

基于改进曲线收缩流方法的点云张开孔洞的虚拟修补

张琦^{1*}, 蔺素珍^{1**}, 白佳璐¹, 钟家让²¹中北大学计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051;²山西博物院文物保护中心, 山西 太原 030024

摘要 针对现有方法修补点云张开孔洞效果不佳的问题,提出了一种基于改进的曲线收缩流虚拟修补点云张开孔洞的方法。在计算出孔洞边界点的表面法向量和切向量的基础上,根据特征线补全边界缺失部分,组成全部边界;然后得到各边界点切向量垂直平面与边界的交叉点,并与对应边界点构成交叉向量;利用内法向量和交叉向量的加权和计算边界点生长方向,根据原始点云的密度确定生长步长,从而进行修补;最后,利用拉普拉斯平滑算法光顺网格,使网格均匀化,得到最终修补效果。实验结果表明,与基曲面网格添加法、波前法和几何特征修补法对比,基于改进的曲线收缩流方法在高斯曲率分布相似性方面提高 26.8%。

关键词 图像处理; 修补点云张开孔洞; 改进曲线收缩流; 拉普拉斯平滑; 高斯曲率分布

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.091002

Opening-Hole Repairing in Point Cloud Based on Improved Curve Contraction Flows

Zhang Qi^{1*}, Lin Suzhen^{1**}, Bai Jialu¹, Zhong Jiarang²¹ School of Computer and Control Engineering, North University of China,

Taiyuan, Shanxi 030051, China;

² Center for Cultural Relic Protection, Shanxi Museum, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract A novel method of opening-hole virtual repairing in point cloud is proposed based on modified curve contraction flow, which aims to improve the effect of existing means. Firstly, on the basis of calculating the surface normal vector and tangent vector of the hole boundary point, the whole boundary is formed according to the feature line. Secondly, the cross-point of each boundary point is obtained by the intersection of the vertical plane of the tangent vector and the boundary, and a cross-vector is formed with the corresponding boundary point. The growth direction of the boundary point is calculated by using the weighted sum of the inward vector and the cross-vector, and the growth step is determined according to the density of the original point cloud so as to be repaired. Finally, the Laplace smoothing algorithm is utilized to smooth and uniform mesh for obtaining final repairing result. The experimental results show that the similarity of Gaussian curvature distribution of our approach improves by 26.8%, compared with the base surface mesh addition method, wave front method and geometric feature repaired method.

Key words image processing; repair the point cloud opening-holes; improved curve contraction flow; Laplace smoothing; Gaussian curvature distribution

OCIS codes 100.6890; 110.6895; 150.1135

1 引言

孔洞修补是点云数据处理的关键技术之一,在工业设计、医疗成像和文物修复等三维建模与重构

中已有广泛应用。由于受扫描设备、扫描技术或扫描对象固有缺陷等影响,采集到的三维点云数据往往会存在孔洞。这些孔洞大致可分为边界是闭合的孔洞和边界仅为一段曲线的张开孔洞,其中后者多

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-03-23; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 山西省重点研发计划(指南)资助项目(201603D321128)、山西省应用基础研究项目(201701D121062)

* E-mail: 513246247@qq.com; ** E-mail: lsz@nuc.edu.cn

存在于薄壁器皿的边缘。与闭合孔洞相比,张开孔洞因缺失了部分孔洞边缘即孔洞区域不封闭,导致模型边缘、结构不完整,对三维重建的效果影响更大^[1],不仅不利于提取完整的三维模型特征线^[2],而且也会对点云模型的精确计算和测量带来诸多问题^[3-4],因此探索计算机虚拟修补技术中的点云张开孔洞的方法与技术很有必要。

目前,尚未检索到点云张开孔洞的有效修复方法,与之相关的点云闭合孔洞修补研究大致可分为两类。一类是基于网格修补。通常是先基于三角网格描述点云的拓扑结构^[5],再对其通过基曲面的特征线匹配^[6]、波前法^[7]和基于几何特征等方法^[8]进行修补。该类方法在修补工业零件、动物等点云模型时,能较好保证孔洞与周围区域的连续性。另一类是基于体素化表达进行修补。即对点云实施包围盒运算后,再进一步精确分析和提取体素单元,得到点云的体素化表达^[9-10],然后在此基础上通过建立光滑的鲍威尔-萨宾样条线^[11]、计算传导率参数^[12]和扩散距离场^[13]等方法修补孔洞。这两类方法在修补过程中依据的都是孔洞周围区域信息,而张开孔洞周围存在缺失区域,不能利用完整的孔洞周围信息来进行孔洞修补,不可避免地造成修补结果不佳甚至难以修补的问题,因此,直接采用现有方法修补张开孔洞难以奏效。

为此,本文以包含张开孔洞的青铜器点云数据为例,在得到孔洞边界的前提下,提出了一种基于曲线收缩流的张开孔洞修补方法。首先,通过提取特

征线拟合插值补全张开孔洞边界的缺失部分;其次,计算边界点的表面法向量和切向量,进而得到各边界点的内法向量,再由边界点与切向量垂直的平面所交叉得到的点确定各边界点的交叉向量;然后,利用边界点的内法向量和交叉向量的加权和计算新增点方向,以原始点云密度为步长补全孔洞;最后,用拉普拉斯平滑算法将网格均匀化,得到最终的修补结果,从而解决现有方法在修补孔洞时依赖于孔洞周围区域的问题。

2 总体思路

本文提出的基于曲线收缩流的张开孔洞修补思路图如图1所示,其中的交叉向量是指边界点与边界点和切向量垂直平面的交叉点构成的向量,每个边界点对应一个交叉向量。

- 1) 对采集到的包含张开孔洞的点云数据网格化。
- 2) 计算各边界点的表面法向量和切向量,二者叉乘得到各边界点内法向量。
- 3) 插值补全张开孔洞边界缺失部分,并计算各边界点的切向量所垂直平面与边界的交叉点,交叉点与该边界点构成交叉向量。
- 4) 内法向量与交叉向量加权和计算点集新增的方向,设置步长,新增点集。
- 5) 更新边界,重复步骤2)~4),直至补全。
- 6) 利用拉普拉斯平滑算法进行网格光滑,得到最终修补结果。
- 7) 评价修补结果。

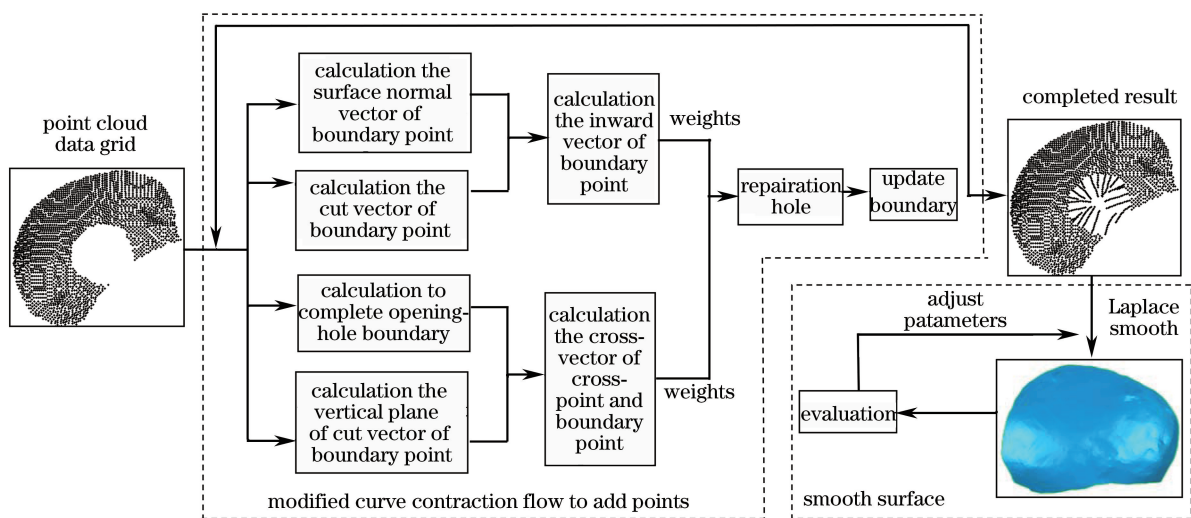


图1 张开孔洞虚拟修补思路图

Fig. 1 Schematic of opening-holes virtual repair

3 本文主要算法

3.1 曲线收缩流新增点集

3.1.1 封闭张开孔洞

根据孔洞边界是否能形成一条完整的回路可以将孔洞区分为闭合孔洞和张开孔洞。对于张开孔洞,其边界是不闭合的^[14],如图2所示,其中绿色为全部点云,黑色为张开孔洞的边界,可以看出该孔洞缺失一部分边界点,由于下一步修补的需要,要求先将孔洞闭合,因此,采用提取特征线的方式将洞口周围部分提取出,然后曲线拟合出缺失部分即图3中红色点,再根据原始区域点云的密度均匀插值点。

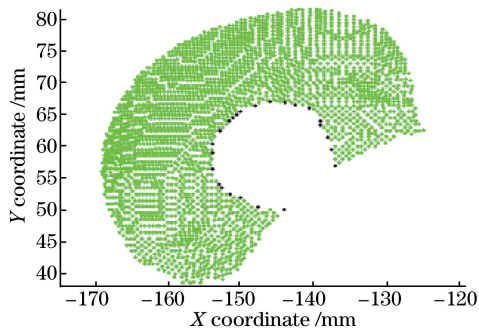


图2 张开孔洞边界图

Fig. 2 Boundary diagram of opening-holes

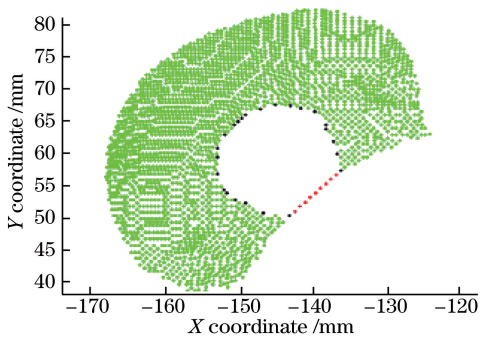


图3 补全孔洞边界图

Fig. 3 Boundary diagram of completed holes

3.1.2 改进曲线收缩流

曲线收缩流的特点是任何形状的闭合曲线都将在演化过程中逐渐收缩直至变为一个点^[15]。本文主要利用该思想,将孔洞的边界看作是一条曲线,在边界曲线收缩的过程中新增点集,直至变为一点。

曲线收缩流中的平滑曲线 C 可以描述为

$$\partial C(u, t) / \partial t = k(u, t) \mathbf{n}, \quad (1)$$

式中 u 为路径参数, t 为时间参数, $k(u, t)$ 为曲线的曲率, \mathbf{n} 为内法向量。

对于孔洞边界的离散点,将其看作曲线上的离散点,曲线收缩流可以表示为

$$p_i(t_j + 1) = p_i(t_j) + k(p_i, t_j) \mathbf{n}_i \Delta t, \quad (2)$$

式中 t_j 为时间参数, Δt 为时间步长, $p_i(t_j)$ 为 p_i 在 t_j 时刻的位置, $p_i(t_j + 1)$ 为 p_i 在下一时刻的位置,曲率 k 由 p_i 与其前后边界点所构圆形半径的倒数求得。

内法向量 \mathbf{n}_i 的计算方式为

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{N}_i \times \mathbf{T}_i, \quad (3)$$

式中 \mathbf{N}_i 为 p_i 在 t_j 时刻的表面法向量, \mathbf{T}_i 为切向量, \times 为向量叉乘运算。如图4所示,绿色为全部点,黑色为各边界点的切向量,红色为各边界点的表面法向量,图5中黑色向量为内法向量。

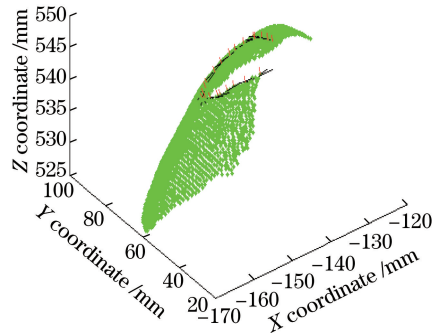


图4 边界点的表面法向量与切向量示意图

Fig. 4 Diagram of surface normal vector and tangent vector

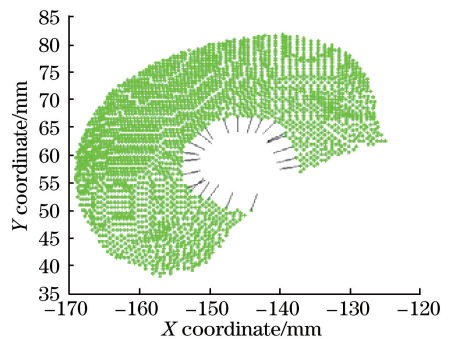


图5 边界点内法向量示意图

Fig. 5 Diagram of inward vector

经过以上的曲线收缩流步骤修补出的孔洞较平坦,对于曲面上的孔洞用该方法修补后的曲率连续性较差,需要做进一步改进。

针对曲面上的张开孔洞,本文提出了将新增点的方向由内法向量 \mathbf{n}_i 改为 $\omega_1 \mathbf{n}_i + \omega_2 \mathbf{m}_i$, ω_1 和 ω_2 为权值,其值的确定方法如下:计算 $p_i(t_j)$ 与上一时刻 $p_i(t_j - 1)$ 的距离 d_1 ; 计算 $p_i(t_j)$ 切向量的垂直面与边界的交叉点 $q_i(t_j)$ 和 $p_i(t_j)$ 的距离 d_2 , $\omega_1 = d_1 / (d_1 + d_2)$, $\omega_2 = d_2 / (d_1 + d_2)$, \mathbf{m}_i 为 $p_i(t_j)$ 与 $q_i(t_j)$ 构成的交叉向量,如图6所示。

故新增点的计算方式为

$$p_i(t_j + 1) = p_i(t_j) + k(p_i, t_j) \mathbf{n}'_i \Delta t, \quad (4)$$

$$\mathbf{n}'_i = (\omega_1 \mathbf{n}_i + \omega_2 \mathbf{m}_i) / (|\omega_1 \mathbf{n}_i + \omega_2 \mathbf{m}_i|). \quad (5)$$

为使网格相对均匀,步长 $k(p_i, t_j)$ 取原始点云距离 0.6 mm。每补完一圈后,将新增点作为新的边界重复以上步骤。在用以上方法新增点集的过程中,不可避免的会出现点集交叉的现象,为此本文提出使用距离函数对其过滤,当两点之间的距离小于 0.5 mm 时,删除曲率较大的一点,同时从边界点集中去除该点,更新边界点集,继续修补。

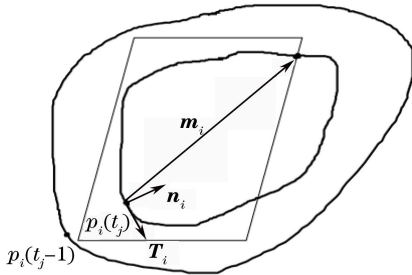


图 6 新增点方向示意图

Fig. 6 Diagram of adding new direction

3.2 曲面光滑

利用曲线收缩流修补后的孔洞点集分布并不均匀,而拉普拉斯平滑是广泛运用在曲面光滑中的方法^[16],可以在保持曲面局部几何细节特征的基础上使网格均匀化,并且运算简单、时间短。因此采用拉普拉斯平滑方法均匀化网格。其原理是将每个顶点都移动到相邻顶点的重心位置。对于修补的每一个点 p ,定义其对应的更新点 p_{new} :

$$p_{\text{new}} = p + \lambda \Delta p, \quad (7)$$

式中 λ 为系数, $0 < \lambda < 1$, 本文中取值为 0.8, Δp 定义如下:

$$\Delta p = \sum_i^m (s_i - p) / m, \quad (8)$$

式中 s_i 为点 p 的邻域点, m 为邻域点的个数。

应用(7)式对修补部分的网格经过多次迭代,网格趋于平滑且网格均匀分布,得到张开孔洞最终的修补结果。

4 实验结果分析

以从山西省博物馆采集的青铜器点云数据为例,做了如下 4 组实验:第一组曲面较弯曲,如图 7 所示;第二组曲面较平坦,如图 8 所示;第三组数据孔洞边界含有尖锐部分,如图 9 所示;第四组实验孔洞实际面积较大且孔洞边界缺失部分比边界其他部分凹陷严重,直接对其修补会造成交叉向量整体偏移,影响修补效果,故将其划分为上下两部分分别进行修补,如图 10 所示。其中图 7~10 的(a)为修补前孔洞;图 7~10 的(b)为采用文献[6]方法修补后的孔洞;图 7~10 的(c)为采用文献[7]方法修补后的孔洞;图 7~10 的(d)为采用文献[8]方法修补后的孔洞;图 7~10 的(e)为采用本文方法修补的孔洞。对 4 组数据分别进行主客观评价。



图 7 第一组实验对比图

Fig. 7 Comparison diagrams of the first group of experiments



图 8 第二组实验对比图

Fig. 8 Comparison diagrams of the second group of experiments



图 9 第三组实验对比图

Fig. 9 Comparison diagrams of the third group of experiments

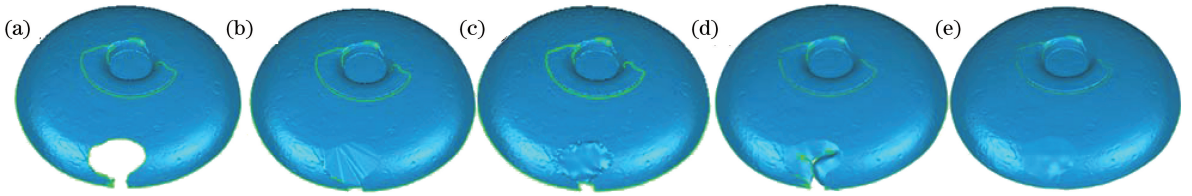


图 10 第四组实验对比图

Fig. 10 Comparison diagrams of the fourth group of experiments

从 4 组对比实验中可以看出,本文方法总体效果优于其他方法。首先,修补后孔洞区域与周围区域的连续性更光滑,而文献[6]、文献[7]和文献[8]与周围相连之处有明显的分界痕迹;其次,本文方法修补出的孔洞弯曲程度与原始区域较相似,而其他三种方法的修补结果都趋于平坦,与周围区域过度并不自然光滑。综上所述,本文方法对于较平坦和较弯曲的曲面修补效果均较好。

4.1 主观评价

由于主观评价依赖于个体的特质与喜好,因此从中北大学大数据学院学习过计算机图形学的研究生中抽取 30 名视力正常的受试者(男生 15 人、女生 15 人),这些受试者经过适当训练后,轮流在一台电脑上对 4 组修补实验结果逐个观察,在观察过程中可根据自己需求旋转放大缩小修补结果,每个观察 2 min,然后对修补结果分别从光滑性、与周围区域连续性、完整性和总体效果四方面做出评判。评价等级用里克特 5 级量表法划分,5 个等级分别为很好、好、一般、不好、很不好,对应分值分别为 5、4、3、2 和 1^[17]。图 11 为 30 名研究生对 4 种方法的打分结果,其中,单项分为 30 名研究生对三组实验结果打分的平均计算结果,本文方法的各项指标均最理想。

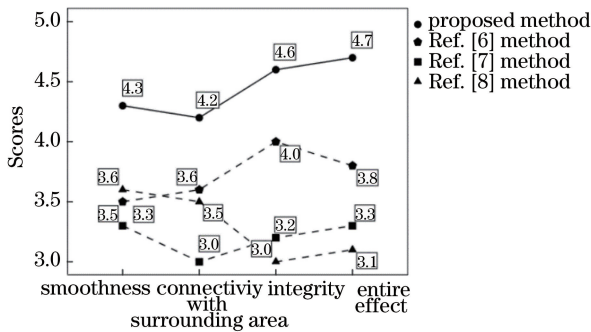


图 11 主观评价打分统计图

Fig. 11 Scoring diagram of subjective evaluation

4.2 客观评价

过曲面上点有无数个正交曲率,其中必然存在曲率极大值和极小值,这两个曲率均为主曲率,而高

斯曲率是两个主曲率的乘积,又称为总曲率,反映点的总弯曲程度^[18]。孔洞修补的是否合适主要体现在与原始区域的弯曲程度是否一致,故采用高斯曲率的分布来衡量修补结果。图 12~15 分别为 4 组实验用 4 种方法的修补结果与原始区域的高斯曲率分布百分比柱状图,其中黑色为原始区域,绿色为本文方法,红色、黄色和棕色分别是文献[6]、文献[7]和文献[8]的方法。可以看出绿色与黑色的相差最小,其次是黄色,然后是棕色,最后是红色。通过计算绿、黄、棕和红色分别与黑色 A_k 的百分比值差得到 S_g 、 S_y 和 S_r ,然后根据 $S_g/A_k - (S_y/A_k + S_r/A_k)/2$ 计算得到本文方法与原始区域的高斯曲率分布相似性比其他三种方法平均高 26.8%,说明本文方法与原始区域的弯曲程度更相似,修补结果更好。

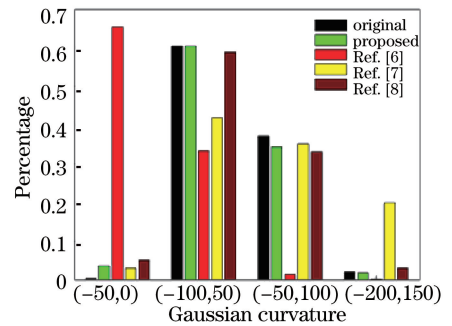


图 12 第一组实验高斯曲率分布

Fig. 12 Gaussian curvature distribution in the first group of experiments

5 结 论

点云数据在扫描过程中不可避免地会出现孔洞,目前对于孔洞的修补研究有很多算法,但对于修补张开孔洞的效果均不佳。因此本文提出了利用曲线收缩流的思想修补张开孔洞的方法,将孔洞边界点看作曲线流来处理,进行收缩,利用边界的几何特征可以很好地修补孔洞;用拉普拉斯平滑算法光滑网格,在保证曲面特征的基础上使网格均匀化。通

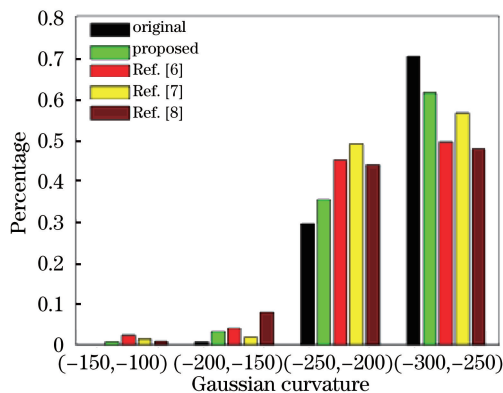


图 13 第二组实验高斯曲率分布

Fig. 13 Gaussian curvature distribution in second groups of experiments

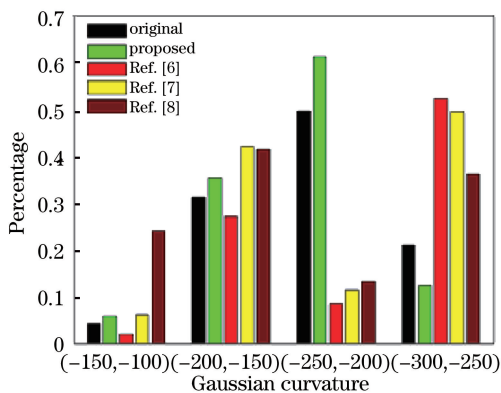


图 14 第三组实验高斯曲率分布

Fig. 14 Gaussian curvature distribution in third groups of experiments

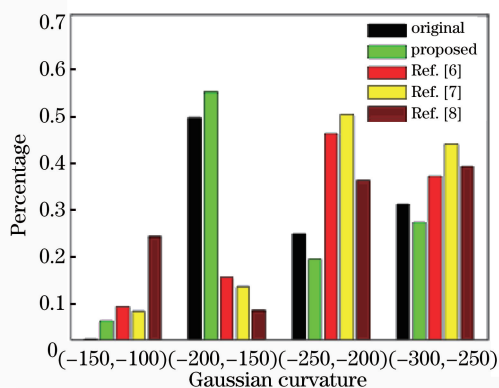


图 15 第四组实验高斯曲率分布

Fig. 15 Gaussian curvature distribution in fourth groups of experiments

过实验表明,本文方法能有效修补张开孔洞,对于弯曲较严重的曲面也能较好地修补其孔洞,相比于其他两种方法,无论在主观评价上还是在高斯曲率分布上,都能取得更好的修补结果。但是对于修补纹

理细致的曲面,本文方法并不能修补出纹理细节,未来工作将主要研究此类问题。

参 考 文 献

- [1] Yang Z. Real-time 3D reconstruction based on monocular camera [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
杨哲. 基于单目摄像头的实时三维重建[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [2] Zeng F X, Li L, Diao X P. Iterative closest point algorithm registration based on curvature features [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011003.
曾繁轩, 李亮, 刁鑫鹏. 基于曲率特征的迭代最近点算法配准研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011003.
- [3] Wang D J. The research on pieces of bronze relics virtual stitching technology and geometric feature extraction[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
王栋娟. 青铜器文物碎片虚拟拼接技术研究及几何特征提取[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [4] Chen X J, Cheng X L, Hu M J, *et al.* Buildings detection and contour extraction by the fusion of aerial images and LIDAR point cloud [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0514002.
程效军, 程小龙, 胡敏捷, 等. 融合航空影像和 LIDAR 点云的建筑物探测及轮廓提取[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0514002.
- [5] Foks N L, Li Y G. Automatic boundary extraction from magnetic field data using triangular meshes [J]. Geophysics, 2016, 81(3): 47-60.
- [6] Liu Z, Wang Y B, Bai L L, *et al.* Detail-preserving hole-filling for complex 3D models [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(12): 2052-2059.
刘震, 王艳宾, 白丽丽, 等. 曲面细节特征保持的三维模型孔洞修复方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(12): 2052-2059.
- [7] Jun Y. A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(2): 263-270.
- [8] Altantsetseg E, Oyundolgor K, Matsuyama K, *et al.* Complex hole-filling algorithm for 3D models [C] // Proceedings of the Computer Graphics International Conference, 2017: 10.
- [9] Lin J H. Research on 3D reconstruction algorithm based on special voxel fusion [D]. Changchun:

- Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- 林金花. 基于空间体素融合的三维重建算法研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [10] Li R Z, Yang M, Liu Y Y, *et al.* An uniform simplification algorithm for scattered point cloud [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0710002.
- 李仁忠, 杨曼, 刘阳阳, 等. 一种散乱点云的均匀精简算法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0710002.
- [11] Fortes M A, González P, Palomares A, *et al.* Filling holes with geometric and volumetric constraints [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2017, 74(4): 671-683.
- [12] Yang Z Q, Sun Y, Cui J Z, *et al.* The hole-filling method and multiscale algorithm for the heat transfer performance of periodic porous materials [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2017, 311: 583-598.
- [13] Panchetti M, Pernot J P, Véron P. Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications [J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(8): 693-707.
- [14] Fang J. Research on the composite damage mechanisms based on 3D structure evolution characterization [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- 方健. 基于三维结构演化表征的复合材料损伤机制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [15] Liu X D, Xia Y D, Luo H. A reconstructed discontinuous Galerkin method for compressible turbulent flows on 3D curved grids [J]. *Computers & Fluids*, 2018, 160: 26-41.
- [16] Liao T, Li X G, Xu G L, *et al.* Secondary Laplace operator and generalized Giaquinta-Hildebrandt operator with applications on surface segmentation and smoothing [J]. *Computer-Aided Design*, 2016, 70: 56-66.
- [17] Lin S Z, Zhu X H, Wang D J, *et al.* Multi-band image fusion based on embedded multi-scale transform [J]. *Journal of Computer Research and Development*. 2015, 52(4): 952-959.
- 蔺素珍, 朱小红, 王栋娟, 等. 基于嵌入式多尺度变换的多波段图像融合 [J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52(4): 952-959.
- [18] Xu Y F, Zhu W D, Smith S A. Non-model-based damage identification of plates using principal, mean and Gaussian curvature mode shapes [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 400: 626-659.