

基于SURF特征描述符和杰卡德距离的文物碎片拼接

刘晓宁, 狄宏璋, 杨稳, 林芃越, 王世雄

引用本文:

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.

LIU Xiao-ning, DI Hong-zhang, YANG Wen, et al. Mosaic of cultural relics fragments based on SURF feature extraction descriptor and Jaccard distance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 963–972.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0963>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于轮廓线特征点的交互式文物拼接

Interactive reassembly of fractured fragments based on feature points of contour line
光学精密工程. 2017, 25(6): 1597–1606 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1597>

基于高光谱图像的改进SIFT特征提取与匹配

Improved SIFT feature extraction and matching technology based on hyperspectral image
光学精密工程. 2020, 28(4): 954–962 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0954>

多模态鲁棒的局部特征描述符

Multimodality robust local feature descriptors
光学精密工程. 2015, 23(5): 1474–1483 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1474>

基于旋转投影二进制描述符的空间目标位姿估计

Spacetarget pose estimation based on binary rotational projection histogram
光学精密工程. 2017, 25(11): 2958–2967 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172511.2958>

改进的视角鲁棒KAZE特征匹配算法

Improved KAZE feature matching algorithm with viewpoint change robustness
光学精密工程. 2016, 24(3): 616–625 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162403.0616>

文章编号 1004-924X(2020)04-0963-10

基于 SURF 特征描述符和杰卡德距离的文物碎片拼接

刘晓宁,狄宏璋*,杨 稳,林芃樾,王世雄
(西北大学 信息科学与技术学院,陕西 西安 710127)

摘要:针对文物碎片拼接过程中存在因局部碎片缺失和纹饰几何特征受损导致断裂面特征提取不准确的问题,本文提出了一种基于 SURF 特征描述符和杰卡德距离(Jaccard Distance)的文物碎片拼接方法。首先用 Canny 算子提取碎片边缘轮廓线以及模型表面纹饰线条,再通过构造多尺度空间来提取断裂面特征点。其次,针对以往构建特征描述符存在的高冗余和欧氏距离计算存在的高延时问题,本文提出构造低冗余的 SURF 特征描述符,再借助 Jaccard 距离来进行特征点的相似性比较,确定碎片最优邻接关系。最后采用 ICP 方法计算得到刚体变化参数,实现碎片较准确拼合。实验结果表明:本文算法运行时间提高了 12%~16%,拼接误差不超过 0.750 mm。与传统方法相比,本文方法能有效地减少因碎片模型受损而造成的拼接缝隙过大、渗透等现象,拼合误差较小,高效地实现碎片拼接。

关键词:碎片拼接;特征提取;SURF 特征描述子;边缘提取;刚体变化

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202804.0963

Mosaic of cultural relics fragments based on SURF feature extraction descriptor and Jaccard distance

LIU Xiao-ning, DI Hong-zhang*, YANG Wen, LIN Peng-yue, WANG Shi-xiong

(College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

* Corresponding author, E-mail: 664981714@qq.com

Abstract: The feature extraction of a fracture surface is inaccurate due to the lack of local fragments and damage of the geometric features of ornamentation. Thus, in this paper, a method was proposed to solve this problem based on SURF feature descriptor and Jaccard distance. First, Canny operator was used to extract the contour lines of the debris edges and model surface, and a multi-scale space was constructed to extract the feature points of the fault surface. Second, to solve the high redundancy in constructing feature descriptors and high delay in Euclidean distance calculation, SURF feature descriptors with low redundancy was constructed, and then compared the similarity of feature points with Jaccard distance to determine the optimal adjacency relationship of fragments. Finally, the parameters of rigid body were calculated by ICP method, and the fragments were assembled accurately. The experimental results showed that the running time of the algorithm increased by 12%-16%, and the splicing error was at most 0.750 mm. Compared to the traditional method, the proposed method

收稿日期:2019-12-02;修订日期:2019-12-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61731015);陕西省教育厅科研专项资助项目(No. 2013JK1180)

can effectively reduce the considerably large splicing gap and penetration caused by the damage of the fragment model, as well as the splicing error, and achieve fragment splicing efficiently.

Key words: fragment splicing; feature extraction; Speeded Up Robust Features (SURF) descriptor; edge extraction; rigid body change

1 引言

破碎文物的拼接在文物虚拟复原工作中的意义不言而喻,它是虚拟复原中至为关键的一步。由于信息技术的不断更新,文物的数字化虚拟拼接也不断有新的突破。目前文物的虚拟拼接技术大致可以分为断裂面受损和断裂面完整两种。

对于断裂面完整类文物,一般是采用基于断裂面轮廓线以及模型表面几何纹饰特征来进行匹配。比如刘军等^[1]提出一种将断裂面几何特征与轮廓线特征相融合的拼接方法。袁洁^[2]通过定义表面约束点来提取断裂面上的特征点,实现交互式文物拼接。赵夫群等^[3]通过计算最长公共子序列实现断裂面的细匹配,从而确定其邻接关系。Schmid C 等^[4]提出一种高效的三维轮廓曲线来实现文物的拼接。

对于断裂面受损类文物,一般是断裂面厚度出发,提取出鲁棒性能较好的断裂面显著特征来实现拼接。比如李珊珊^[5]提出基于表面邻接约束并借助于领域专家先验知识的交互式文物拼接。袁洁等^[6]提出基于 Morse-smale 拓扑特征的文物拼接算法,通过 Morse-smale 复形理论来构建断裂面的几何四边形拓扑图,计算 4 个顶点到基准面的高度差来构建拓扑图的特征描述符,来实现相似性检索。

目前现有的文物拼接算法,对于局部碎片缺失、数据量大的碎片模型,拼合效果不是特别的准确。因此,本文基于 SURF (Speeded Up Robust Features) 特征描述符和 Jaccard 距离来实现文物的精准拼接。首先采用 Canny 边缘检测算子^[7-10]提取出文物模型周围的边沿线和表面几何纹饰线条,作为下一步特征提取的基础。其次,通过构造多尺度空间,在模型边缘线表面上提取出特征点,对其构造一系列具有强鲁棒性更显著的 SURF 特征点描述符^[11-18]。然后,用 Jaccard 距离^[19-22]计算特征点集相似度并筛选最优匹配点集,确定其邻接关系。最后,采用 ICP (Iterative Closest Point) 算

法^[23]多次迭代计算出刚体变化的参数,从而实现碎片拼接。实验表明在保证较精确拼接的同时,本文方法具有高效率、低冗余、强鲁棒等特点。

2 Canny 边缘检测

2.1 边缘检测

对于三维模型来说,边缘是最直观、最能体现其几何纹饰信息的一种表示。Canny 边缘检测满足以下要求:(1)检测出来的边缘线是基于人的视觉感受;(2)提取出来的边缘线不会影响模型表面的纹饰特征;(3)边缘线较细,并且无缝连接,不会出现局部断开。所以本文用 Canny 算子提取碎片模型边缘线。

2.2 高斯滤波平滑图像

首先,进行模型预处理操作,消除噪声等因素对文物边缘线检测产生的影响。高斯滤波器计算如公式(1):

$$H_{ij} = \frac{1}{2\epsilon^2} \exp\left(-\frac{(i - (k+2))^2 + (j - (k+2))^2}{2\epsilon^2}\right), \quad i \leq 2k+1, j \leq 2k+1, \quad (1)$$

然后要与 8 邻域像素矩阵做卷积运算,为了计算的高效性与实效性,故令 $k=1, \epsilon=1.2$, 经过数据归一化后的高斯滤波器 \mathbf{H} 如公式(2)所示:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1021 & 0.0698 & 0.1143 \\ 0.1236 & 0.0124 & 0.0369 \\ 0.6641 & 0.2341 & 0.1011 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

设模型中某一点像素值为 e , 其 8 邻域像素值矩阵为 \mathbf{B} 。将其与 3×3 的高斯滤波器模板的中心位置对齐从而进行卷积操作,即将该像素点 8 邻域乘积权值叠加,作为该点高斯模糊后的亮度值 w 。则有:

$$w = \mathbf{H} * \mathbf{B} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} =$$

$$sum \begin{bmatrix} a \times h_{11} & b \times h_{12} & c \times h_{13} \\ d \times h_{21} & e \times h_{22} & f \times h_{23} \\ g \times h_{31} & h \times h_{32} & i \times h_{33} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.3 边缘梯度检测

由于碎片原始模型大多纹理丰富、特征复杂,若在其上直接提取特征点会导致特征点集不够泛化,无法更进一步匹配。因此,用 Canny 算子检测出其水平、垂直以及斜对角线方向的边缘线。Canny 算子 x 方向和 y 方向的 3×3 模板分别为:

$$C_x = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_y = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

梯度计算公式如式(5)所示, H 代表计算得到的梯度值, θ 代表其梯度方向。

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right). \quad (5)$$

2.4 边缘线生成

生成的边缘线要最大程度反应碎片的边缘信息和表面纹饰特征,即先进一步缩小范围确定当前局部区域内最优点,对任一像素点 P ,若其梯度值大于我们设定的高阈值,则认为 P 为强边缘像素,将其保留并纳入边缘像素点集合 $M = \{m_i | i=1, 2, 3, \dots, n\}$ 。若其梯度值大于低阈值并且小于高阈值,则认为其为弱边缘像素,再去观察其 8 邻接像素点梯度值,若存在梯度值大于高阈值的像素,则将其也纳入到边缘像素点集合 M 里,否则将其删除。若任一像素点的梯度值小于低阈值,则直接将其删除。其伪代码描述如下:

```
Algorithm: Progress of picking up four-element pixel
1 Input: P: One of a pixel;
2   Hthreshold: high threshold;
3   Lthreshold: low threshold;
4 Output: P is edge pixel or not;
5 if P > hthreshold then
6   P must be on edge
7 end if
8 else if P > Lthreshold and P > Hthreshold then
9   for each  $\sum p'$  do
10    if  $p' > Hthreshold$  then
11      P must be an edge
```

12	break
13	end if
14	end for
15	end if
16	else
17	P must be renamed

其中, P 代表当前像素点, $Hthreshold = 0.8$, $Lthreshold = 0.4$ 分别为设定的高低阈值,它是通过多次实验计算得出,当高阈值与低阈值的比值为 2 : 1 时,提取出的边缘线效果更优。

该算法提取的模型边缘线更加符合人类视觉观感,可以清晰的表示模型表面几何纹饰特征以及边缘轮廓信息,为下一步碎片特征点提取打下了良好的基础,如图 1 所示分别 C2-4-065, C2-4-064, C2-4-033 号碎片模型及其对应的边缘线图。

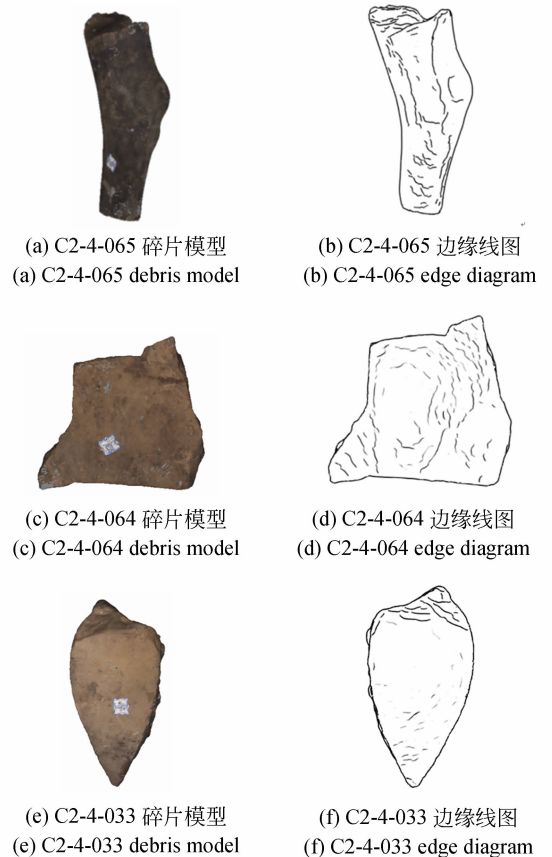


图 1 模型边缘线提取

Fig. 1 Model edge line extraction

3 特征提取

提取碎片显著特征点大都是通过曲率、极大值及极小值的计算来确定。本文结合以往先验知识,通过构造多尺度空间使提取出来的特征点更加泛化,具有一般性。其主要步骤如下:

Step 1. 构造多尺度空间。为了更进一步缩小特征点的范围,使 ϵ 分别取值为 1.1、1.3、1.4,得到的高斯滤波器分别为 h_1 、 h_2 和 h_3 ,如公式(6)所示。将高斯滤波器与碎片模型卷积操作会得到不同尺度空间下的模型。

$$\begin{aligned} h_1 &= \begin{bmatrix} 0.1134 & 0.1876 & 0.1401 \\ 0.1432 & 0.1309 & 0.2141 \\ 0.3141 & 0.1098 & 0.1935 \end{bmatrix} \\ h_2 &= \begin{bmatrix} 0.1361 & 0.1010 & 0.0231 \\ 0.9021 & 0.7890 & 0.1021 \\ 0.3101 & 0.2103 & 0.1204 \end{bmatrix} \\ h_3 &= \begin{bmatrix} 0.3141 & 0.1072 & 0.3091 \\ 0.2108 & 0.2061 & 0.1031 \\ 0.1381 & 0.4726 & 0.9002 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Step 2. 空间特征点检测。为了保证关键点的尺度不变性以及高鲁棒性,需要对模型邻域和尺度空间邻域点进行大小比较。如下图所示,取中间的检测点 p 和其邻域 8 个点进行大小比较。在其尺度空间内,和其上下邻域共 18 个检测点进行大小比较。若检测点 p 在其邻域和空间邻域内是最大值或最小值,就认为点 p 为候选特征点。

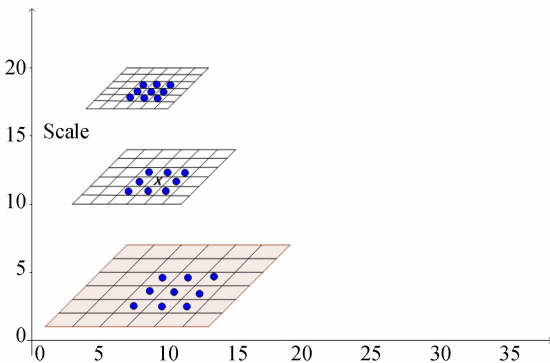


图 2 不同尺度空间的图像

Fig. 2 Images in different scale spaces

Step 3. 特征点精确定位。Step2 中得到的特征点其实是属于多尺度空间中候选特征点,其具有不稳定性与发散性,并不一定是真实的特征点。还需要对其进行曲线拟合来使其线性化,精确的确定特征点的位置,剔除掉低分辨率的特征点,增强匹配的稳定性与完整性。

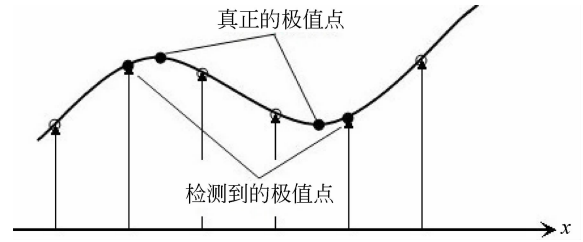


图 3 特征点定位

Fig. 3 Feature point positioning

这里曲线拟合函数的展开式为:

$$D(x) = D + \frac{\partial D^T}{\partial x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} x. \quad (7)$$

对其求导取 0,得到:

$$\hat{x} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial x^2} \frac{\partial D}{\partial x}. \quad (8)$$

将该值代入展开式里得到:

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \hat{x}. \quad (9)$$

若 $D(\hat{x}) \geq 0.03$,将该特征点 x 保存下来,否则删除掉。

4 构建 SURF 特征描述符

构建特征描述符大都以断面特征点为基础,这样如果提取的特征点存在误差,也会导致特征描述符失真。本文基于 SURF 特征描述符的鲁棒性与一般性,构建出不仅包括该特征点的相关信息,还会包含其邻域范围内有较强光谱映射的特征点信息的 SURF 特征描述符。

如图 4 中心红点 Q 为所选择的特征点,以 Q 为中心点结合直方图映射构造一个 4×4 模板,在这个模板内每一小块都认为是点 Q 的一个邻域生长点(彩图见期刊电子版)。箭头方向表示每个邻域生长点的 8 个梯度方向。再用卷积核与每一块进行卷积加权运算,可得到每个邻域生长点的

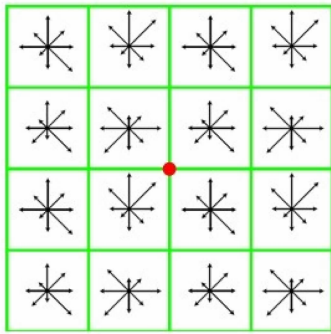


图 4 构建特征描述符

Fig. 4 Construct feature description factor

8 个梯度描述符。故对于任一特征点 Q 来说,其特征描述符可以用 $4 \times 4 \times 8$ 维的梯度描述向量 W 来表示, $W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{128})$ 。在对其进行归一化得到 $L = (l_1, l_2, \dots, l_{128})$ 。归一化公式如式(10):

$$l_j = \frac{\omega_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{128} \omega_j}}, (j = 1, 2, \dots, 128). \quad (10)$$

5 相似性匹配

由于碎片模型拓扑特征的复杂性以及特征点的多维度特性,若用欧氏距离计算特征点集的匹配关系,其运算结果时间复杂度会特别的高并且会存在一定的误差。基于此,为了对待拼接文物碎片断裂面及模型表面纹饰特征点的相似型进行精确检测,本文采用 Jaccard 距离来构造最优特征点匹配集合,从而确定其邻接关系,大大提高了匹配检测的效率。其步骤如下:

Step 1. 构建 Jaccard 系数 ∂ 。设碎片 S_A 和碎片 S_B 的特征点集合分别为 A 和 B :

$$\begin{aligned} A &= \{A_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \\ B &= \{B_j \mid j = 1, 2, \dots, k\} \\ \partial &= \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中: \cap 表示特征点集合 A 与 B 的交集, \cup 表示特征点集合 A 与 B 的并集。

Step 2. 构建 Jaccard 距离 d 。其公式为:

$$d = \left| \frac{\sqrt{(A_i - B_j)^2}}{\sum_{j=1}^k \sqrt{(A_i - B_j)^2}} \right|. \quad (12)$$

对碎片 S_A 中任一特征点 A_i , 遍历碎片 S_B 的特征点集合 B , 若存在特征点 B_j 满足 Jaccard 距离 $d(A_i, B_j) < \partial$, 则将 $\langle A_i, B_j \rangle (j = 1, 2, \dots, n)$ 纳入匹配集合 Q 内。此时还不是最优, 因为在 B 中会存在多个特征点。所以需要遍历匹配集合 Q , 找出满足 Jaccard 距离最小的特征点 B_j , 从而构成最佳匹配组 $\langle A_i, B_j \rangle$ 。

6 刚体拼合

经过上述操作, 已经得到了待拼接碎片间最优匹配特征点集合 $H = \{\langle S_{A^i}, S_{B^j} \rangle \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 。这一步主要是将位于不同坐标系下的特征点集, 转化为同一坐标系下, 来完成文物碎片的准确拼接。本文采用 ICP 算法来求解旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 从而实现碎片模型的刚体变化。主要步骤如下:

Step 1: 从最优匹配特征点集合中任意选取两组不共线的特征点对 $\langle S_{A^j}, S_{B^j} \rangle \langle S_{A^k}, S_{B^k} \rangle (j, k \in [1, n], j \neq k)$ 。利用 ICP 算法计算出旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 将其保存在刚体变化数组 $V[m]$ 中。

Step 2: 经过上述操作得到 m 个刚体变化参数, 则刚体变化数组记为 $V[m] = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 其中 $v[i] = \{(R^i, T^i) \mid i \in [0, m]\}$ 。

Step 3: 遍历刚体变化数组 $V[m]$, 将其代入目标函数求解。则求解最优变化参数 R 和 T 就可以转化为求满足目标函数 W 最小值的最优解问题。

$$W(R, T) = \min \sum_{i=1}^n \sqrt{(R \cdot S_{A^i} + T - S_{B^i})^2}. \quad (13)$$

Step 4: 求解得到最优参数 R 和 T , 完成碎片的精确拼接。

7 实验结果及分析

本实验采用 Visual C++ 和 Open CV 编程, 在 Intel i7-6700k CPU/4.0 GHz, 32 G 内存的 PC 机上实现。以 1 号坑的 C2-4 号 121 块右骏马碎片模型作为实验数据。



图 5 C2-4 号右驂马发掘现场图
Fig. 5 Excavation site of No. C2-4

7.1 重组实验结果

图 5 所示为采用本文算法对 c2-4 号右驂马碎片重组后的效果图,分别为右视图、左视图、正视图及其对应的边缘线图与提取出的三维特征点云图。拼合时间如表 1 所示,其中 n 表示碎片块数, t_1 表示提取模型边缘线所需的时间, t_2 表示确定碎片及周边碎片的几何邻接关系所需的时间, t_3 表示碎片重组拼接需要的时间。

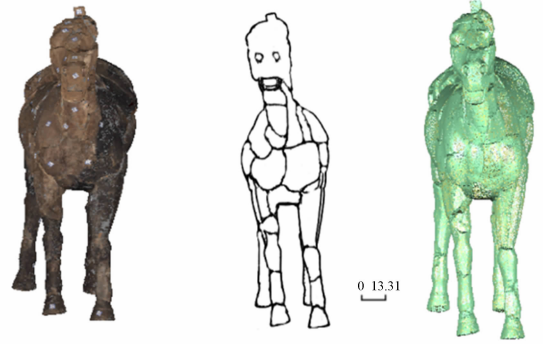
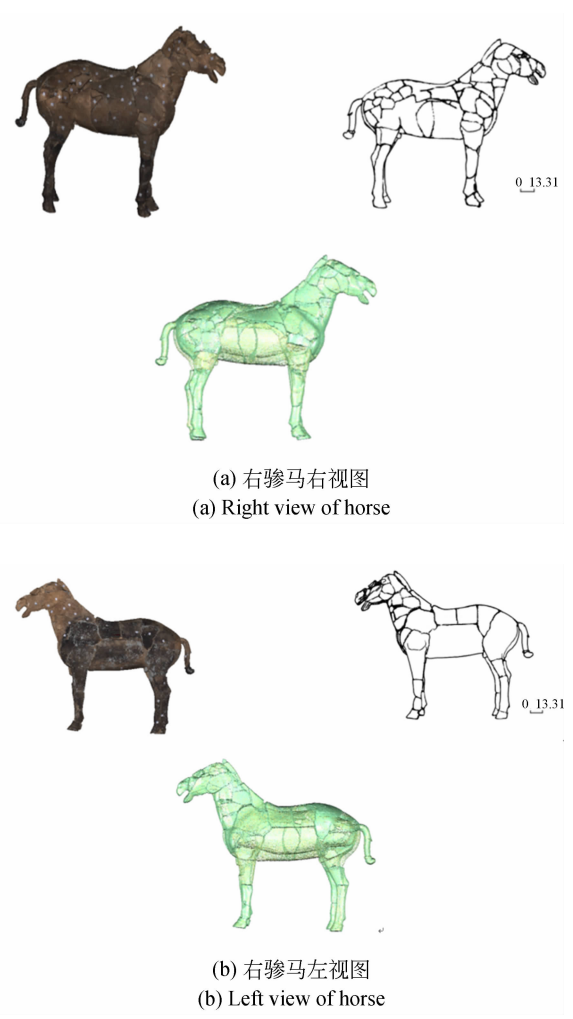


图 6 右驂马三视图
Fig. 6 Three views of horse

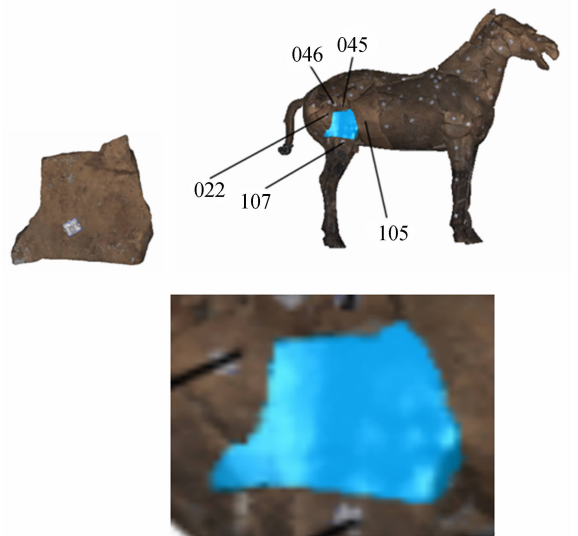
表 1 右驂马拼接所需时间

Tab. 1 Splicing time required for horse

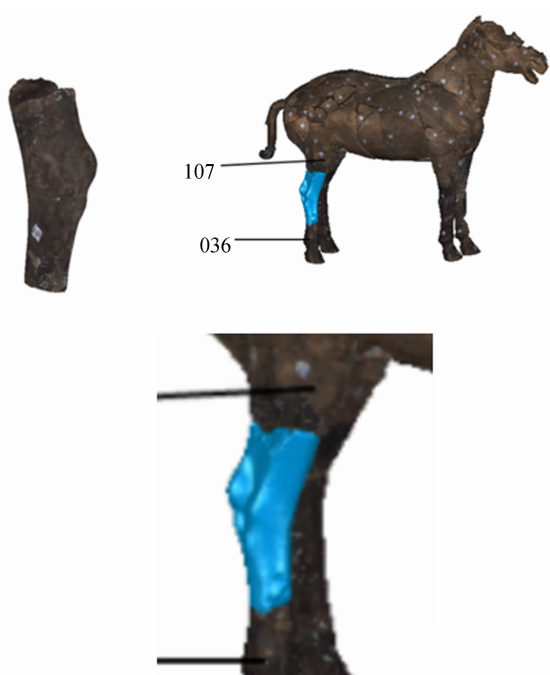
n	$t1/s$	$t2/s$	$t3/s$
121	70.346	57.442	23.212

7.2 局部拼接实验结果

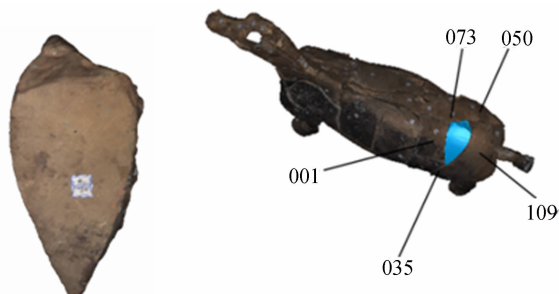
图 6 所示分别为 C2-4-064, C2-4-063 和 C2-4-033 号碎片及其拼接关系图,其位置如图蓝色标注处(彩图见期刊电子版),直线标明的是其周边邻接碎片的位置。可以看到即使存在部分断裂面受损的碎片,采用本文方法也能较准确地定位出其邻接位置,取得较好的拼合效果。



(a) C2-4-064 号碎片拼接图
(a) C2-4-064 fragment splicing drawing



(b) C2-4-065 号碎片拼接图
(b) C2-4-065 fragment splicing drawing



(c) C2-4-033 号碎片拼接图
(c) C2-4-033 fragment splicing drawing

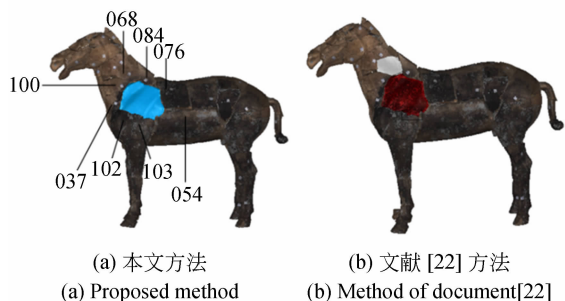
图 7 拼接关系图

Fig. 7 Splicing diagram

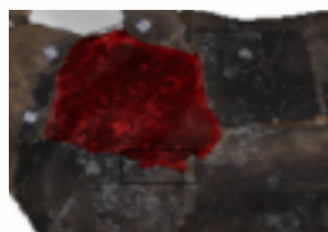
7.3 对比实验结果

图 7(a)为采用本文方法对 C2-4-18(蓝色标注处)号碎片进行拼接的效果。图 7(b)为用文献[22]方法的拼接效果图(红色标注处,彩图见期刊

电子版),可以看到其几何特征无法正确的反映出其邻接关系,呈现出浸透现象,如黑色方框所标注。



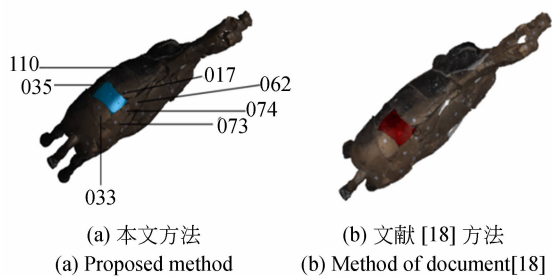
(a) 本文方法
(a) Proposed method
(b) 文献 [22] 方法
(b) Method of document[22]



(c) 文献 [22] 方法出现浸透
(c) Infiltration occurs in the method of document [22]

图 8 C2-4-18 号碎片拼接效果图

Fig. 8 No. C2-4-18 effect drawing of fragment splicing



(a) 本文方法
(a) Proposed method
(b) 文献 [18] 方法
(b) Method of document[18]



(c) 文献 [18] 方法出现较大缝隙
(c) Larger gap occurs in the method of document [18]

图 9 C2-4-13 号碎片拼接效果图

Fig. 9 No. C2-4-13 effect drawing of fragment splicing

图 8(a)为采用本文方法对 C2-4-13 号碎片(蓝色标注处)进行拼接的效果。图 8(b)为用文献[18]方法的拼接效果图(红色标注处,彩图见期刊电子版),可以看到存在明显的缝隙过大现象,如黑色圆圈标注处所示。

表 2 所示为本文算法与文献[18]、文献[22]算法的运行时间和拼合误差对比,拼合误差为邻接碎片断裂面轮廓线上特征点集间的欧式距离之和的平均值。本文算法的运行时间与文献[18]相比提高了 16%,与文献[22]相比提高了 12%。拼合误差相对于文献[18]和文献[22]来说更小,不超过 0.750 mm,拼合效果更准确,适用于断裂面受损的碎片拼接。

表 2 运行时间与拼合误差对比

Tab. 2 Comparison of running time and assembling error

	运行时间/s	拼合误差/mm
本文	151	0.741
文献[18]	181	0.904
文献[22]	173	0.835

参考文献:

- [1] 刘军,周明全,耿国华,等.基于轮廓与断面匹配的秦俑碎片拼接方法[J].计算机工程,2014,40(1):181-185,190.
LIU J, ZHOU M Q, GENG G H, *et al.*. The splicing method of Qin Figurine fragments based on contour and section matching[J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(1):181-185, 190. (in Chinese)
- [2] 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.
YUAN J, ZHOU M Q, GENG G H, *et al.*. Heritage debris splicing algorithm based on contour line two-way distance field[J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(6):207-212, 218. (in Chinese)
- [3] 赵夫群,周明全,耿国华.基于轮廓曲线和特征区域的秦俑碎片匹配算法[J].北京理工大学学报,2018,38(3):293-299.
ZHAO F Q, ZHOU M Q, GENG G H. Terracotta

8 结 论

本文主要针对文物多碎片拼接过程中出现的局部碎片缺失、纹饰几何特征点受损而不能准确提取断裂面纹饰特征等严重问题,提出基于 SURF 特征描述符和 Jaccard 距离的碎片拼接方法。先用 Canny 算子提取出碎片模型中能够表示其几何纹饰特征的边缘线,从而进一步简化其几何模型。再构造多 Scale 空间来提取碎片模型断裂面的特征点,构建 SURF 特征描述子。利用特征点集间的邻接几何特性,不同于欧式距离计算的高复杂度与低时性,本文用 Jaccard 距离计算特征点集相似度。实验结果表明,本文方法使得拼合误差减少到 0.750 mm 内,算法运行时间与文献[18]和文献[22]相比分别提高了 12%和 16%,可以有效地减少因断裂面破损而造成的拼接缝隙过大、出现渗透等现象。

由于构建特征描述符的维数比较大,因此寻找更加鲁棒、高效的特征描述符将是下一步着重研究方向。

- warrior blocks matching algorithm based on contour curve and feature region[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 38(3): 293-299. (in Chinese)
- [4] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Comparison of Aff-Ine-Invariant Local Detectors and Descriptor-S [C]. *12th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2004)*, 2004:1729-1732.
- [5] 李姗姗,耿国华,周明全,等.基于表面邻接约束的交互式文物碎片重组[J].计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(6):924-931.
LI SH SH, GENG G H, ZHOU M Q, *et al.*. Interactive reassembly of fractured fragments based on surface adjacency constraint[J]. *Journal of computer aided design and graphics*, 2016, 28(6): 924-931. (in Chinese)
- [6] 袁洁,周明全,耿国华,等.基于 Morse-Smale 拓扑特征的文物碎片拼接算法[J].自动化学报,2018,44(8):1486-1498.
YUAN J, ZHOU M Q, GENG G H, *et al.*. Auto-

- matic reassembly of fractured fragments using Morse topological features [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(8): 1486-1495. (in Chinese)
- [7] SHENGLAN LIU, MUXIN SUN, XIAODONG HUANG, *et al.*. Feature fusion using Extended Jaccard Graph and word embedding for robot [J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(3):278-284.
- [8] AYOUB K, AHMED D E M, MOHAMMED E H. A novel statistical model for content-based stereo image retrieval in the complex wavelet domain [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50:27-39.
- [9] 李群辉,周明全,耿国华. 基于积分不变量的断裂面匹配算法 [J]. *计算机工程*, 2012, 38(2):1000-3428. LI Q H, ZHOU M Q, GENG G H. Fracture surface matching algorithm based on integral invariants [J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(2):1000-3428. (in Chinese)
- [10] ZHAO Y, ZHAI Y, DUBOIS E, *et al.*. Image matching algorithm based on SIFT using color and exposure information [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 27(3): 691-699.
- [11] MAMMONE N, IERACITANO C, ADELI H, *et al.*. Permutation jaccard distance-based hierarchical clustering to estimate eeg network density modifications in mci subjects [J]. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2018: 5122-5135.
- [12] 王凡. 基于 sift 的图像检索特征改进方法 [J]. *数字技术与应用*, 2016(1):139-141. WANG F. Image retrieval feature improvement method based on SIFT [J]. *Numerical Technology & Applications*, 2016(1):139-141. (in Chinese)
- [13] BARG M C, MANGUM A J. A phase separation problem and geodesic disks on Cassinian oval surfaces [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 354:192-205.
- [14] IWAHORI Y, TAKADA Y, SHIINA T, *et al.*. Defect classification of electronic board using dense SIFT and CNN [J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 126:1673-1682.
- [15] CHANG X, DU S, LI Y, *et al.*. A coarse-to-fine geometric scale-invariant feature transform for large size high resolution satellite image registration [J]. *Sensors*, 2018, 18(5):1-16.
- [16] 樊彦国,柴江龙,许明明,等. 基于 ORB 与 RANSAC 融合改进的图像配准 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3):702-717. PAN Y G, CHAI J L, XU M M, *et al.*. Image registration based on fusion of orb and RANSAC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3):702-717.
- [17] MENG Y, ZHANG Z, YIN H, *et al.*. Automatic detection of particle size distribution by image analysis based on local adaptive canny edge detection and modified circular Hough transform [J]. *Micron*, 2018, 106:34-41.
- [18] 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. ZHOU M Q, YUAN J, GENG G H, *et al.*. Interactive mosaic of cultural relics based on contour feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6):1597-1606. (in Chinese)
- [19] LI A, JIANG W, YUAN W, *et al.*. An improved FAST + SURF fast matching algorithm [J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 107:306-312.
- [20] MENG C, CHEN Z, YANG H, *et al.*. Effect of strain rate and temperature on fracture and microstructure evolution of AZ91D magnesium alloy processed by laser surface melting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2018:1-13
- [21] RAFAEL B T, JOSE M J, JAVIER P F, *et al.*. Complex Gaussian processes for regression [J]. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2018:5449-5511.
- [22] 高宏娟,耿国华,王飘. 基于关键点特征描述子的三维文物碎片重组 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2019, 31(3):393-399. GAO H J, GENG G H, WANG P. Reconstruction of 3D cultural relic fragments based on key point feature descriptors [J]. *Journal of computer aided design and graphics*, 2019, 31(3):393-399. (in Chinese)
- [23] 肖启阳,李健,吴思进,等. 基于能量的 DSPI 相位

图正余弦降噪[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(4): 936-943.

XIAO Q Y, LI J, WU S J, *et al.*. Noise reduction

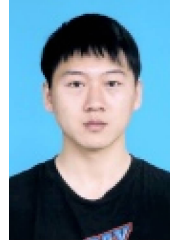
of positive and cosine of DSPI phase diagram based on energy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4):936-943. (in Chinese)

导师简介:



刘晓宁(1978—),女,陕西眉县人,副教授,硕士生导师,2000年,2003年,2006年于西北大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机器学习,图像处理,三维点云数据处理研究。E-mail: xnliu@nwu.edu.cn

通讯作者:



狄宏璋(1996—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,2018年于安康学院获得学士学位,主要从事计算机图像处理与可视化技术方面研究。E-mail:664981714@qq.com