

基于轮廓曲线特征的破碎物体重组算法

何璐阳¹ 谢晓尧¹ 刘建成² 刘嵩¹ 王冲²

HE Luyang XIE Xiaoyao LIU Jiancheng LIU Song WANG Chong

摘要

由于大多数断裂面拼接算法主要适用于断裂面粗糙且特征丰富的碎片,针对部分破碎物体碎片断裂面特征稀少难以提取的问题,提出一种既适用于断裂面粗糙又适用于断裂面光滑的基于轮廓曲线特征的破碎物体重组算法。首先利用区域生长算法和改进的曲面融合算法分割出破碎物体碎片断裂面。然后,利用边界提取算法得到断裂面的边缘轮廓曲线,将经过体素滤波处理过后的边缘轮廓曲线作为配准的基础。最后,采用4PCS算法和迭代最近点算法对处理过的碎片边缘轮廓曲线进行粗配准和精细配准,并将旋转平移矩阵应用到原始碎片中得到拼接结果。结果表明,所提出的算法能够适用于断裂面特征丰富和特征较为稀少的破碎物体重组,有效解决了基于断裂面表面特征的算法无法拼接断裂面光滑碎片的问题。

关键词

破碎物体重组; 特征轮廓曲线; 点云配准; 曲面分割; 迭代最近点算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.02.018

0 引言

三维破碎物体重组在许多领域都得到了广泛的应用。在制造业领域中,破碎物体重组可以应用于零件的修复和制造工作。在考古和文物保护领域,三维碎片重组拼接可以在避免文物二次损坏的情况下,极大程度地提高破碎文物复原的效率。此外,在医学和建筑等领域三维碎片重组也有着重要的研究意义。

当前有很多学者参与到破碎物体碎片拼接的研究中,现存的碎片拼接算法主要分为两种。一种算法是以轮廓线为特征的薄壁碎片拼接,常常应用于陶瓷或青铜器等文物的碎片拼接和壁画修复等方面。李康等人^[1]引入薄壁碎片主轮廓线和次轮廓线以及二级邻接生长曲面的概念,利用三维网格识别断裂面,依靠断裂面来提取次轮廓线。Hong等人^[2]利用SfM中的增量配准结合基于轴的几何特征描述符完成了多组混合陶瓷碎片的同时拼接。Alantsetseg等人^[3]采用傅里叶级数逼近边界轮廓并计算每条曲线的傅里叶系数来进行匹配。周明全等人^[4]结合轮廓线特征点和碎片表面纹饰信息实现碎片精准拼接。袁洁等人^[5]提出一种基于轮廓线双向距离场的碎片拼接算法。王晓辉等人^[6]以碎片表面法向量作为支撑构造二次曲面估算点云曲率,采用特征提取算法识别轮廓特征点并拟合轮廓线来完成拼接。

另一种算法是基于断裂面表面特征的厚壁碎片拼接,这类碎片大多断裂面表面特征丰富,所以针对厚壁碎片往往基于断裂面的几何特征来进行拼接。Huang等人^[7]采用了基于积分不变量的多尺度表面特征。李群辉等人^[8]划分出碎片凹凸区域,采用主成分分析方法比较凹凸区域的相似性来进行断裂面匹配。Alagrami等人^[9]利用检测到的封闭轮廓曲线对输入点云进行分割,通过ICP算法对分割完的区域进行匹配。耿国华等人^[10]构造了特征点之间相对距离和相对夹角的特征描述符,利用随机采样一致性算法剔除误匹配点对,采用改进的迭代最近点算法完成精确匹配。刘晓宁等人^[11]构造多尺度空间提取断裂面特征点,再结合SURF特征描述符和杰卡德距离完成碎片拼接。

由于现存的绝大多数断裂面匹配算法主要适用于断裂面粗糙特征丰富的碎片,对于部分表面较为光滑无法提取断裂面特征的碎片来说适用性较差,然而物体破碎形成的断裂面表面复杂程度具有随机性,断裂面可能是粗糙的也有可能是光滑的。针对光滑断裂面的厚壁碎片无法提取表面特征的问题,提出一种既适用于断裂面粗糙的碎块又适用于断裂面光滑的碎块的拼接算法,即提取断裂面的轮廓曲线作为特征进行碎块匹配。

1 方法概述

首先,采用区域生长算法对破碎物体碎片进行曲面分割,由于碎片表面可能存在一些尖锐的曲率变化较大的区域,采用区域生长算法会出现一些独立小面片导致断裂面无法被完整分割,所以提出一种改进的曲面融合算法,即通过计算小

1. 贵州师范大学贵州省信息与计算科学重点实验室
贵州贵阳 550001
2. 四川省文物考古研究院 四川成都 610042

面片质心，搜索质心近邻点，当近邻点在某个相邻大面片中数量最大时，则认为物理意义上小面片距离该面片最近，就将独立小面片融合到这个大面片中，由此完成碎片的曲面分割。然后，对于由曲面分割得到的断裂面进行边缘轮廓提取得到断裂面的边缘轮廓曲线，对边缘轮廓曲线进行体素质心滤波，在保留曲线特征的情况下减少数据量，去除干扰点。最后，采用 4PCS 算法和 ICP 算法对轮廓曲线进行粗匹配和精细匹配，将配准得出的旋转平移参数应用到原始碎片中，完成破碎物体的重组。算法流程图如图 1 所示。

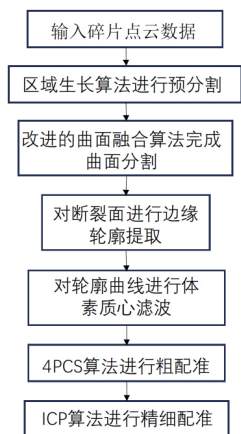


图 1 算法流程图

2 碎片曲面分割

由于本文采用的是基于断裂面边缘轮廓曲线来完成碎片拼接的方法，对破碎物体碎片进行曲面分割，得到碎片的断裂面，为后续提取断裂面轮廓线提供数据。本文采用区域生长算法对碎片曲面进行初步分割，以曲率的最小值为种子点，搜索近邻点并计算每个近邻点与当前种子点的法线角度差，当满足法线角度差值小于设定阈值且该点曲率也小于设定阈值这两个条件时，将该点添加到种子点集，直到种子点集为空，代表该区域生长完成，重复上述步骤直到碎片点云中的所有点均被标记完毕。

在区域生长算法应用到实际碎片曲面分割中时，由于碎片的同一个表面不总是满足上述两个设定条件，曲面中可能会存在一些曲率变化较大的凹凸区域，所以在区域生长过程中会产生一些独立小面片，如图 2 所示。

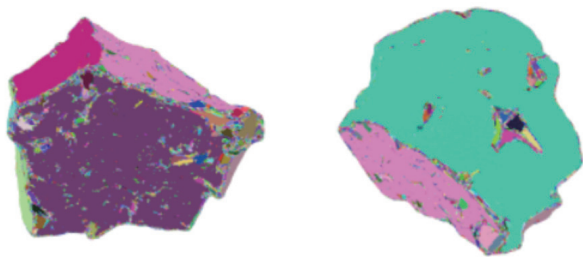


图 2 区域生长算法作用效果

碎片各个面中曲率变化较大的部分和面片相交处均会产生一些独立小面片，导致碎片的各个面无法被完整分割出来。为解决该问题，本文提出一种改进的曲面融合算法，根据独立小面片质心距离哪个较大面片更近作为判断该面片归属的依据。首先，设定一个数值，将区域生长得到的面片中点云数量小于该数值的归属到小面片的范畴。然后计算每个小面片的质心，通常质心为物体内部所有质点的平均位置，即物体的重心。计算公式如下：

$$P_c = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^n m_i r_i \quad (1)$$

式中： $r_i=(x_i, y_i, z_i)$ 为各个质点的坐标， n 为质点数量， m_i 为质点对应的质量。 M 为所有质点质量的总和。在计算点云质心时，令上式中的 $m_i=1$ ，即可得到点云的质心坐标求取公式。

$$P_c = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=0}^n x_i, \sum_{i=0}^n y_i, \sum_{i=0}^n z_i \right) \quad (2)$$

得到面片质心后，以 $k-d$ 树为搜索结构对该面片质心进行 K 近邻查找。当质心近邻点归属于与其相邻的某个较大曲面的数量最多时，则将小面片归属到这一较大曲面中。如图 3 所示， P_c 为面片 b 的质心， a 面片和 c 面片为与小面片 b 相邻的大面片。对质心 P_c 进行近邻点搜索，由图 3 可知 a 面片中近邻点数量要大于 c 面片中近邻点数量，所以将 b 面片归属于 a 面片，将上述过程应用到所有小面片中完成面片融合。

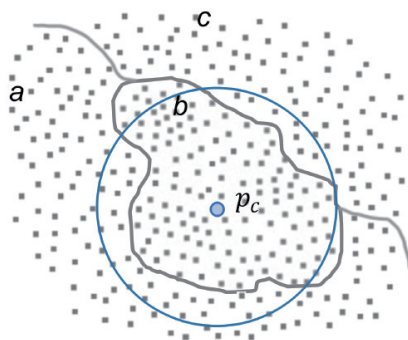


图 3 小面片融合

以质心查找近邻点判断面片归属的方法和查找面片中每个点近邻点进而判断归属面片的方法相比，由于减少了需要运算的数据量，缩短了曲面分割时间，很大程度上提高了曲面分割的效率，如图 4 为改进的曲面融合算法分割结果。



图 4 改进曲面融合算法分割结果

3 特征轮廓线的提取与处理

在破裂物体碎片拼接过程中,提取边缘轮廓曲线是至关重要的一步,点云轮廓提取是从碎片点云中识别物体的边界,从而获取边缘轮廓曲线为后续轮廓线的粗匹配和精细匹配提供依据。

3.1 点云特征轮廓曲线的提取

破碎物体碎片经过曲面分割后得到了每个碎片的断裂面信息,在这里要对每个断裂面进行边缘轮廓提取^[12]得到特征轮廓曲线。

在点云中任取一点,将该点包含的所有邻域点投影到切平面上,计算相邻两个连续投影点之间的角度,当采样点与与其相邻的两个邻域点之间形成的有向线段的角度差值大于某一设定阈值时,则将其判定为边界点,反之,则为非边界点。如图5所示,假定角度阈值被设置为 180° ,对于图5(a)组图,两条有向线段组成的最大夹角 θ_1 小于 180° ,则被判定为内部点,图5(b)组图中最大夹角 θ_2 大于 180° ,所以被判定为边界点。

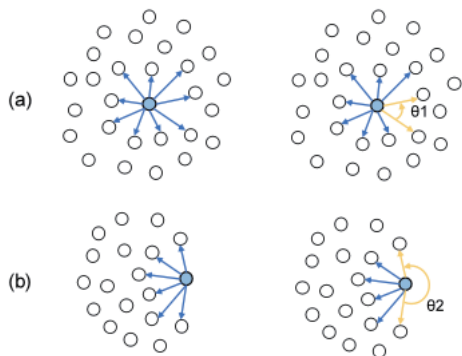


图5 边界点提取原理

如图6所示,为碎片的断裂面边缘轮廓曲线提取结果。可以看到断裂面的轮廓曲线被完整地提取出来。

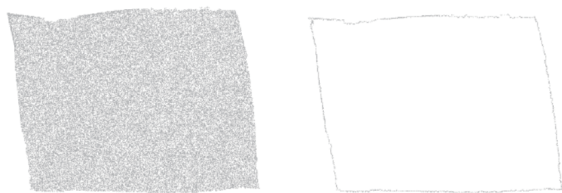


图6 边缘轮廓曲线提取

3.2 特征轮廓曲线的滤波处理

为提高轮廓曲线匹配的效率和精度,本文对轮廓曲线进行滤波处理,体素滤波是一种对三维点云数据进行下采样的技术,它将点云数据划分成规则的三维体素网格,然后在每个体素内进行操作,可以在下采样的同时尽可能保留点云的原始特征。相较于体素中心滤波,将体素中所有点的质心作为该体素的保留点更加精确,它的优势在于更好地保留了轮

廓曲线的细节和形状,从而在减少数据规模和消除噪声的同时,确保不会丢失关键信息,为后续的匹配过程输入更加可靠的数据。所以本文采用体素质心滤波的方法对轮廓线进行处理。如图7所示。

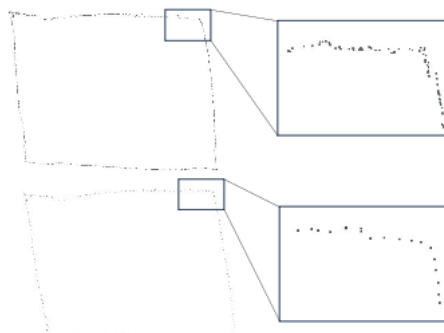


图7 滤波处理结果

在实验中也证明了经过体素滤波处理后的点云轮廓曲线,由于消除了噪声,减少了数据规模,减少了噪声点对于匹配算法的影响,所以配准所需的时间更短、匹配效果更好。

4 点云配准

本文采用基于四点算法的粗配准和基于ICP算法的精细匹配来完成点云的配准工作。

4.1 基于四点算法的粗配准

4PCS算法^[13]算法基于RANSAC算法框架,以一个三点集为基础找到和该三点共面的四点集,利用仿射不变性约束,以近似全等的匹配方式找到另一个点云中的符合条件的四点集合。使用LCP策略找到配准后具有最高重叠度的四点点对,得到最优匹配结果。算法的具体步骤如下。

(1)在源点云中随机选取三点,这三点组成的三角形面积要足够大,在源点云找到与该三点共面的第四个点。

(2)确定四点集的位置后,如图8所示,点集 $\{a, b, c, d\}$ 为寻找到的共面四点, e 为两条线段的交点,计算四个基点之间的比例因子 r_1 、 r_2 。

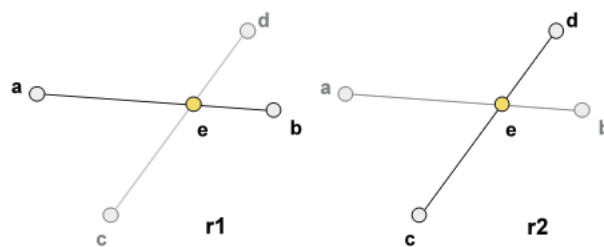


图8 比例因子

$$r_1 = \frac{\|a - e\|}{\|a - b\|}, r_2 = \frac{\|c - e\|}{\|c - b\|} \quad (3)$$

(3)在目标点云中遍历所有点对,找到所有满足 r_1 和 r_1 约束条件的点集,在这些点集中寻找最优全等四点集。

(4)计算最优点对的旋转平移矩阵,并将其应用到全局。

4.2 基于 ICP 算法的精细配准

ICP 算法是一种经典的点云配准方法。算法分别在源点云数据集和目标点云数据集中,按照一定的约束条件,找到最邻近点对 (p_i, q_i) ,利用最小二乘法计算出最优匹配参数 R 和 T , R 为旋转矩阵, T 为平移向量。

$$R_{(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式中: α 、 β 、 γ 分别表示点沿 x 、 y 、 z 轴的旋转角度。 t_x 、 t_y 、 t_z 分别表示点沿 x 、 y 、 z 轴的平移量,经过不断地迭代来找到最优的变换矩阵,最终使得误差函数 $E(R, T)$ 最小,以此来得到最优解。

$$E(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - (Rp_i + T)\|^2 \quad (6)$$

ICP 算法是目前常用的精配准算法之一,其主要步骤如下。

(1) 初始化: 设定初步的旋转平移矩阵,准备源点云 P 和目标点云 Q 这两个待配准点云。

(2) 对于在源点云 P 中的任意一点 p_i ,找到目标点云 Q 中的最近点 q_i ,建立点对应关系。

(3) 通过最小二乘法估计变换矩阵 R 和 T ,将其应用到源点云,完成点云变换。

$$p'_i = Rp_i + T, p_i \in P \quad (7)$$

(4) 计算变换后的源点云集和目标点云集之间的对应点的平均距离 d 。

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|p'_i - q_i\|^2 \quad (8)$$

(5) 当满足 d 小于设定阈值或迭代次数超过最大迭代次数时,算法执行结束。否则,返回步骤(2),继续迭代,直到满足收敛条件,输出最终的变换矩阵,配准完成。

5 实验结果与分析

本实验在 Windows10 系统下的 Microsoft Visual Studio 2019 的开发平台进行编码,在 AMD Ryzen7 2700X Eight-Core Processor/3.70 GHz,内存 64 GB 的 PC 机上运行。本文采用的实验数据包括由 3Ds Max2020 组合 RayFire 插件或 blender 模拟生成的仿真数据和公开数据集^[14] 尼达罗斯大教堂破碎的堂柱,其中碎片数据 cub_1 由 3Ds Max2020 和 RayFire 仿真生成,数据 cub_2 及 screw 由 blender 模拟生成。

以碎片数据 cub_1 为例,对比改进的曲面融合算法与原算法处理点云所需要的时间,其中 cub_1_s 为源点云,

cub_1_t 为目标点云,聚类数量为执行区域生长算法后产生的面片数量,如表 1 所示。

表 1 改进的曲面融合算法效果

碎片	cub_1_s	cub_1_t
点云数量	563 590	565 656
聚类数量	8736	8729
改进前曲面融合时间/s	63.828	64.203
改进后曲面融合时间/s	31.531	30.391
融合后聚类数量	6	6

由表 1 可得,改进的曲面融合算法有效减少了曲面分割所需要的时间,完成了曲面分割。图 9 为 cub_1 的初始位姿和配准结果,图 10 和图 11 分别为 cub_2 和 screw 的初始位姿和配准结果,图 12 为尼达罗斯教堂部分柱子的复原结果。由图 9~12 结果可知,该算法能够通过碎片边缘轮廓曲线特征较好地完成碎片的拼接。

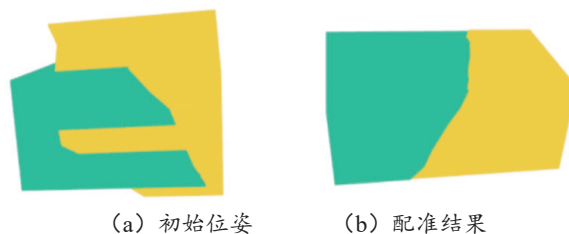


图 9 cub_1 配准结果

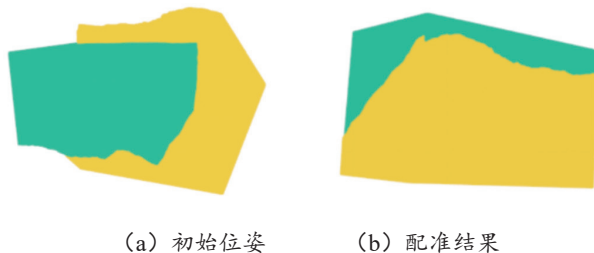


图 10 cub_2 配准结果

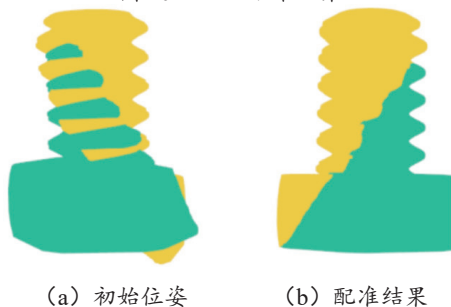


图 11 screw 配准结果

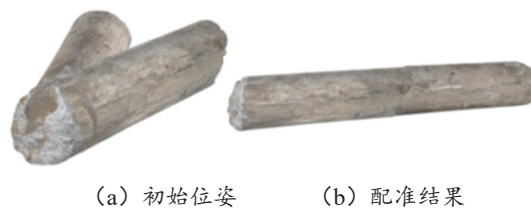


图 12 DoraColumn 配准结果

下面以特征对应点之间的均方误差作为评价拼接效果是否良好的标准,表2为各个碎片在配准中所需要的时间和均方误差。

表2 碎片数据配准误差和算法执行时间

破碎物体	破碎物体碎片	滤波后轮廓线点数量	均方误差/mm	配准时间/s
Cub_1	cub_1_s	200	0.167 3	1.809
	cub_1_t	198		
Cub_2	cub_2_s	313	0.182 3	50.035
	cub_2_t	274		
screw	screw_s	433	0.467 1	62.707
	screw_t	436		
DoraC-column	DoraColumn3	114	0.769 2	50.038
	DoraColumn5	115		

由表2各个碎片数据的配准后的均方误差可以得出,该算法达到了较好的拼接结果,其中配准时间与轮廓线的相似程度和轮廓线点数量有关,相似程度越高的轮廓曲线配准所需的时间越短,点云数量较多的碎片轮廓曲线配准时间要大于点云数量较少的轮廓曲线。

6 结语

针对部分碎片存在断裂面光滑、表面特征稀少、难以依靠断裂面几何特征来完成破碎物体重组的情况,本文以破碎物体碎片的边缘轮廓曲线为特征来进行拼接。首先,采用区域生长算法完成初步的面片分割,对于在这一过程中产生的独立面片,通过改进的面片融合算法,将小面片融合到与其相邻的较大面片中,提高了曲面分割的效率。然后利用边缘轮廓提取算法得到碎片的特征轮廓曲线。最后通过四点算法和迭代最近点算法对体素滤波后的轮廓曲线进行粗略配准和精确配准,将配准后得到的变换参数应用到原始碎片。实验证明该方法不依托于断裂面表面的几何特征,而是基于断裂面边缘轮廓线来完成破碎物体重组工作,不仅能够应用于断裂面粗糙破碎物体重组,也能应用于断裂面光滑的破碎物体重组,一定程度上提高了配准的效率,同时也得到了较好的拼接效果。

参考文献:

- [1] 李康,李静,孙家泽,等.一种改进的薄壁文物碎片特征轮廓线提取技术[J].图学学报,2015,36(2):251-256.
- [2] HONG J H, YOO S J, ZEESHAN M A, et al. Structure-from-sherds: Incremental 3D reassembly of axially symmetric pots from unordered and mixed fragment collections[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2021: 5443-5451.

- [3] ALTANTSETSEG E, MATSUYAMA K, KONNO K. Pairwise matching of 3D fragments using fast Fourier transform[J]. The visual computer, 2014, 30: 929-938.
- [4] 周明全,袁洁,耿国华,等.基于轮廓线特征点的交互式文物拼接[J].光学精密工程,2017,25(6):1597-1606.
- [5] 袁洁,周明全,耿国华,等.基于轮廓线双向距离场的文物碎片拼接算法[J].计算机工程,2018,44(6):207-212+218.
- [6] 王晓辉,王丽勇,傅思勇.基于轮廓特征的文物碎块自动拼接方法[J].赤峰学院学报(自然科学版),2021,37(10):35-41.
- [7] HUANG Q X, FLÖRY S, GELFAND N, et al. Reassembling-fractured objects by geometric matching[J]. Association for computing machinery, 2006,25(3): 569-578.
- [8] 李群辉,张俊祖,耿国华,等.基于凹凸区域的断裂面匹配算法[J].计算机工程与应用,2016,52(13):187-190+253.
- [9] ALAGRAMI A, PALMIERI L, ASLAN S, et al. Reassembling broken objects using breaking curves[EB/OL]. (2023-07-05) [2023-09-22]. <https://arxiv.org/abs/2306.02782>.
- [10] 耿国华,张鹏飞,刘雨萌,等.基于断裂面邻域特征的文物碎片拼接[J].光学精密工程,2021,29(5):1169-1179.
- [11] 刘晓宁,狄宏璋,杨稳,等.基于SURF特征描述符和杰卡德距离的文物碎片拼接[J].光学精密工程,2020,28(4): 963-972.
- [12] BENDELS G H, SCHNABEL R, KLEIN R. Detecting holes in point set surfaces[EB/OL].(2021-09-22)[2023-09-27]. <https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/1350/1/Bendels.pdf>.
- [13] AIGER D, MITRA N J, COHEN-OR D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration[J].Association for computing machinery, 2008,27(3): 1-10.
- [14] THEOHARIS T, PAPAIOANNOU G. Presious 3D cultural heritage fragments. [EB/OL].[2023-10-21]. <https://www.ntnu.edu/presious/3D-data-sets>.

【作者简介】

何璐阳(1998—),女,河北邢台人,硕士研究生,研究方向:计算机视觉、破碎物体重组。

谢晓尧(1952—),男,贵州贵阳人,博士,教授,研究方向:网络通信、信息安全与人工智能。

刘建成(1990—),男,四川成都人,硕士,研究方向:文物保护。

刘嵩(1983—),通信作者,男,贵州贵阳人,博士,副教授,研究方向:计算机视觉、三维重建。

王冲(1981—),男,四川广安人,硕士,研究方向:文物保护。

(收稿日期:2023-11-30)