

基于从运动中恢复结构的三维点云孔洞 修补算法研究

曾露露^{1,2}, 盖绍彦^{1,2}, 达飞鹏^{1,2}, 黄源^{1,2}

¹东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096;

²东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

摘要 通过光栅投影法可以获取物体的三维点云数据,但是对于形貌复杂的被测物体,由于测量方式本身含有的一定缺陷,会导致所获取的点云数据出现孔洞区域,从而对后续处理造成影响。结合已有的从运动中恢复结构(SFM)算法,提出一种新的点云孔洞修补方法。首先,利用光栅投影法中得到的二维相位信息来提取三维点云孔洞区域的边界点;接着,将 SFM 获取的点云数据集与光栅投影法所采集的点云数据集进行配准,并提取出信息补充点;最后,在添加了补充点的点云数据集上,利用径向基函数计算曲面方程,修补孔洞。实验结果证明了该算法的稳健性,能较为有效地恢复复杂物体的表面信息。

关键词 图像处理; 三维点云; 孔洞修补; 边界提取; 径向基函数

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0610002

Hole Filling Algorithm of Three-Dimensional Point Cloud Based on Structure from Motion

Zeng Lulu^{1,2}, Gai Shaoyan^{1,2}, Da Feipeng^{1,2}, Huang Yuan^{1,2}

¹School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

²Key Laboratory of Measurement and Control of Complex System of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract Three-dimensional point cloud data can be obtained from fringe projection method. However, these point cloud data may have holes for complex shaped objects, and the holes have a profound impact on afterward processing. According to structure from motion (SFM) data acquisition, we propose a new method to repair holes. Firstly, we use a two-dimensional phase of fringe projection to extract boundary points from the three-dimensional point cloud. Then, we register the data set obtained from SFM and fringe projection to extract supplementary points. Finally, based on the point cloud data set with supplementary points, the repair of point cloud holes is implemented based on the radial basis function to calculate the surface equation. Experimental results show that the algorithm is robust and it can recover the surface information of complex objects effectively.

Key words image processing; three-dimensional point cloud; hole filling; boundary extraction; radial basis function

OCIS codes 100.6890;100.4996;100.5010

1 引 言

目前,人们比较关注的三维测量方法有激光三维测量法^[1-2]、光栅投影测量法^[3]、基于图像序列的三维重构法^[4]等。其中,光栅投影法具有速度快、自动化程度高等特点,但是由于测量时需要投射辅助

光,所得点云数据会由于物体本身的遮挡和表面的反射率等原因产生孔洞,严重影响点云后续的操作。孔洞修补是点云前期处理中的重要步骤之一。

孔洞区域的修补主要存在两个难点:1)如何准确地提取孔洞边界;2)如何在孔洞区域获取更多的信息,以使修补的点更加贴合原始形状。孔洞边界

收稿日期: 2017-11-22; 收到修改稿日期: 2018-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61405034, 51475092, 61462072, 61628304)

作者简介: 曾露露(1993—),女,硕士研究生,主要从事点云处理方面的研究。E-mail: 220151437@seu.edu.cn

导师简介: 盖绍彦(1979—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事点云测量方面的研究。E-mail: qxxyym@163.com

提取是孔洞修补的第一步工作,其准确性直接影响孔洞修补的结果。现有的点云孔洞边界提取方法主要是在三维的基础上进行,可以分为基于点云网格^[5-6]的提取方法和基于边界几何特征^[7-10]的提取方法。前者通常可以提取出较为光滑的点云边界,但是计算量较大;后者计算量少,但易受噪声的影响。实际测量发现,点云边界点在二维相位图中特征明显,直接利用二维相位来提取孔洞边界,可以免去在三维方法中建立网格或者计算邻域信息的步骤,能够显著提高边界点提取效率。

现有的孔洞修补算法大都是直接利用孔洞周围的邻域信息,如利用样条曲线^[11-13]、神经网络^[14]等方法进行插值。该类算法简单易行,不需要任何的补充信息,但是对于曲率变化较大或者形状较为复杂的孔洞区域,由于信息缺失过多,修补效果并不理想。也有学者提出,可以结合附加信息和周边结构对数据进行处理。如 Quinsat^[15]就提出使用先验 CAD 模型和孔洞周边邻域的连续性作为约束条件恢复数据,Panchetti 等^[16]提出利用对应图片的二维信息和点云网格的曲率信息来修补孔洞。这类方法对于复杂的区域具有良好的修补效果,但不论是先验 CAD 模型的建立,还是二维像素与三维点云的

配准,算法的整体复杂度都较高。

为了更加直接地利用图片信息,结合三维重构中融合从运动中恢复结构(SFM)的激光扫描^[17-19]点云信息获取技术,提出一种基于 SFM 的三维点云孔洞修补算法。该算法利用 SFM 点云补充孔洞部分的信息,完成孔洞修补。

2 算法简介

算法总共分为边界提取和孔洞修补两部分。首先,利用二维相位信息来提取点云孔洞区域边界点;然后,进行点云配准,提取信息补充点;最后,在增加了补充点的点云数据集上,利用径向基函数(RBF)修补孔洞。

SFM 数据集都通过 visualSFM^[20]工具包获得。它的优势在于:1)采用了多视图立体视觉(PMVS)算法^[21]进行稠密重建。经过 PMVS 稠密重建过的点云在 Goesele 等^[22]提供的测试网站上,具有较高的重建精度和完整度,某些结果甚至可以与激光扫描的数据相媲美^[23]。在文献[21]提供的实验结果中,该方法的重建完整度在 90%以上。2)重建效率高,主要算法的时间复杂度为 $O(n)$ ^[20]。算法流程如图 1 所示。

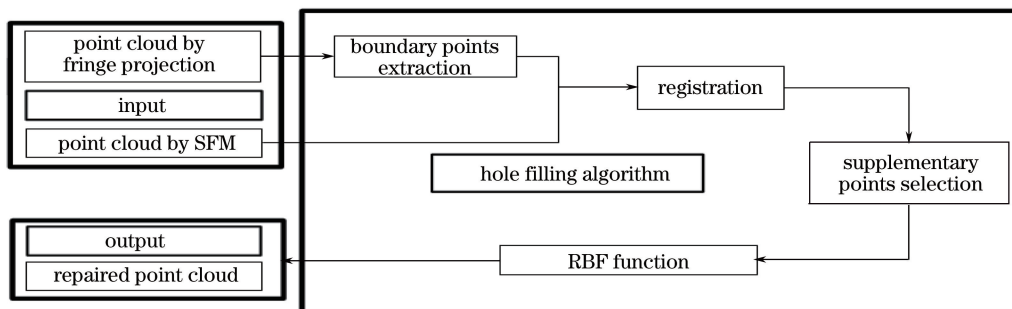


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow of algorithm

3 基于二维相位的点云孔洞边界提取

利用孔洞边界点在二维相位图中易于辨识和提取的特点,对于待修补的点云数据,采用二维相位信息来提取孔洞边界。

在二维的相位图中,点云边界点表现为相位跳变。为了剔除噪声点的影响、删除离群点,定义点云的边界点为相位跳变,点本身的相位不为 0,同时邻域中的点的相位不都为 0。在实验中,设置为八邻域点。

设二维相位图的大小为 $M \times N$, $p[m][n]$ 需删为相位图上的某一点,点云的边界点的集合为 B ,则

当 $p[m][n]$ 满足(1)式时, $p[m][n] \in B$ 。

$$\begin{cases} |p[m][n] - p[m \pm 1][n \pm 1]| > \partial \\ p[m][n] \neq 0 \\ \sum_{i=1}^8 p[m \pm 1][n \pm 1] \neq 0 \\ \prod p[m \pm 1][n \pm 1] = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 ∂ 是相位跳变的阈值,实验中选定为 5。

对于非封闭的点云来说,外部轮廓点也是点云孔洞边界点的一部分,因此,要提取出点云孔洞边界,需要在点云边界点中去除外部轮廓点。在二维相位图像上,外部轮廓点的特征为点云边界点集 B 中每一行的初始和最终非 0 点。设外部轮廓线上的点的

集合为 B_E , 当 $p[m][n]$ 满足下式时, $p[m][n] \in B_E$ 。

$$\sum_{j=0}^{m-1} p[m][j] = 0 \parallel \sum_{j=m+1}^N p[m][j] = 0, \quad (2)$$

式中 $m=1, 2, \dots, M$, 所以孔洞边界点 $H_p = \{p[m][n] \mid p[m][n] \in B - B_E\}$ 。

由文献[24]可知, 光栅投影法测量得到的点云数据在三维上的坐标 $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 与相位图上的对应点 $p[m][n] = \theta$ 有如下对应关系:

$$\theta = \frac{a_1 X_w + a_2 Y_w + a_3 Z_w + a_4}{a_5 X_w + a_6 Y_w + a_7 Z_w + a_8}, \quad (3)$$

$$\rho \begin{bmatrix} m \\ n \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_c \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 θ 为相位值, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ 为系统参量, ρ 为比例因子, \mathbf{A}_c 为 3×3 摄像机内部参量矩阵。 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, \mathbf{A}_c$ 可以通过系统的标定获得。

代入孔洞边界点的二维相位坐标, 通过(3)、(4)式可以计算出对应的孔洞边界三维坐标点 $H = \{h_i, i=1, 2, 3, \dots, k\}$ 。

图 2 为在人脸点云中提取孔洞边界点的示意图, 其中绿色的点为提取出的边界点。图 2(a) 为原始的人脸点云图, 图 2(b) 为边界点的示意图, 图 2(c) 为去除外边界点后的示意图。

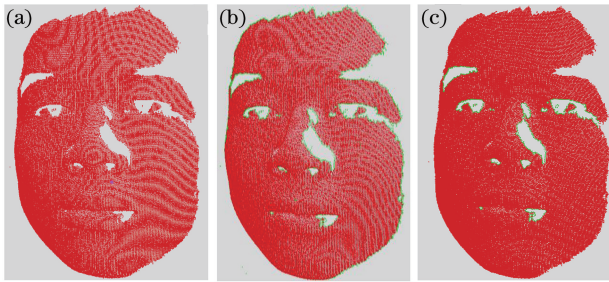


图 2 孔洞边界提取示意图。(a) 初始点云; (b) 边界点; (c) 孔洞边界点

Fig. 2 Hole boundary extraction. (a) Initial point cloud; (b) boundary; (c) hole boundary

4 基于 SFM 的点云孔洞修补

在准确提取了点云孔洞边界点之后, 采用基于 SFM 的孔洞修补算法修补点云孔洞。基于 SFM 的点云孔洞修补分为两个部分: 1) 提取 SFM 获取的点云数据集在孔洞区域的补充点; 2) 利用 RBF 对孔洞区域进行修补。

4.1 点云配准

为了得到 SFM 获取的点云数据集在孔洞部分

的补充点, 须先对光栅投影获取的点云集, 以及 SFM 获取的点云集进行配准。首先, 采用基于共面四点集的随机采样一致算法 (RANSAC)^[25] 实现初始配准, 然后, 利用文献[26]提供的改进的迭代最近点 (ICP) 方法对点云进行精确配准。

对于同一物体的两幅 CS (Cross-source) 点云^[27], 数据可以通过下式转换:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = b \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{R} 为旋转矩阵, 是 3×3 的正交单位矩阵, $\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T$ 为三维的平移向量, b 为缩放系数, $[X_w, Y_w, Z_w]^T$ 为光栅投影获取的数据集 P_w 上的一点, $[X_s, Y_s, Z_s]^T$ 为 SFM 获取数据集 P_s 上的点, \mathbf{Q} 是 4×4 的矩阵。

在初始配准中, 为了提高配准效率, 首先在 P_w 和 P_s 中分别划分出对应的特征明显的区域。在 P_w 特征区域中, 利用 RANSAC 算法随机选取任意不共线的 4 点, 并在 P_s 中找到对应的点, 计算得出对应的变换矩阵 \mathbf{Q} 。经过 r 次迭代后, 选取使得两片点云匹配误差最小的变换矩阵 \mathbf{Q} , 获取初始匹配结果。实验中 $r=10$ 。

在精确配准^[21]中, 首先, 对于 P_s 中的每一点在 P_w 中寻找欧氏距离最近的 4 个点, 并求出由这 4 个点所构成的最小邻域的重心, 构成点对, 然后利用最小二乘法计算参数 \mathbf{R}, \mathbf{T} 。将最终结果应用于 P_s 中, 得到配准后的 SFM 获取的点云集 P'_s 。

计算得到 P'_s 后, 就可以提取出算法需要的孔洞区域的信息补充点, 指导点云孔洞的修补。筛选信息补充点的方法如下: $H = \{h_i, i=1, 2, 3, \dots, k\}$ 为点云孔洞边界点, 对于 P'_s 中的每一点, 计算它是否在 H 的包围盒中, 若是则认为 $p \in P_1$, 否则不是。其中 P_1 为信息补充点的集合。至此, 可获得添加了信息补充点的点云集合 $P_N = \{P_w \cup P_1\}$ 。

4.2 孔洞修补

对于增加了信息补充点的点集 P_N , 利用 RBF 进一步修补点云孔洞。首先在二维平面上插入粗修补点, 然后采用空间曲面方程和梯度条件对粗修补点进行调整。为了更好地控制修补点的精度和修补后点云的密度, 之前获取的信息补充点不包含在最终的修补点集中。

在二维平面插入修补点的流程: 首先, 利用最小二乘法将已经提取出来的点云孔洞边界点 $H =$

$\{h_i, i=1, 2, 3, \dots, k\}$ 投影到二维平面获得投影矩阵, 并形成孔洞特征多边形; 然后获取孔洞特征多边形的边长, 取边长的均值作为步长在孔洞区域进行插值; 最后利用投影矩阵将插值点映射回三维平面, 获取粗修补点 $R_P = \{r_{pi}, i=1, 2, 3, \dots, k\}$ 。

在获取了粗修补点后, 利用 RBF 对点进行调整^[10]。首先对添加了信息补充点的点云集合 P_N 建立 k-d 树, 然后对孔洞边界集合 H 中的每一个点 hi 提取邻域点和附加约束点, 利用 RBF 求解空间曲面。其中每一点对应的空间曲面方程为

$$F(x, y, z) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + \beta, \quad (6)$$

式中 β 为误差项, 且 $\beta = \sum_{j=1}^n \omega_j [(x+N_{jx})^2 + (y+N_{jy})^2 + (z+N_{jz})^2]^{3/2}$ 。

空间曲面方程的未知数 $\omega_j, c_0, c_1, c_2, c_3$ 可以通过下式获得:

$$\mathbf{ZA} = \mathbf{C}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{A} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_n \ c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3]^T$,

$\mathbf{C} = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, $\mathbf{Z} =$

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1n} & 1 & N_{1x} & N_{1y} & N_{1z} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2n} & 1 & N_{2x} & N_{2y} & N_{2z} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \dots & D_{nn} & 1 & N_{nx} & N_{ny} & N_{nz} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_{1x} & N_{2x} & \dots & N_{nx} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_{1y} & N_{2y} & \dots & N_{ny} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_{1z} & N_{2z} & \dots & N_{nz} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

实验中 δ_i 为误差值, $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = 0.1$, $N = \{N_i = [N_{ix}, N_{iy}, N_{iz}]^T\}$, $i=1, 2, \dots, n$, 为邻域点和附加约束点的集合。 $D_{ij} = |N_i - N_j|^{3/2}$, $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

最后, 根据梯度条件使得 r_{pi} 向曲面调整, 以满足点云表面曲面要求。

5 实 验

为了验证算法的有效性, 在光面陶瓷杯模型和人脸模型上进行实验。实验在 Matlab 2015b 软件环境下, 运行于 Core i5、4 GB 内存、Windows 10 操作系统的计算机上。

图 3(a) 为通过光栅投影测量法得到的陶瓷杯点云数据, 由于陶瓷杯的反射率过高, 在正中间位置产生了孔洞; 图 3(b) 为由 visualSFM 测量得到的点云数据, 由于光面陶瓷杯本身缺乏纹理, 在获取点云数据时, 投射了散斑信息以提高重建精度; 图 3(c)

为通过本文算法修补孔洞后的点云图, 其中, 由 visualSFM 产生的数据集为孔洞的修补提供了 96 个信息补充点, 增加的修补点为 404 个。 visualSFM 获取的点云数据在陶瓷杯修补过程中提供的补充点在 RBF 计算对应点的曲面方程时提供了附加信息, 使得曲面方程更加贴合原始数据, 孔洞修补结果更加准确。

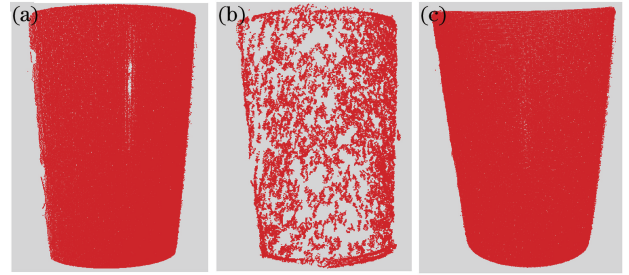


图 3 光面陶瓷杯点云修补结果。(a)光栅投影法; (b) SFM; (c) 修补后点云

Fig. 3 Repaired point cloud of ceramic cup.

(a) Fringe projection; (b) SFM; (c) repaired point cloud

对于更为复杂的人脸模型, 基于 SFM 的点云孔洞修补算法也可以有效地恢复孔洞区域的信息。图 4(a) 为通过光栅投影测量得到的人脸点云数据, 眼睛和眉毛区域由于反射率低产生了孔洞, 鼻子区域由于本身的遮挡也产生了孔洞; 图 4(b) 为由 visualSFM 测量得到的人脸点云数据; 图 4(c) 为通过本文算法对孔洞进行修补后的点云图。可以看出, 对于人脸这样的复杂模型, 在鼻翼和眼睛区域, 修补结果能准确反映人脸本身的形状。

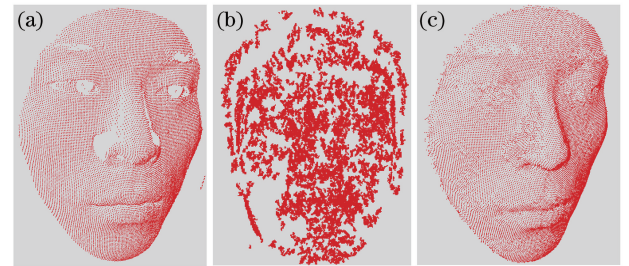


图 4 人脸点云修补结果。(a)光栅投影; (b) SFM; (c) 修补后点云

Fig. 4 Repaired point cloud of human face.

(a) Fringe projection; (b) SFM; (c) repaired point cloud

为了进一步验证本文方法的有效性, 在人脸点云图中选取两块典型区域, 人为地制造孔洞, 如图 5 所示, 图 5(b) 中的孔洞在人脸和部分鼻子的连接区域, 图 5(c) 中的孔洞在眉心周边区域。

图 6(a) 为完整的点云数据; 图 6(b)、(c) 为在图 5(b) 基础上由基于 SFM 的点云孔洞修补算法修

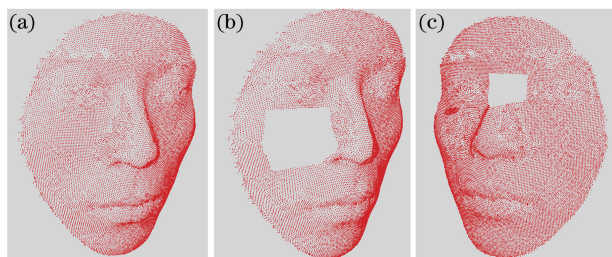


图 5 人造点云孔洞位置示意图。(a)完整点云;

(b)孔洞在鼻翼及脸颊;(c)孔洞在眉心区域

Fig. 5 Positions of man-made holes.

(a) Complete point cloud; (b) holes in area of nose and cheek; (c) holes in area between eyebrows

补后的点云图,绿色部分为修补后的点云,共1612个点;图6(d)为修补后增加的点与原始孔洞区域点经由ICP配准以后得到的图形。可以看出,对于面积大形状变化大的孔洞区域,利用本文算法修补后的点云数据和原始形状完全贴合,并能准确地描述原始细节。

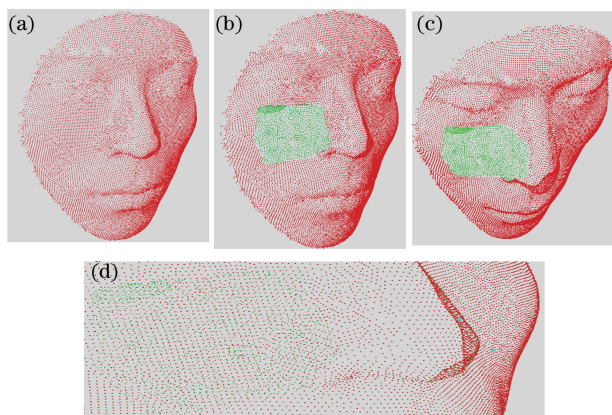


图 6 对应图 5(b)的孔洞修补结果。

(a)完整点云;(b)修补后点云的左视图;

(c)修补后点云的俯视图;(d)配准后的点云

Fig. 6 Repair results corresponding to Fig. 5(b).

(a) Complete point cloud; (b) left view of repaired point cloud; (c) top view of repaired point cloud; (d) point cloud after registration

图7(a)为完整的点云数据;图7(b)、(c)为修补后的点云图;图7(d)是配准后的图。可以看出,在曲率变化上,增加的点云与原始点云保持一致,且修补点能够理想地描述眉心周边的细节信息。这说明在形状变化复杂的区域,本文算法能够有效地修补孔洞。

表1是在图5(b)、(c)的孔洞位置上,修补点与原始点的数据对比。其中,迭代次数为20次。可以看出,图6(d)中点云配准的均方根误差(RMSE)为0.01,图7(d)中的RMSE为0.08。无论是在面积较

大还是在曲率变化较大的区域,修补点和原始点在数目和曲率变化上均保持一致。对于形貌复杂的被测物体,基于SFM的点云孔洞修补算法可以有效地恢复原始形状。

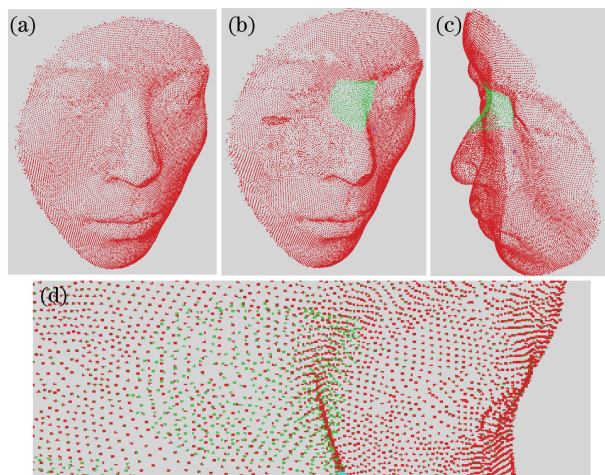


图 7 对应图 5(c)的孔洞修补结果。

(a)完整点云;(b)修补后点云的左视图;

(c)修补后点云的俯视图;(d)配准后的点云

Fig. 7 Repair results corresponding to Fig. 5(c).

(a) Complete point cloud; (b) left view of repaired point cloud; (c) top view of repaired point cloud; (d) point cloud after registration

表 1 修补点与原始点对比

Table 1 Comparison between implemented points and initial points

Hole position	Initial points	Implemented points	Times	RMSE
Nose and cheek	1518	1612	20	0.01
Between eyebrows	643	651	20	0.08

6 结 论

针对光栅投影获取的数据集中可能存在的孔洞区域,提出一种基于SFM的三维点云孔洞修补算法。首先,利用三维孔洞边界点在二维相位中的特征,提取孔洞边界;然后,配准SFM数据集与光栅点云数据集,提取信息补充点;最后,利用RBF进一步修补孔洞,使得修补后的点云更加贴合原始数据。在光面陶瓷杯和人脸模型上的实验证明,本文算法能有效地重现曲面细节、准确地恢复复杂曲面形状。本文算法需要较高精度的SFM数据集。虽然对于大部分物体,visualSFM重建的点云的精确度和完整度较高,但是对于表面缺乏纹理或者无纹理的物件,本文方法效果一般,仍须借助辅助手段提高重建精度,这也是今后需要解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Deng W J, Ye J Y, Zhang T. Acquisition and denoising algorithm of laser point cloud oriented to robot polishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (8): 0814002.
邓文君, 叶景杨, 张铁. 面向机器人磨抛的激光点云获取及去噪算法 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (8): 0814002
- [2] Stone E, Skubic M. Fall detection in homes of older adults using the Microsoft Kinect [J]. *IEEE Journal of Biomedical & Health Informatics*, 2015, 19(1): 290-301.
- [3] An D, Gai S Y, Da F P. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (5): 0512004.
安冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型 [J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512004.
- [4] Guo M, Hu L L, Li J. Local point cloud reconstruction of ceramic bowl based on image sequences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1215002.
郭萌, 胡辽林, 李捷. 基于多幅图像的陶瓷碗表面缺陷的局部点云重建 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1215002.
- [5] Jun Y. A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37 (2): 263-270.
- [6] Orriols X, Binefa X. Finding breaking curves in 3D surface [C]. *The 1st Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*, 2003: 681-688.
- [7] Floater M S, Reimers M. Meshless parameterization and surface reconstruction [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2001, 18(2): 77-92.
- [8] Zhao J B, Liu W J, Sun Y W. Method for direct extraction of boundary from point clouds of freeform surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(7): 1269-1273.
赵吉宾, 刘伟军, 孙玉文. 一种自由曲面点云边界的快速直接提取方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28 (7): 1269-1273.
- [9] Kurlin V. A fast and robust algorithm to count topologically persistent holes in noisy clouds [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014: 1458-1463.
- [10] Nguyen V S, Trinh T H, Tran M H. Hole boundary detection of a surface of 3D point clouds [C]. *IEEE International Conference on Advanced Computing and Applications*, 2015: 124-129.
- [11] Bendels G H, Schnabel R, Klein R. Detecting holes in point set surfaces [J]. *Journal of WSCG*, 2006, 14: E43.
- [12] Zhu C H, Da F P. A fitting approach to fill the holes in point cloud based on B-spline patch [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17 (增刊): 270-274.
朱春红, 达飞鹏. 基于 B 样条曲面的点云孔洞拟合填充 [J]. *中国机械工程*, 2006, 17 (Sup.): 270-274.
- [13] Chui C K, Lai M J. Filling polygonal holes using C1 cubic triangular spline patches [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2000, 17(4): 297-307.
- [14] Carr J C, Beatson R K, Cherrie J B, *et al.* Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions [C] // *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 2001: 67-76.
- [15] Quinsat Y. Filling holes in digitized point cloud using a morphing-based approach to preserve volume characteristics [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1/2/3/4): 411-421.
- [16] Panchetti M, Pernot J P, Ron P. Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications [J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(8): 693-707.
- [17] Chen H, Ma S W, Nuechter A. Non-synchronous point cloud algorithm for 3D reconstruction based on laser scanning and SFM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(5): 1148-1157.
陈辉, 马世伟, Andreas Nuechter. 基于激光扫描和 SFM 的非同步点云三维重构方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(5): 1148-1157.
- [18] Jeong Y, Bok Y, Kim J S, *et al.* Complementation of cameras and lasers for accurate 6D SLAM: From correspondences to bundle adjustment [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011: 3581-3588.
- [19] Lu X S, Yu J Y, Tian M Y, *et al.* Fusion method of vehicle laser point cloud and serialized panoramic image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510004.
卢秀山, 俞家勇, 田茂义, 等. 车载激光点云与序列化全景影像融合方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510004.
- [20] Wu C C. VisualSFM: a visual structure from motion system [EB/OL]. [2017-11-22] <http://ccwu.me/vsfm/>.
- [21] Furukawa Y, Ponce J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2010, 32(8): 1362-1376.

- [22] Goesele M, Curless B, Seitz S M. Multi-view stereo revisited[C]. 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, 2: 2402-2409.
- [23] Shi L M, Guo F S, Hu Z Y. An improved PMVS through scene geometric information[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(5): 560-568.
史利民, 郭复胜, 胡占义. 利用空间几何信息的改进 PMVS 算法 [J]. 自动化学报, 2011, 37(5): 560-568.
- [24] Da F P, Gai S Y. Grating projection three-dimensional precision measurement[M]. Beijing: Science Press, 2011: 169-184.
达飞鹏, 盖绍彦. 光栅投影三维精密测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 169-184.
- [25] Buchin K, Kreveld M V, Meijer H, *et al.* On planar supports for hypergraphs[C]. International Conference on Graph Drawing, Springer-Verlag, 2009: 345-356.
- [26] Huang Y, Da F P, Tao H J. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308002.
黄源, 达飞鹏, 陶海跻. 一种基于特征提取的点云自动配准算法 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308002.
- [27] Huang X, Zhang J, Fan L, *et al.* A systematic approach for cross-source point cloud registration by preserving macro and micro structures [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(7): 3261-3276.