

# 遮挡条件下基于物体对称性的非完备激光三维点云分类补全方法

童勇<sup>1</sup>, 徐方勇<sup>2</sup>, 杨宁<sup>1</sup>, 陈辉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090;

<sup>2</sup>国网安徽省电力有限公司长丰县供电公司, 安徽 合肥 231100

**摘要** 现实中存在大量对称物体, 利用三维激光扫描设备可获得对称物体的三维点云, 但由于遮挡及设备本身等因素, 三维点云会产生缺损。针对该问题, 提出一种基于物体对称性的非完备激光三维点云分类补全方法。根据单幅二维图像中的对称关键点, 建立对称平面的映射关系, 根据对称平面在点云中的位置对非完备点云进行分类。针对半残缺点云, 直接进行对称平面检测, 然后做镜像补全; 针对残缺未过半点云, 与镜像点云融合后去除镜像点云中的重复数据点, 完成补全; 针对残缺过半点云, 与镜像点云融合后利用孔洞直接修复方法补全缺失信息; 针对极度残缺点云, 考虑到缺失信息过多, 将输入点云与镜像点云融合后再与完整的相似点云进行融合, 去除冗余点完成缺失信息弥补。非完备三维点云的实际采集点云与公共数据库中点云的实验结果显示, 所提补全方法能将不同类型的非完备点云补全为与完整点云极为相似的点云, 验证了所提分类补全方法的有效性和可行性。

**关键词** 激光点云; 对称平面; 点云补全; 镜像对称

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222968

## Incomplete Laser 3D Point Cloud Classification and Completion Approach Based on Object Symmetry under Occlusion Conditions

Tong Yong<sup>1</sup>, Xu Fangyong<sup>2</sup>, Yang Ning<sup>1</sup>, Chen Hui<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

<sup>2</sup>Changfeng County Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 231100, Anhui, China

**Abstract** There are many symmetric objects in the real world. Three-dimensional (3D) laser scanning equipment can be used to obtain a 3D point cloud of symmetric objects; however, the 3D point cloud defects are easily caused by occlusion factors and the equipment itself. To resolve this problem, this paper proposes an incomplete laser 3D point cloud classification and completion approach based on object symmetry. Herein, according to the symmetric key points in a single two-dimensional image, a mapping relationship of the symmetric plane was established, and the incomplete point cloud was classified by the position of the symmetric plane in the point cloud. Moreover, for a half residual defect point cloud, symmetric plane detection was performed directly followed by the image completion. For a less than half-incomplete point cloud, it was fused with the mirror point cloud to remove the duplicated data points for image completion. Furthermore, for a greater than half-incomplete point cloud, the direct hole-repair method was used to complete the missing information after fusion with the mirror point cloud. For extremely defective point clouds, the input point cloud was fused with the mirror point cloud and then fused with a completed similar point cloud as too much information was missing. Finally, redundant points were removed to complete the missing information. The experimental results of the actual acquisition point cloud of the incomplete 3D point cloud and the point cloud in the public database show that the proposed approach can complete different types of incomplete point clouds. These results are very similar to that of the entire complete point clouds. Thus, here, the effectiveness and feasibility of the proposed classification and completion approach are verified.

**Key words** laser point cloud; symmetric plane; point cloud completion; mirror symmetry

收稿日期: 2022-11-04; 修回日期: 2022-12-09; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-02-06

基金项目: 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1421300)、国家科技部外国专家局项目(DL2022013007L)、上海市浦江(D类)人才计划(21PJD025)、上海市科委创新行动科技支撑碳达峰碳中和项目(21DZ1207300)

通信作者: \*chenhui@shiep.edu.cn

# 1 引言

自然界中存在大量具有对称性的物体,随着三维测量和激光扫描技术<sup>[1-2]</sup>的快速发展,对称物体的三维重建在目标识别<sup>[3]</sup>、文物保护<sup>[4]</sup>等领域起着重要作用。由于采集设备和采集环境的影响,往往会获得不完备的三维点云,严重影响高精度三维模型的建立。对于非完备三维点云的补全,研究者通过直接修补法<sup>[5-8]</sup>提取点云中的孔洞边界,并根据孔洞周围的信息模拟真值点,构建高质量的网格。然而,当点云特征严重缺失时,往往采用融合配准法进行三维补全。刘青青等<sup>[9]</sup>提出基于 RealSense 多视角点云配准的三维重建方法,通过粗配准统一一点云姿态,并利用基于权重的精配准进行点云拼接;Choi 等<sup>[10]</sup>利用全局配准进行回环检测,消除误差并取得了较好的结果;郑立华等<sup>[11]</sup>结合随机采样一致性和 iterative closest point (ICP) 算法实现对非完整点云的三维重建;张琮毅等<sup>[12]</sup>利用点云局部特征描述子对两片点云进行粗配准,以对抗不同传感器数据融合中的噪声。与非对称物体不同,对称物体具有对称性,利用三维点云的镜像点云对其进行补全时首先需要确定对称平面。对三维点云对称平面的检测,伍阳等<sup>[13]</sup>对三维点云进行重采样以减少点的数量,并将其投影到  $xoy$  平面,通过聚类变换拟合曲线,确定对称平面;Ji 等<sup>[14]</sup>通过 Random Sample Consensus (RANSAC) 算法计算初始对称平面,并通过 ICP 细化对称平面;Wu 等<sup>[15]</sup>基于深度学习确定遮挡对象的三

维点云中的对称平面。目前,针对非完备点云对称平面的检测及三维补全方法的普适性不强的问题,现有方法无法很好地检测出非完备点云的对称平面,不能对不同破损程度的点云进行三维补全。

为了获得对称物体非完备点云高精度的三维重建模型,本文提出一种遮挡条件下基于物体对称性的非完备激光三维点云分类补全方法。所提方法的主要创新点为:在遮挡或者残缺条件下,构建了一种激光三维点云的分类补全方法,该方法可对各种不同破损程度的点云进行三维补全;建立一种基于对称平面映射的补全方法,在真实实验采集激光点云中进行验证,该方法获得了较好的补全效果。

# 2 方法框架及系统搭建

所提方法的框架如图 1(a) 所示,包括采集三维完整点云、建立对称平面、进行非完备点云分类补全 3 个部分。基于该框架,搭建实际系统平台,如图 1(b) 所示,通过 3D 相机获取完整三维点云数据;然后根据单幅图像获取镜像对称关键点,将二维镜像对称关键点转换为三维镜像点,再建立对称平面;最后根据非完备点云与对称平面的关系对非完备点云进行分类,并对不同类型的三维点云进行补全。系统设备参数如表 1 所示。每次以单个物体为采集对象,输出初始三维点云,然后顺时针转动转盘 90°,再停止旋转且输出三维点云,直到旋转 360° 得到 4 组表面点云。所提方法获得的部分三维重建模型结果如图 2 所示。

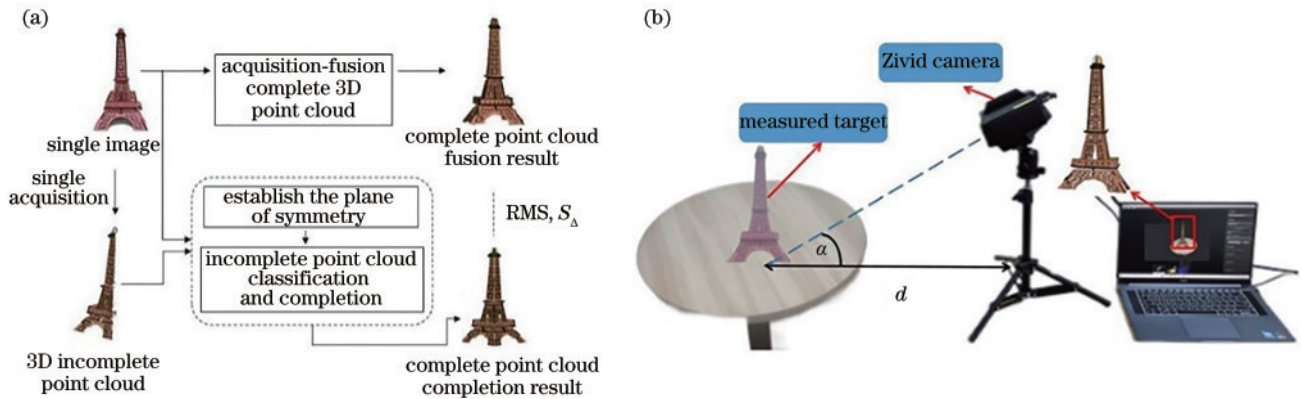


图 1 方法架构和系统搭建。(a) 所提方法框架; (b) 系统搭建示意图

Fig. 1 Approach architecture and system construction. (a) Proposed method framework; (b) schematic of system construction



图 2 多站采集融合后的部分完整点云

Fig. 2 Partial complete point cloud after multi-station collection and fusion

表 1 系统设备及参数设置

Table 1 System equipment and parameter setting

Name	Parameter setting
Point cloud acquisition device	Zivid One <sup>+</sup> Medium
Optimal acquisition range /m	1-3
Distance of acquisition $d$ /m	2
Angle of acquisition $\alpha$ /( $^{\circ}$ )	45

### 3 非完备点云对称平面建立

对各种残缺点云进行补全时,所提方法的主要分类标准为物体对称性,因此,首先需要在三维激光点云中建立对称平面,主要分为 3 个步骤,如图 3 所示。首先,在非完备三维点云的单幅图像上获取一对镜像对称关键点;然后,建立二维图像与三维点云的坐标转换关系,并利用转换关系在三维点云中提取对应的三维镜像对称关键点;最后,基于三维镜像对称关键点确定对称平面。

使用配准镜像对称法(MSR)<sup>[16]</sup>提取单幅二维图像的对称线段,对输入图像进行角度为( $0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, \dots, 90^{\circ}$ )的 19 次旋转变换,并选择配准精度最小时的检测结果  $l$  作为对称线段。对称线段  $l$  为二维图像中镜像对称关键点  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  的中垂线,  $l$  满足

$$l: y = kx + b. \quad (1)$$

为了将二维镜像对称关键点转换为三维镜像对称关键点,需要建立二维图像和三维点云之间的转换关系。记二维图像中的三个点为  $(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c)$ , 同时记三维点云中的三个点为  $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k)$ 。以  $(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c)$  和  $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$  为顶点, 构成两个坐

标系中的两个三角形,  $(x_b, y_b)$  和  $(x_j, y_j)$  作为各坐标系的原点。将两个坐标系的转换关系记为  $T$ , 满足等式  $TA_1 = A_2$ , 其中  $A_1$  和  $A_2$  满足

$$A_1 = \begin{pmatrix} x_a - x_b & x_c - x_b \\ y_a - y_b & y_c - y_b \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} x_i - x_j & x_k - x_j \\ y_i - y_j & y_k - y_j \end{pmatrix}. \quad (2)$$

在求得二维镜像对称关键点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  与转换矩阵  $T$  后, 分别求出三维镜像对称关键点  $(x_1', y_1', z_1'), (x_2', y_2', z_2')$  中的  $(x_1', y_1')$  与  $(x_2', y_2')$ , 表达式为

$$\begin{pmatrix} x_1' - x_j \\ y_1' - y_j \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x_1 - x_b \\ y_1 - y_b \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x_2' - x_j \\ y_2' - y_j \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x_2 - x_b \\ y_2 - y_b \end{pmatrix}. \quad (4)$$

假设一平面由三维点云中选取的三点  $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k)$  构成, 其方程为  $Ax + By + Cz + D = 0$ 。将  $(x_1', y_1')$  和  $(x_2', y_2')$  代入平面方程, 求得  $z_1'$  和  $z_2'$ :

$$z_1' = -\frac{Ax_1' + By_1' + D}{C}, \quad (5)$$

$$z_2' = -\frac{Ax_2' + By_2' + D}{C}. \quad (6)$$

对称平面方程为  $A'x + B'y + C'z + D' = 0$ , 其中得出参数  $A', B', C', D'$  的表达式分别为

$$A' = x_1' - x_2', B' = y_1' - y_2', C' = z_1' - z_2', \quad (7)$$

$$D' = -\left( A' \times \frac{x_1' + x_2'}{2} + B' \times \frac{y_1' + y_2'}{2} + C' \times \frac{z_1' + z_2'}{2} \right). \quad (8)$$

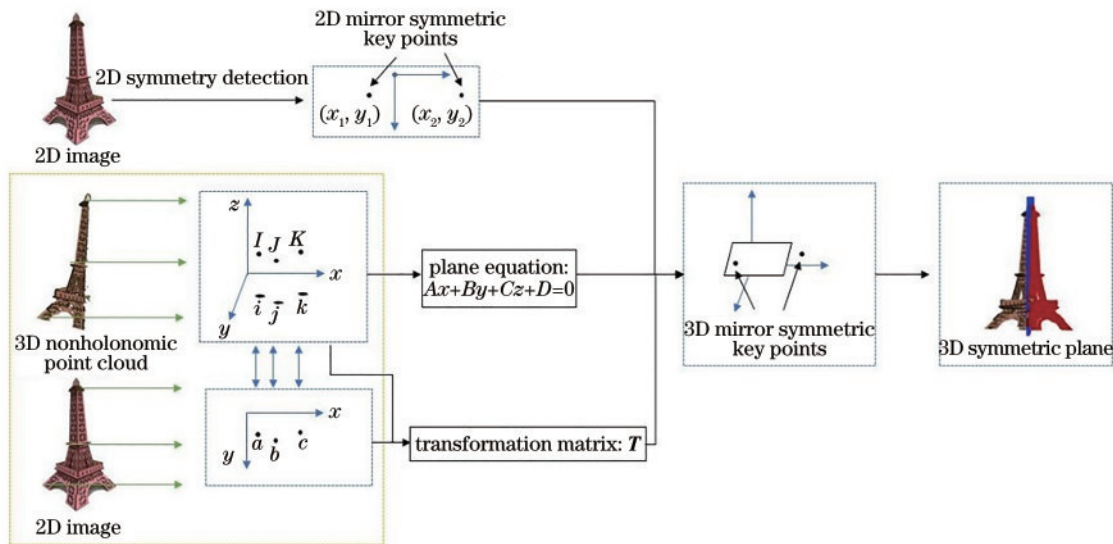


图 3 非完备点云对称平面建立示意图

Fig. 3 Schematic of establishing a symmetric plane of incomplete point cloud



## 4 非完备三维激光点云分类补全

### 4.1 非完备三维点云补全分类

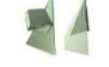

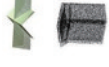

根据非完备点云与对称平面的关系,将所有非完备点云分为 4 类,如表 2 所示。设点云中点个数为  $N$ ,点云中第  $i$  点到对称平面的距离  $D_i$  为

$$D_i = \frac{x_i \times a + y_i \times b + z_i \times c + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \quad (9)$$

式中:  $(x_i, y_i, z_i)$  是三维点云中第  $i$  点坐标;  $a, b, c, d$  是对称平面方程的参数。设点云中各点间最短距离为  $\sigma$ ,  $D_i \geq 0$  时点个数为  $n$ ,  $D_i \leq 0$  时点个数为  $m$ 。

表 2 非完备点云分类

Table 2 Classification of incomplete point cloud

Category	Sample graph	Feature and definition
Half residual defect point cloud		$\forall D_i \geq 0$ or $\forall D_i \leq 0$ , and at least $\frac{N}{10000}  D_i  \leq \frac{\sigma}{2}$
Incomplete point clouds less than half		$\exists D_i \geq 0 \cup D_i \leq 0$ , $\min \{n, m\} > 0$ , $\min \{ D_i \} \leq \sigma$
Incomplete point clouds more than half		$\forall D_i > 0$ or $\forall D_i < 0$ , $\min \{n, m\} = 0$ , $\max \{n, m\} > 0$ , $100\sigma \geq \min \{ D_i \} > \sigma$ or less than $\frac{N}{10000}  D_i  \leq \frac{\sigma}{2}$
Extremely defective point cloud		$\forall D_i > 0$ or $\forall D_i < 0$ , $\min \{n, m\} = 0$ , $\max \{n, m\} > 0$ , and $\min \{ D_i \} > 100\sigma$

### 4.2 非完备点云补全方法

#### 4.2.1 半残缺点云补全方法

由于半残缺点云数量恰好为完整模型点云数量的 1/2,对称平面在其边界处。半残缺点云仅需与其镜像点云直接融合,即可获得完整模型点云。首先建立对称平面,对半残缺点云  $Q$  基于对称平面进行镜像变换,得镜像点云  $Q'$ ,镜像点云中的点  $q'$  为

$$q' = q - 2n(q^T n + d), \quad (10)$$

式中:  $q$  是半残缺点云  $Q$  中的点;  $n$  是对称平面的法向量;  $d$  是对称平面的深度值。

然后利用非完备点云中的颜色信息求得镜像点云中各对应点的颜色信息,再与半残缺点云融合,获得补全结果。镜像点云中点  $q'$  的颜色信息  $(r', g', b')$  为

$$(r', g', b') = (r, g, b) - 2n \left[ (r, g, b)^T n + d \right], \quad (11)$$

式中:  $(r, g, b)$  是半残缺点云点  $q$  对应的红、绿、蓝三个通道数值。

#### 4.2.2 残缺未过半点云补全方法

残缺未过半点云为实际采集时常获得的点云,当目标本身有部分缺失时,采集结果就是残缺未过半点云。对于此类点云,与半残缺点云补全方法类似,先非完备点云中建立对称平面,基于式(10)和式(11),计算其镜像点云三维坐标和颜色信息。

不同于半残缺点云补全方法,对于残缺未过半点云,由于其自身结构多于完整时的一半,在与镜像点云融合后需要去除其中冗余点。通过判断点间距离  $l_{dis}$ ,判断某点是否为冗余点,距离  $l_{dis}$  为

$$l_{dis}(q - q') = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}, \quad (12)$$

式中:  $q$  是残缺未过半点云  $Q$  中的点;  $q'$  是镜像点云  $Q'$  中的点;  $(x, y, z)$  是点  $q$  的三维坐标值;  $(x', y', z')$  是点

$q'$  的三维坐标值。

冗余点去除算法流程如图 4 所示,融合非完整点云  $Q$  和镜像点云  $Q'$ ,得到初始融合结果  $E$ ,计算非完备点云中各点间最小距离  $l_{dis \min}$ ,去除融合结果  $E$  中镜像点云中与非完备点云距离小于  $l_{dis \min}$  的点。

#### Redundant point removal algorithm

Input: nonholonomic point cloud  $Q$ , mirror point cloud  $Q'$ ; minimum distance  $l_{dis \min}$

Output: fusion result  $R$

- 1  $N$  is number of points in  $Q$ ,  $q_i$ ' is the  $i$  th point in  $Q'$ ,  $E$  is the set of points in  $Q$  and  $Q'$
- 2 For  $i \in N$  do
- 3     if  $q \in Q, l_{dis}(q - q_i) < l_{dis \min}$  then
- 4          $Q' = Q' - q_i, E = E - q_i$
- 5 Return  $R = E$

图 4 冗余点去除算法

Fig. 4 Redundant point removal algorithm

#### 4.2.3 残缺过半点云补全方法

残缺过半点云结构不足完整模型的一半,当其经对称平面映射后的镜像点云融合后仍存在孔洞,需对融合结果进行孔洞修补。残缺过半点云在融合由式(10)和式(11)计算出的镜像点云后,采用文献[17]提出的孔洞修补方法,弥补融合结果中缺失的少量点云信息。首先利用最小角度法对孔洞区域进行初始修补,通过输入孔洞边界点信息,获取边界边长及临边角度等,计算边界边长度的平均值  $\bar{a}$ ;其次计算所有边界点的相邻边夹角,寻找具有最小夹角的边界点;然后计算两相邻边界点的距离  $d$ ,若  $d > 2\bar{a}$ ,则新增 1 个三角片,否则增加 2 个三角片,并新增加 1 个新的边界点为旧边界点的中点;之后进行循环操作,直到检测到孔洞个数为 0;再采用最小二乘网格对网格顶点位置进行优化,优化条件为

$$\min \left\{ \|LX\| + \sum_{s \in C} \|\mathbf{x}_s - \mathbf{v}_s\|^2 \right\}, \quad (13)$$

式中： $L$ 是Laplace矩阵； $X$ 是 $n \times 3$ 的顶点坐标矩阵； $\mathbf{x}_s$ 是对顶点 $\mathbf{v}_s$ 进行一个偏移修正后的顶点。

最后利用文献[18]中的方法检验三角片的位置，去除可能存在自交的，或与非孔洞区域的网格相交的三角片。假设空间中某点 $\mathbf{v}_j$ 的相邻两个三角形的法向量为 $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$ ，空间中的某三角面的三个顶点为 $\mathbf{v}_1$ 、 $\mathbf{v}_2$ 、 $\mathbf{v}_3$ ，则其法向量 $\mathbf{n}$ 的计算结果为

$$\mathbf{n} = \frac{(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \times (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1)}{\|(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \times (\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1)\|}. \quad (14)$$

求得 $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$ 后，令 $\mathbf{n}_0 = (\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2)/2$ ，设定经过点 $\mathbf{v}_j$ 所在平面的法向量 $\mathbf{n}_0$ ，将孔洞边界投影到该平面，作为目标区域。若新增的顶点在平面上的投影不在目标区域内，则说明新增的点出现在角等分线的延长线上，该顶点为不合理的顶点，将错误的点沿角平分线的方向移动到点 $\mathbf{v}_j$ 的对称位置，即可修正该错误。

#### 4.2.4 极度残缺点云补全方法

由于极度残缺点云缺失信息过多，即使与镜像点云融合后再用孔洞修补方法进行修复，依然会缺少特征。所以在融合镜像点云后，基于所提方法并采用文献[19]中融合配准异源相似点云的方法修复极度残缺点云。首先利用 principal component analysis (PCA) 统一两类传感器点云的主轴方向，引入尺度因子 $s$ ，再通过奇异值分解法求解转换参数；基于 PCA，确定两组点云的主轴方向，并将两组点云转换成一个坐标系；最后对经过上述变换后的两组点云进行基于区域分割的精确配准。

#### 4.3 三维点云补全评价指标

为了对补全结果进行客观评价，对补全结果与完整模型点云进行量化分析。评价指标一为两个点云中对应点之间距离的均方根(RMS)，RMS的表达式为

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N}}, \quad (15)$$

式中： $d_i$ 是完整点云中第 $i$ 个点与融合点云中点的最短距离； $N$ 是完整点云中点的个数。

评价指标二为融合前后点云以及完整模型点云面积的近似度。首先，利用 k-d tree 法搜索三维点云中各点附近距离最近的两个点，并将这三点视为一个三角形，然后计算每个三角形面积并进行累加求和，算出三维点云表面积。三角形面积的表达式为

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} \left\| \begin{array}{ccc} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{array} \right\|, \quad (16)$$

式中： $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 是 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的单位向量； $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$ 、 $(x_3, y_3, z_3)$ 是三角形顶点坐标。

#### 4.4 实验结果与分析

为了验证所提方法的可行性和有效性，采用分组实验进行验证。

##### 4.4.1 半残缺点云补全结果

半残缺点云实验数据为三维 Zivid 相机采集贯穿四棱锥左侧与六棱锥左侧所得的点云。实验结果如图 5 所示，对比最左侧与最右侧，可以看出补全结果能表现目标结构。

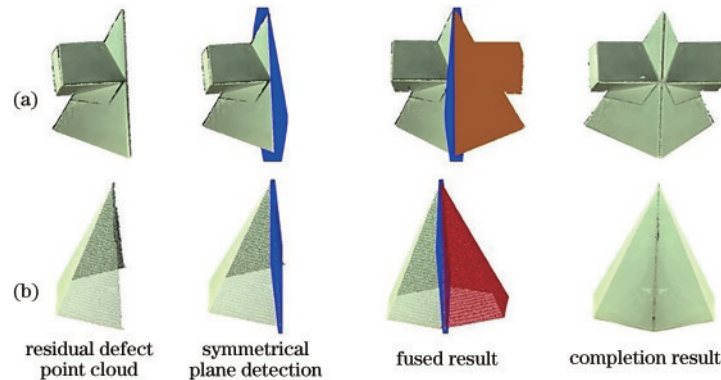


图 5 半残缺点云补全结果。(a)贯穿四棱锥；(b)六棱锥

Fig. 5 Completion results of half residual defect point cloud. (a) Rectangular pyramid; (b) hexagonal pyramid

表 3 为 RMS 与表面积计算结果。从表 3 可以看出，在六棱锥和贯穿四棱锥的实验中，RMS 均在 1 cm 以下，融合后点云表面积均比融合前半残缺点云表面积大。在六棱锥实验结果中，融合后点云表面积和完整点云表面积相差 1.41 cm<sup>2</sup>，相对误差约为 0.7%；在贯穿四棱锥实验结果中，融合后点云表面积和完整点云表面积相差 0.81 cm<sup>2</sup>，相对误差约为 0.2%。实验结果显示融合后点云表面积与完整点云表面积十分接

近，证明所提方法能将半残缺点云补全为完整点云。

##### 4.4.2 残缺未过半点云补全结果

在进行三维测量时，常由于设备采集角度，单次采集结果为残缺未过半点云。图 6 为所提方法对残缺未过半点云(单次采集)的补全结果。从图 6 可看出，残缺未过半点云明显结构有所缺失，而在最右侧展示在所提方法补全结果中，4 组残缺未过半点云均被补全，结构完整。

表 3 半残缺点云实验的评价指标值

Table 3 Evaluation index value of half residual defect point cloud

Evaluation index	Hexagonal pyramid	Rectangular pyramid
RMS /cm	0.1028	0.1702
Surface area of half residual defect point cloud /cm <sup>2</sup>	113.17	188.51
Surface area of the full model point cloud /cm <sup>2</sup>	200.81	327.90
Surface area of the fused point cloud /cm <sup>2</sup>	199.40	327.09
Surface area approximation of the fused point cloud to the full model point cloud /%	99.3	99.8

除设备采集角度使得采集结果为残缺未过半点云

外,目标本身有所缺失时会导致多站采集结果为残缺未过半点云。利用所提方法采集拆除部分后的房子模型与导弹车模型,得到残缺未过半点云(自身缺损),如图 7 所示,从第一列非完整房子点云与非完整导弹车点云均可清晰看出缺失部分特征,而在最后一列补全结果中能够看到缺失特征已被补充,补全结果中无明显缺失。

表 4 为图 6 与图 7 所示实验结果的评价指标。从表 4 可以看出:所提方法在 6 组实验中的 RMS 均小于 1 cm,融合后表面积与融合前相比有明显增加;融合后表面积与完整模型差距极小,最大差值在六棱柱实验结果中为 5.06 cm<sup>2</sup>,但相对误差仅为 1.8%;且其他实验结果表面积与完整点云表面积差值都在 2 cm<sup>2</sup> 以下。这表明所提方法不仅能够修复目标自身残缺的非完整点云,还能将单次采集得到的非完备点云补充完整。

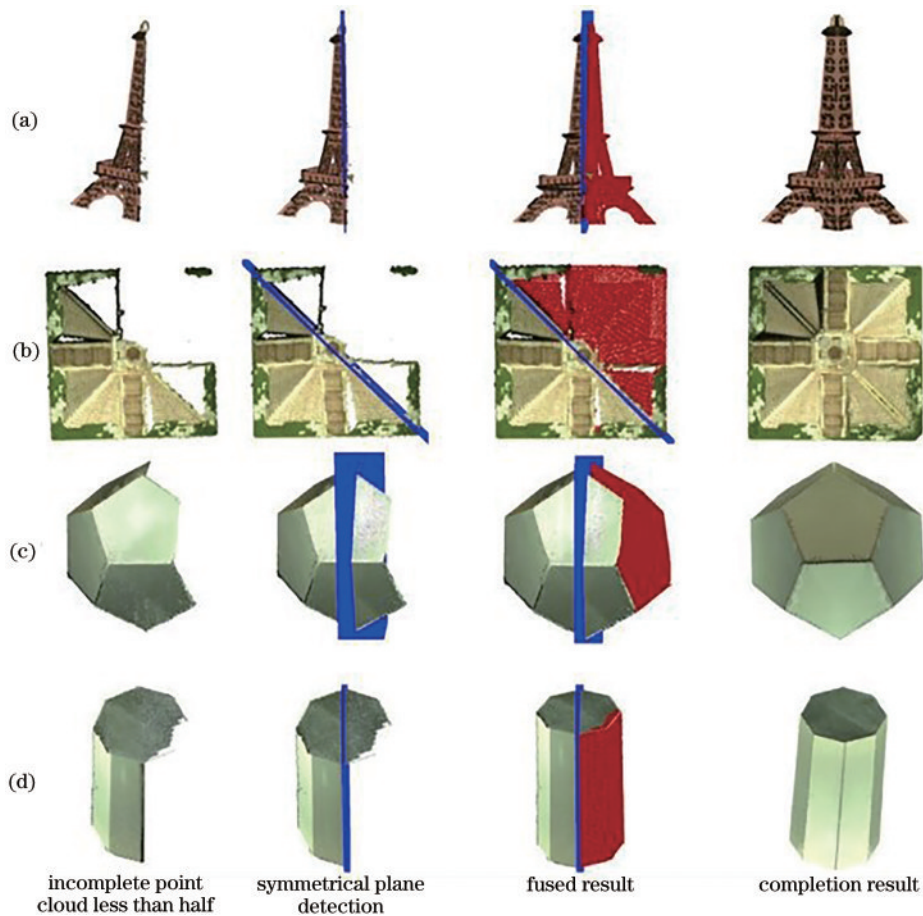


图 6 残缺未过半点云(单次采集)补全结果。(a)铁塔;(b)金字塔;(c)十二面体;(d)六棱柱

Fig. 6 Completion results of incomplete point cloud less than half (single acquisition). (a) Iron tower; (b) pyramid; (c) dodecahedron; (d) hexagonal prism

#### 4.4.3 残缺过半点云补全结果

所提方法对残缺过半点云的补全结果如图 8 所示。在图 8 的对称平面检测结果中,对称平面与点云间存在明显距离,而在与镜像点云融合的结果中融合点云与对称平面没有相交。

为显示出补全结果的结构特征,图 8 补全结果中

红色点是经三角面片重建后重采样得到的。从补全结果中可以看到,经所提方法补全后,残缺过半点云由不足完整结构的一半变得能够被识别。尚有一部分缺失信息未能补充完美,例如图 9 十字架中缺失的棱角,这是由于选择的孔洞修补方法对尖锐特征孔洞效果不佳。



表 4 残缺未过半点云实验的评价指标值

Table 4 Evaluation index value of incomplete point cloud less than half

Evaluation index	Iron tower	Pyramid	Dodecahedron	Hexagonal prisms	House	Missile car
RMS /cm	0.1379	0.0806	0.0867	0.0945	0.1746	0.1288
Surface area of incomplete point cloud less than half /cm <sup>2</sup>	67.56	71.02	124.04	209.92	122.45	56.92
Surface area of the full model point cloud /cm <sup>2</sup>	117.51	138.74	219.13	275.73	134.78	75.06
Surface area of the fused point cloud /cm <sup>2</sup>	117.29	136.79	217.51	270.67	134.31	73.72
Surface area approximation of the fused point cloud to the full model point cloud /%	99.8	98.6	99.3	98.2	99.7	98.2

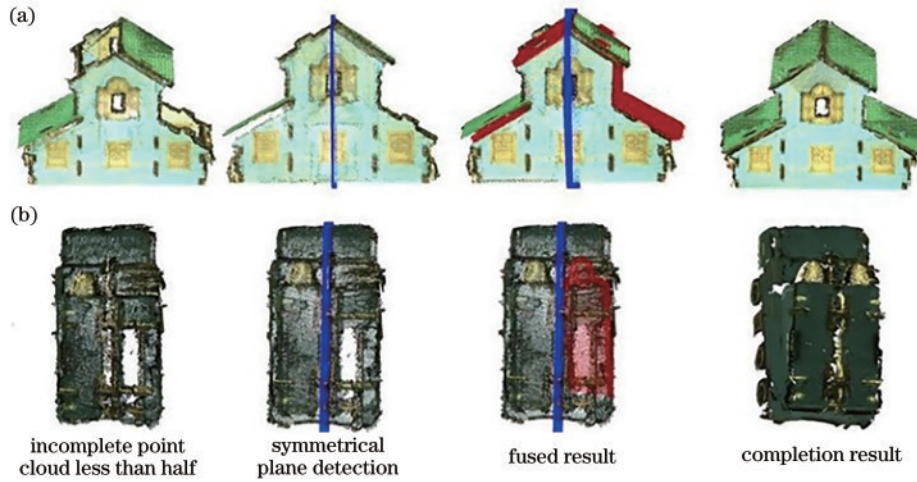


图 7 残缺未过半点云(自身缺损)补全结果。(a)房子;(b)导弹车

Fig. 7 Completion results of incomplete point cloud less than half (self defect). (a) House; (b) missile car

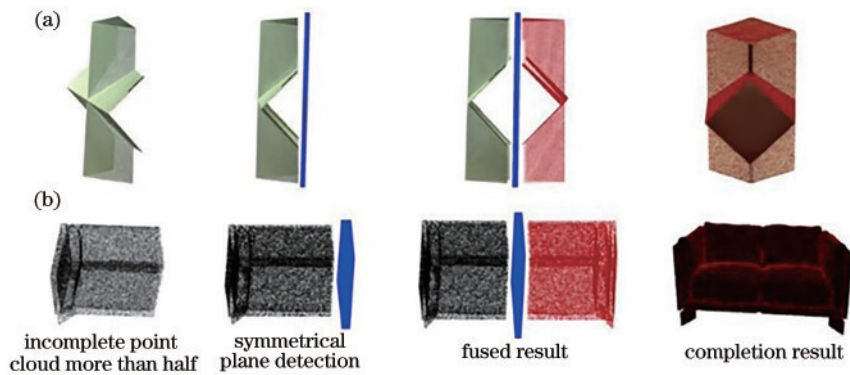


图 8 残缺过半点云补全结果。(a)十字架;(b)沙发

Fig. 8 Completion results of incomplete point cloud more than half. (a) Cross; (b) sofa

表 5 展示了图 8 所示实验结果的评价指标。从表 5 可知,两组实验的 RMS 均在 1 cm 以下,但在十字架实验结果中,融合后表面积比完整模型表面积多出 5.8 cm<sup>2</sup>。如图 9 所示,由于十字架本身有棱角,在修复过程中被错误补全成较平滑的曲面,增加了面积,相对误差约 1.6%。而在沙发的实验结果中,表面积之差为 270.31 cm<sup>2</sup>,但考虑到沙发本身的大小,其相对误差约为 0.5%,仍能证明所提方法有效。

#### 4.4.4 极度残缺点云补全结果

极度残缺点云三维补全实验需要结构较为相似的

两组点云,实验数据来自网络数据库中的相似两点云<sup>[20]</sup>。如图 10 所示,黑色点云为目标完整点云,蓝色点云为切除黑色点云部分构成的极度残缺点云,绿色点云为相似点云,红色点云为镜像点云。从图 10 能看出无法识别的极度残缺点云经所提方法补全后,融合点云可被识别。

为了更好地显示补全结果的结构,如图 11 所示,将补全后模型重采样后用红色点标识,可以看出融合点云与目标完整点云仍存在一些差异。图 10 中 Armchair 的融合点云结果中绿色部分与其他部分结合

表 5 残缺过半点云实验的评价指标值

Table 5 Evaluation index value of incomplete point cloud more than half

Evaluation index	Cross	Sofa
RMS /cm	0.1484	0.1382
Surface area of incomplete point cloud more than half /cm <sup>2</sup>	148.77	21225.35
Surface area of the full model point cloud /cm <sup>2</sup>	356.26	50048.46
Surface area of the fused point cloud /cm <sup>2</sup>	362.06	50318.77
Surface area approximation of the fused point cloud to the full model point cloud /%	98.4	99.5

后存在些许差异,表现在补全结果即图 11(b)中为

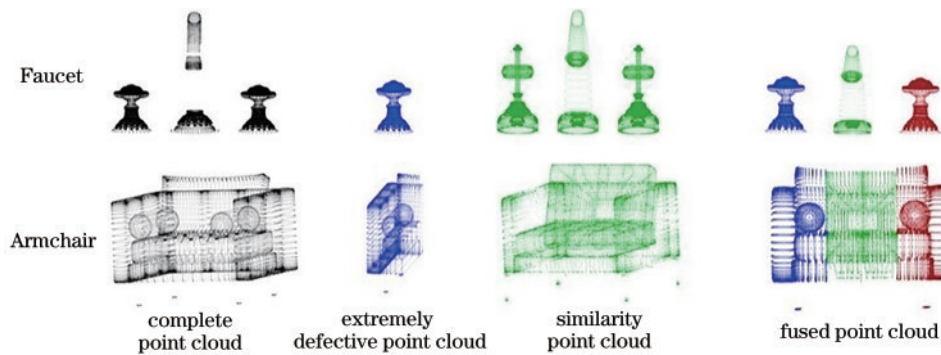


图 10 极度残缺点云的融合结果

Fig. 10 Fusion results of extremely defective point cloud



图 11 极度残缺点云的补全结果

Fig. 11 Completion results of extremely defective point cloud

表 6 显示了极度残缺点云实验的评价指标。从表 6 可以看到,两组实验的 RMS 远小于 1 cm。在

表 6 极度残缺点云实验的评价指标值

Table 6 Evaluation index value of extremely defective point cloud

Evaluation index	Faucet	Armchair
RMS /cm	0.0549	0.1210
Surface area of extremely defective point cloud /cm <sup>2</sup>	630.03	10330.24
Surface area of the full model point cloud /cm <sup>2</sup>	2051.74	31776.47
Surface area of the fused point cloud /cm <sup>2</sup>	2082.19	31079.61
Surface area approximation of the fused point cloud to the full model point cloud /%	98.5	97.8

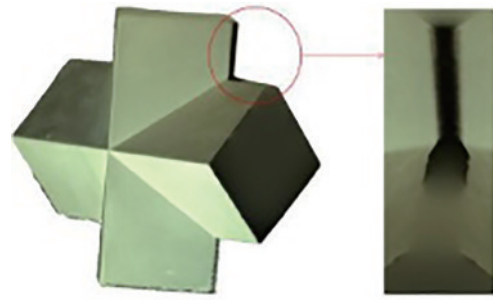


图 9 残缺过半点云(十字架)补全结果

Fig. 9 Completion results of incomplete point cloud more than half (cross)

Armchair 椅背处不够平滑,但最终结果与目标完整点云可被识别为同一类物体。

Faucet 实验结果中,融合后点云表面积与完整点云表面积差为 30.45 cm<sup>2</sup>,相对误差为 1.5%;Armchair 实验结果中,融合后点云表面积比完整点云表面积减少了 696.86 cm<sup>2</sup>,相对误差为 2.2%。其中表面积减少的原因因为相似点云较窄,部分点云间融合不够平滑。虽然实验结果中融合后点云表面积与完整点云表面积差值较大,但相对误差很小,证明所提方法对极度残缺点云有效。

## 5 结 论

针对对称物体的非完备点云重建效果差的问题,提出一种遮挡条件下基于物体对称性的非完备激光三维点云分类补全方法。首先对非完备点云进行对称平面的检测,然后根据非完备点云与对称平面的关系对非完备点云进行分类。非完备点云分为半残缺点云、残缺未过半点云、残缺过半点云及极度残缺点云。以实际采集点云与公共数据库中点云为实验对象,利用所提方法进行补全,并比较补全后结果与完整点云。实验结果显示,所提分类补全方法能将不同类型非完备点云补全为与完整时极为相似的点云,同时实验结果与完整点云表面积相对误差很小,验证了所提方法的有效性。



## 参 考 文 献

- [1] 任苏霞, 张晨爽, 曹慧群, 等. 基于双螺旋点扩展函数工程的三维多焦点双光子激光扫描显微技术[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1411001.  
Ren S X, Zhang C S, Cao H Q, et al. Three-dimensional multifocal two-photon laser scanning microscopy based on double-helix point spread function engineering[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1411001.
- [2] 李天雄, 侯茂盛, 李丽娟, 等. 基于特征自适应的激光扫描投影图形控制点提取及优化方法[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2411004.  
Li T X, Hou M S, Li L J, et al. Control point extraction and optimisation method of laser scanning projection graphics based on feature adaptation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2411004.
- [3] 朱航, 樊绍胜, 黎天. 基于双目视觉的支柱绝缘子目标识别与定位研究[J]. 电功率, 2021, 36(2): 127-138.  
Zhu H, Fan S S, Li T. Research on target recognition and localization of pillar insulators based on binocular vision[J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(2): 127-138.
- [4] 李敏, 刁常宇, 葛云飞, 等. 石窟寺文物的数字化保护与利用[J]. 遥感学报, 2021, 25(12): 2351-2364.  
Li M, Diao C Y, Ge Y F, et al. Digital protection and utilisation of Grotto cultural relics[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(12): 2351-2364.
- [5] 高旋辉, 鲍苏芬, 范应方, 等. 一种基于三角网格模型的空洞填补方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(6): 188-191.  
Gao X H, Bao S S, Fan Y F, et al. A method for holes filling in a triangular mesh model[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(6): 188-191.
- [6] 陈士杰, 张森林, 刘妹琴, 等. 基于改进Delaunay三角剖分的水下地形三维重建算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(11): 137-141.  
Chen S J, Zhang S L, Liu M Q, et al. The underwater terrain three-dimensional reconstruction algorithm based on improved Delaunay triangulation[J]. Computer Science, 2020, 47(11): 137-141.
- [7] 李松, 马聪聪, 陆帆, 等. 基于多向波前法的岛屿孔洞修补[J]. 中国机械工程, 2019, 30(20): 2473-2479.  
Li S, Ma C C, Lu F, et al. Island hole repairing based on multi-directional advancing method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(20): 2473-2479.
- [8] Kazhdan M, Chuang M, Rusinkiewicz S, et al. Poisson surface reconstruction with envelope constraints[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(5): 173-182.
- [9] 刘青青, 毋涛. 基于RealSense人体多视角三维重建方法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(10): 77-83.  
Liu Q Q, Wu T. Research on multi-view 3D reconstruction method of the human body based on RealSense[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(10): 77-83.
- [10] Choi S, Zhou Q Y, Koltun V. Robust reconstruction of indoor scenes[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 5556-5565.
- [11] 郑立华, 王露寒, 王敏娟, 等. 基于Kinect相机的油菜菜自动化三维点云重建[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 159-168.  
Zheng L H, Wang L H, Wang M J, et al. Automated 3D reconstruction of leaf lettuce based on a Kinect camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 159-168.
- [12] 张琼毅, 魏子庄, 徐昊文, 等. 尺度可变的快速全局点云配准方法[J]. 计算机学报, 2019, 42(9): 1939-1952.  
Zhang C Y, Wei Z Z, Xu H W, et al. Scale variable fast global point cloud registration[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(9): 1939-1952.
- [13] 伍阳, 王丽妍, 许浩, 等. 基于对称性的LiDAR点云修复研究[J]. 地理空间信息, 2020, 18(12): 31-34, 40, 6.  
Wu Y, Wang L Y, Xu H, et al. Research on LiDAR point cloud repairing based on symmetry[J]. Geospatial Information, 2020, 18(12): 31-34, 40, 6.
- [14] Ji P L, Liu X G. A fast and efficient 3D reflection symmetry detector based on neural networks[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(24): 35471-35492.
- [15] Wu Z L, Jiang H Y, He S Y. Symmetry detection of an occluded point cloud using deep learning[J]. Procedia Computer Science, 2021, 183: 32-39.
- [16] Ciccone M, Hildebrand D G C, Elliott H. Finding mirror symmetry via registration and optimal symmetric pairwise assignment of curves: algorithm and results[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), October 22-29, 2017, Venice, Italy. New York: IEEE Press, 2018: 1759-1763.
- [17] 崔文, 陈辉, 刘万泉. 激光三角网格点云孔洞曲面修补方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2014002.  
Cui W, Chen H, Liu W Q. The hole surface repairing for a laser triangular mesh point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2014002.
- [18] 耿国华, 余凡, 杨稳, 等. 形状约束的样本填充式三维模型修复[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2863-2872.  
Geng G H, Yu F, Yang W, et al. Three-dimensional model restoration with shape-constrained sample filling[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 2863-2872.
- [19] Chen H, Xu F Y, Liu W Q, et al. 3D reconstruction of unstructured objects using information from multiple sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26951-26963.
- [20] Website. Archive 3D: 3D model repository[EB/OL]. [2022-10-22]. <https://archive3d.net/>.