)中, φ 表示 B 样条函数。

令目标函数达到最小,也就是将其对 W_{ij} 求导,计算拟合参数:

$$\frac{\partial J}{\partial W_{iu, j_t}} = \sum_{i=1}^M \left[2 \sum_{it} \sum_{j_t} W_{iu, j_t} \varphi(x_i - x_{iu}) \varphi(y_i - y_{j_t}) - \right. \\ \left. f(x_i, y_i) \right] \varphi(x_i - x_{iu}) \varphi(y_i - y_{j_t}) = 0 \quad (12)$$

式中, $\alpha(x_i - x_{iu})$ 、 $\beta(y_i - y_{j_t})$ 、 $f(x_i, y_i)$ 都是已知参数。对上述方程进行求解即可获取 W_{ij} , 从而得到数据点值。用有限的规则控制网格点的 W_{ij} 代表原有很多文物图像点云数据,达到曲面拟合的目的,实现文物图像三维重建。

3 实验结果和分析

3.1 实验数据和环境

实验选用数字博物馆中提梁点不同角度图像数据 40 张,进行实验测试。实验现场见图 2。



图 2 实验现场

Fig. 2 Experimental site

将设计系统源代码在 Windows 7.0 环境下编译,同时形成运行窗口,导入文物图像和三维扫描仪扫描数据,进行相关参数设置,产生密集点云,为文物图像真实性再现提供依据。

3.2 系统处理过程

三维扫描仪采集提梁点云数据用图 3 进行描述。

对图 3 所示的点云数据进行去噪处理,数据点辐射对象范围内临近点阈值是 15,过滤大尺度噪声,其余大尺度噪声和小尺度噪声实现部分光滑,有很好的效果,如图 4 所示。

分析图 4 可知,所设计系统可有效去除数据噪声,不仅如此,所提系统过滤时仅执行一次即可,有效增强三维点云数据的准确性。

采用所提系统继续对其进行处理,获取带孔洞的提梁点三维模型,如图 5 所示。

针对图 5 中的孔洞部分进行填补处理,结果用

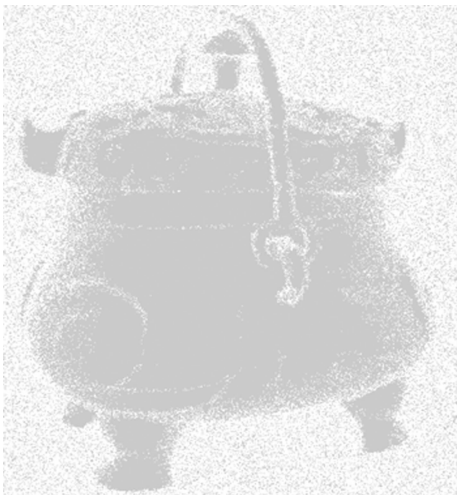


图 3 采集提梁卣点云数据

Fig. 3 Collecting points and cloud data of lifting beams

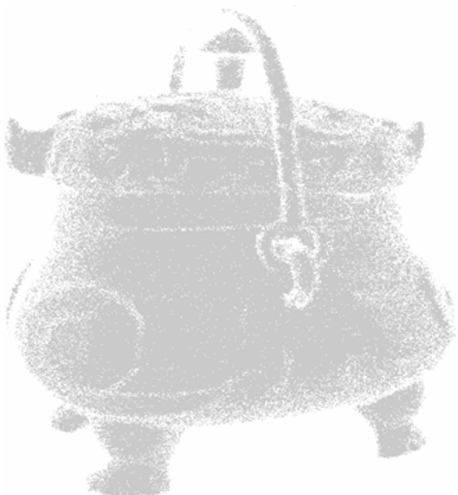


图 4 点云数据去噪处理

Fig. 4 Denoising of point cloud data



图 5 带孔洞的提梁卣三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of a girder with holes

图 6 进行描述。



图 6 孔洞填补后提梁卣三维模型

Fig. 6 3D model of beam lifting after hole filling

通过曲线拟合获取提梁卣真实性再现仿真图，见图 7。



图 7 所提系统提梁卣真实性再现仿真结果

Fig. 7 Shows the simulation results of the system

分析图 7 可知，所提系统展示结果有逼真的细节纹理，能够清楚地观察提梁卣文物的纹理信息，逼真性强，突出了文物的细节和特点。

3.3 量化测试结果

为了进一步验证所设计系统的有效性，将文献 [6] 系统和文献 [7] 系统作为对比，任意选择某数字博物馆 92 幅文物图像，对其进行真实性再现处理，对处理结果的信息熵、平均梯度、信噪比和等效视数进行统计比较。

信息熵为衡量三维重建图像信息丰富程度的指标,重建图像信息熵越大,认为其信息量增加得越多。

假设 P_i 为三维重建图像中像素灰度值为 i 的概率, L 为三维重建图像总的灰度级数,则可信息熵可描述为:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log_2 P_i$$

(13)

平均梯度也被称作清晰度,是三维重建图像微小细节反差和纹理变化特征的体现,可通过式(4)求出:

$$\bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2 + \Delta I_z^2)/2}$$

(14)

式(14)中, ΔI_x 、 ΔI_y 、 ΔI_z 依次代表水平、垂直和空间纵向的差分, $M \times N$ 代表图像尺寸。图平均梯度值越高,认为清晰度越好。

设三维重建图像和标准参考图像分别为 $F(i, j)$ 和 $R(i, j)$, 则信噪比可通过式(15)求出:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} F^2(i, j)}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [R(i, j) - F(i, j)]^2}$$

(15)

信噪比越高,三维重建图像质量越好。

等效视数为噪声抑制能力的体现,其值越高,噪声抑制能力越强,公式描述如下:

$$ENL = \frac{1}{N} \sum_{i,j} \mu_{i,j}^2 / \varepsilon_{i,j}$$

(16)

式(16)中, $\mu_{i,j}$ 用于描述像素点 (i, j) 的局部均值; $\varepsilon_{i,j}$ 用于描述像素点 (i, j) 的方差; N 用于描述图像全部像素。

在上述分析的基础上,给出所提系统、文献[6]系统和文献[7]系统对 92 幅文物图像衡量指标平均值比较结果,用表 1 进行描述。

表 1 三种系统量化性能测试

Table 1 Three systems quantitative performance testing

系统	信息熵/bit	平均梯度	信噪比/dB	等效视数
所提系统	6.823	18.35	29.5	9.12
文献[6]系统	5.156	16.12	21.3	5.69
文献[7]系统	5.235	12.75	25.2	5.23

分析表 1 可知,采用所提系统对文物图像进行真实性再现处理,得到的三维重建结果信息熵、平均梯度、信噪比和等效系数均优于其他两种系统,说明所提系统三维重建结果纹理信息丰富,图像清晰,质量优,噪声抑制能力强。

4 结论

设计了一种数字博物馆文物图像真实性再现仿

真系统。

(1)把 Visual C++ 和 VTK 当成系统设计平台,利用 Visual C++ 实现对系统界面的设计,并进行核心算法编程。硬件利用 FSL 总线完成对三维重建 IP 核与 MicroBlaze 软件间的连接,从而达到硬件加速的目的,给出系统硬件结构图。

(2)引入聚类思想,把三维点云数据中的噪声划分成大尺度噪声与小尺度噪声,通过优化 C 均值算法滤除大尺度噪声,通过点云双边滤波器滤除小尺度噪声。

(3)通过三角剖分建立数据点拓扑关系,完成文物图像三维重建。针对点云数据三角剖分过程中的孔洞现象,利用人机交互的形式对其进行识别,通过优先序网格技术构造匹配网格,对网格孔洞进行填补。

(4)在上述处理的基础上,利用 B 样条函数最小二乘法曲面拟合法进行曲面拟合,通过 UV 映射建立二维纹理坐标,把图像纹理映射至曲面网格,实现文物图像三维重建,达到真实性再现的目的。

(5)经实验验证,设计系统三维重建结果纹理信息丰富,图像清晰,质量优,噪声抑制能力强。

参 考 文 献

1 刘 琴. 数字博物馆文物图像真实性再现仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6):381-384

Liu Qin. Research on the simulation of the authenticity of sigital museum image[J]. Computer Simulation, 2017, 34(6):381-384

2 周 悦, 陈家新. 基于相关性的医学图像插值算法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(9):2918-2921

Zhou Yue, Chen Jiaxin. Medical image interpolation algorithm based on correlation[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(9):2918-2921

3 杨国梁, 周明全, 武仲科, 等. 数字博物馆文物三维模型基于谱分析的 数字水印技术[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9):2136-2141

Yang Guoliang, Zhou Mingquan, Wu Zhongke, et al. Spectral analysis based watermarking algorithm for 3D mesh of cultural heritage in digital museum[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9):2136-2141

4 杨 磊, 高 昆, 吕丽丽, 等. 基于 Sigmoid-iCAM 色貌模型的真实影像再现算法[J]. 光学技术, 2016, 42(2):121-125

Yang Lei, Gao Kun, Lv Lili, et al. Realistic image rendition algorithm based on Sigmoid-iCAM color appearance model[J]. Optical Technique, 2016, 42(2):121-125

5 Lin S Z, Wang X, Kamiya Y, et al. Topological defects as relics of emergent continuous symmetry and Higgs condensation of disorder in ferroelectrics[J]. Nature Physics, 2014, 10(12):970-977

6 李 展, 陈清亮, 彭青玉, 等. 基于 MAP 的单帧字符图像超分辨率重建[J]. 电子学报, 2015, 43(1):191-197

Li Zhan, Chen Qingliang, Peng Qingyu, et al. MAP-based single-

frame super-resolution reconstruction for character image [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(1):191-197

7 吕雪霜, 杨晓梅. 基于 k -t FOCUSS 和自适应 NLM3D 的动态 MRI 重建[J]. 电子设计工程, 2016, 24(6):92-95

 Lv Xueshuang, Yang Xiaomei. Based on k -t FOCUSS and adaptive NLM3D dynamic MRI reconstruction [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(6):92-95

8 胡长胜, 詹 曙, 吴从中. 基于深度特征学习的图像超分辨率重建[J]. 自动化学报, 2017, 43(5):814-821

 Hu Changsheng, Zhan Shu, Wu Congzhong. Image super-resolution based on deep learning features [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(5):814-821

9 李 欣, 乔志伟, 邵浩伟, 等. 基于 ADMM 的 TV 图像重建算法研究:设计、实现及评估[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25):116-120

 Li Xin, Qiao Zhiwei, Tai Haowei, et al. TV image reconstruction algorithm based on ADMM research: Design, implementation, and evaluation[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(25):116-120

10 Burgess A J, Retkute R, Pound M P, et al. Image-based 3D canopy reconstruction to determine potential productivity in complex multi-species crop systems [J]. Annals of Botany, 2017, 119(4):517-532

11 Cho J H, Fessler J. Regularization designs for uniform spatial resolution and noise properties in statistical image reconstruction for 3D X-ray CT. [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2015, 34(2):678-89

12 赵志升, 张 晓, 梁俊花, 等. 融入背景差分连续重构的心脏医学图像重建[J]. 科技通报, 2015, 31(8):207-209

 Zhao Zhisheng, Zhang Xiao, Liang Junhua, et al. Heart medical image reconstruction based on background difference continuous reconstruction[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(8):207-209

13 魏夏平, 江学文, 马晓勉, 等. 一种结合低秩与稀疏惩罚的 PET 动态图像重建方法[J]. 南方医科大学学报, 2015, 35(10):1446-1450

 Wei Xiaping, Jiang Xuewen, Ma Xiaomian, et al. Reconstruction of dynamic positron emission tomographic images by exploiting low rank and sparse penalty [J]. Journal of Southern Medical University, 2015, 35(10):1446-1450

14 Asphaug E, Reufer A. Mercury and other iron-rich planetary bodies as relics of inefficient accretion [J]. Nature Geoscience, 2014, 7(7):564-568

15 罗国中, 殷建平, 祝 恩. 基于非局部 POCS 的超分辨率图像重建[J]. 计算机科学, 2014, 41(8):47-49, 62

 Luo Guozhong, Yin Jianping, Zhu En. Super-resolution image reconstruction based on non-local POCS [J]. Computer Science, 2014, 41(8):47-49, 62

Design of Simulation System for Authenticity Reproduction of Cultural Relics in Digital Museum

CHEN Qiang, ZHANG Li-hong
(Nanjing Museum, Nanjing 210016, China)

[Abstract] In order to solve the problems of poor noise suppression ability, easy hole defect, poor reproduction quality of cultural relics and lack of detail, a digital museum relic image reproduction simulation system is designed. Visual C++ and VTK are used as the system design platform, and the connection between the 3D reconstruction IP core and the MicroBlaze software is completed by using the FSL bus, and the system hardware structure diagram is designed. A clustering idea is introduced to filter out small-scale noise through a point cloud bilateral filter. The hole phenomenon in the process of triangulation of point cloud data is filled. The B-spline function least squares method is used to fit the surface. The two-dimensional texture coordinates are established by UV mapping, and the image texture is mapped to the surface mesh to realize the three-dimensional reconstruction of the cultural relics image. The results show that the design system shows the result with realistic detail texture. The obtained three-dimensional reconstruction results have better information entropy, average gradient, signal-to-noise ratio and equivalent coefficient.

[Key words] digital museum cultural relic image authenticity reappearance simulation system