

基于表面纹理特征定义的碎片拼接方法

王飘**, 耿国华*, 张雨禾

西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127

摘要 在陶制文物的虚拟复原过程中, 由于其本身质地、环境及人为因素等影响, 文物碎片易受损缺失, 基于断裂部位几何信息的传统拼接方法存在一定局限性。针对断裂部位缺损的陶制文物碎片, 提出一种结合碎片表面纹理特征及断裂边界轮廓线的拼接方法: 利用曲率确定潜在脊点, 并用最小二乘法拟合, 提取碎片表面纹理特征线; 结合纹理形状边长及顶点角度信息进行纹元分析, 构造破损纹理约束条件, 实现初步匹配; 将断裂边界轮廓角点集中的相邻两点连接为弦, 形成轮廓线弦长序列描述子, 对轮廓线位置信息进行约束, 得到最终匹配对。结果表明, 此算法能实现断裂部位缺损陶制文物碎片的拼接, 对具有显著纹理特征的碎片拼接具有一定的优越性。

关键词 图像处理; 碎片拼接; 纹理拼接; 轮廓线匹配; 多特征约束

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081012

Fragment Splicing Method Based on Surface Texture Characteristic

Wang Piao**, Geng Guohua*, Zhang Yuhe

School of Information Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China

Abstract In the process of restoration of ceramic artifacts, the fractured site is easy to be damaged due to its own characteristics, the environment, and man-made factors. The traditional stitching method based on geometric information of fracture location has some limitations. We propose a method of splicing of fractured sites combined with surface texture and boundary contour for the restoration of fragments of ceramic artifacts. Firstly, the potential ridge points are determined by the curvature and the least squares method is used to extract the texture features of the debris surface. Then, the texture elements are combined with the edge length and the vertex angle information to construct damaged texture constraints and realize preliminary matching. Two adjacent points in the boundary set of the contours are concatenated to form the contour chord sequence descriptor, and the contour position information is constrained to obtain the final matching pair. The results show that the proposed algorithm can achieve the splicing of broken artifact fragments, and it has certain advantages for the debris with obvious texture features.

Key words image processing; fragment splicing; texture stitching; contours matching; multi-characteristic constraints

OCIS codes 100.3010; 100.2000

1 引言

在文物数字化复原过程中, 瓷制、陶制等文物由于其本身精细且易碎, 传统的手工复原和拼合存在诸多问题。以秦始皇陵兵马俑为例, 出土的兵俑和马俑体积大, 且碎片数量众多, 人工复原面临着搬运移动不便、难以维持原貌和保证不二次伤害等问题。

计算机辅助虚拟复原能够有效避免人为因素的干扰, 不受时间和空间的限制, 可高效安全地完成文物复原。因此, 虚拟复原方法的研究极为重要。

对于破损物体的虚拟复原技术研究, 可以从二维图像开始, 再进行三维复原。Zhang 等^[1]针对破碎的二维图像重组问题提出了基于图的优化算法, 在初步匹配时利用碎片边界轮廓线进行几何簇两两

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-06; 录用日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61731015)、国家自然科学基金面上项目(61673319, 61373117)、国家自然科学基金青年基金(61602380)、陕西省自然科学基金(2018JM6029)

* E-mail: ghgeng@nwu.edu.cn; ** E-mail: wendywp@126.com

匹配,再通过全局搜索进行多块匹配,建立优化重组框架;杨飒等^[2]针对医学图像配准问题,提出基于多项式矩阵尺度不变特征变换(SIFT)方法,对传统SIFT方法做了改进;涂春萍等^[3]提出一种基于Harris角点特征的图像拼接算法,通过计算待匹配图像的Harris角点集和各个角点邻域的Hu距特征,获得相似程度,并以此归一化和融合。

在以轮廓线为主要特征的三维破碎物体修复研究中,Ucoluk等^[4]通过对三维物体破损轮廓封闭曲线进行特征矢量的计算和排列,用特征矢量数组来表示每一段破碎片边界,根据数组中特征量找到两段曲线中的匹配部分,再通过二维相似矩阵进一步确定匹配部分的起止点,该方法为后续轮廓线特征化提供了方向;Cohen等^[5]对陶瓷碎片进行三维扫描并建立模型,利用碎片表面高斯曲率提取轮廓线,以此与领域专家先验知识建立的通用模型进行校准,通过校准误差评估重建结果,其本质也是通过轮廓线的匹配对应来进行重建,但此方法依托于通用模型,若通用模型发生变化,其匹配结果也会随之变化;李珊珊等^[6]通过交互确定初始匹配位置,再利用初始位置和邻接约束条件获取匹配点集,由线段约束得出最优集;郭萌等^[7]针对陶瓷碗缺陷的重建问题,提出了基于多图像局部点云的方法;Arbace等^[8]则是利用三维数字化技术将圣母雕像的复原过程进行了记录和说明,对复原过程中需要的三维模型的支撑结构进行数字化及色彩处理,但该文章着重于整个复原过程,并未对各部分所采用的方法进行详细描述。

利用断裂面特征进行碎片拼接也是一种有效的方法,Huang等^[9]提出利用积分不变量计算断裂面的凹凸性,以此作为匹配特征进行初步两两匹配和最后的多块匹配,该方法为之后以断裂面为特征的匹配方法提供了参考;Winkelbach等^[10]提出利用簇树的层次结构对三维破碎物体断裂部位的导向点进行逐层分解,为破损实体匹配提供了新的思路,但该方法不适用于缺损严重的三维实体匹配;李群辉等^[11]提出以断裂面轮廓为特征的匹配方法,在碎块棱边分割出断裂面及边界曲线,用角点矩阵和Hausdorff距离进行初始轮廓线匹配,最终用断裂面拼合检测匹配结果;周蓬勃等^[12]计算多尺度下的积分不变量,根据断裂面凹凸性质进行初始簇匹配,再利用特征不变量的最近点迭代(ICPIF)方法进行精确匹配;刘军等^[13]将轮廓线与断裂面两个特征相结合,对于轮廓线采用多边形弧公共串匹配法,对断

裂面采用多尺度积分不变量方法进行混合匹配;赵夫群等^[14]提出基于特征点序列的断裂面匹配方法。

在现有的基于几何特征驱动的破损文物复原技术中,最常见的是基于断裂线和断裂面特征的拼接方法,这两类方法通常依赖于断裂部位的完整性,对符合适用条件的对象可以取得良好效果。然而,对于断裂部位粗糙且存在缺损的文物碎片,其轮廓线或断裂面无法完全贴合导致断裂部位几何特征无法精确匹配,现有方法往往容易失效。表面具有明显几何纹理信息的文物实体的破损碎片具有一定的纹理结构,纹理的完整程度体现了文物实体的缺损与否。因此,本文重点利用纹理这一强约束特征以实现虚拟复原拼接。

针对单特征碎片匹配依赖性大的问题及断裂面缺损等影响因素,通过结合文物碎片上的纹理和断裂边界轮廓信息来进行拼接,可以避免单一特征的限制性,从而获得相对合理可靠的拼接结果。

首先,通过计算表面各个点的曲率得到潜在脊点,用最小二乘法拟合提取三维物体的表面纹理特征线,计算纹元边长及顶点角度,结合边角数据分析纹理特征;其次,根据已得出的完整纹理特征数据判断破损的非完整纹理,由破损纹理中边的完整性计算和分析匹配约束规则,然后根据约束规则对破损纹理进行初步拼合;最后,针对断裂部位的边界轮廓线,将轮廓角点集合中相邻两点连接为弦,形成弦长序列描述子,并进行最长公共子串匹配比较,完成二次约束的匹配判定。

2 方法综述

在陶制文物碎片虚拟复原过程中,首先利用三维激光扫描仪扫描碎片,形成计算机可以处理的三维数据,在三维模型中进一步进行特征提取和分析,算法流程如图1所示。

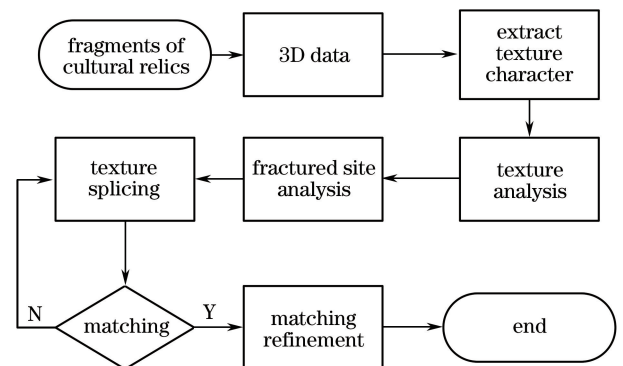


图1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

2.1 特征线提取

对扫描得到的三维数据,通过生成谷脊线的方法提取其特征,得到纹理信息。谷脊点的概念最初由 Judd 等^[15]提出,空间中主视方向上主曲率的最大值点定义为脊点,最小值点定义为谷点,然后由曲面上与视相关曲率 k 变化的极值轨迹和方向来确定谷脊线。曲率是几何体不平坦程度的一种衡量,三维碎片模型表面纹理具有凹凸性,带有

纹理特征的部位其曲率值相比其他部位存在差异,如图 2(a)所示。因此,根据曲率值来确定特征点序列,能够清晰地显示三维物体上的特征信息。根据文献[16]的方法,先计算曲面上每个点的主曲率,并将主曲率绝对值较大的点标注为谷脊潜在点,再利用最小二乘法拟合谷脊特征线,最后进行平滑处理。原始碎片模型和相应的谷脊线如图 2(b)和图 2(c)所示。

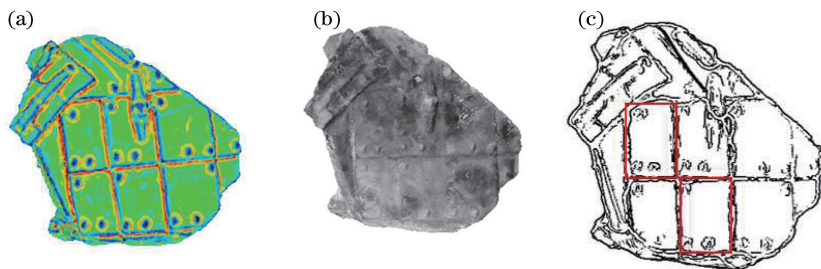


图 2 碎片模型与谷脊线。(a)表面曲率图;(b)原始碎片模型;(c)谷脊线

Fig. 2 Debris models and ridge lines. (a) Surface curvature; (b) original debris model; (c) ridge lines

2.2 纹理分析与相关定义

通过观察得知,由于每个碎片断裂部位(图 3)都有若干条边,直接对碎片进行纹理拼接尝试,需要对其所有边界进行匹配,等同于穷举所有可能的拼接方向和拼接边界,这将极大地增加计算量,降低算法效率。因此,在针对纹理进行匹配处理时,首先对纹理进行分析,提取纹理基元的特征。

2.2.1 纹元分析

首先,本文定义碎片表面重复性的单位纹理为纹元,从提取出的谷脊线信息可以看出,纹元为四边形。对空间中两点 $x(x_1, x_2, \dots, x_n), y(y_1, y_2, \dots, y_n)$,其欧氏距离为 $d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$ 。选取纹元边上 3 个顶点坐标 $A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2), C(x_3, y_3, z_3)$,可以得到空间向量 \mathbf{AB}, \mathbf{BC} ,利用向量积计算两向量之间角度为

$$\theta = \arccos \frac{\mathbf{AB} \cdot \mathbf{BC}}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{BC}|} \quad (1)$$

根据纹元边界的欧氏距离值以及 4 个顶点角度,可以得到纹元呈现的规则图像为矩形,即两对边分别相等,相邻长与宽不一定相等,4 个顶点角均为直角。碎片断裂边的长度测量值为 e ,将其分别与矩形纹元中的长度 a_1 和宽度 a_2 进行比较,判定 e 为破损或非破损边,其判定流程如图 4 所示。

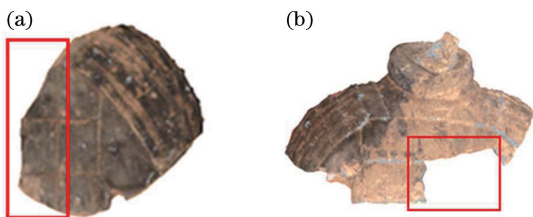


图 3 断裂部位

Fig. 3 Fractured parts

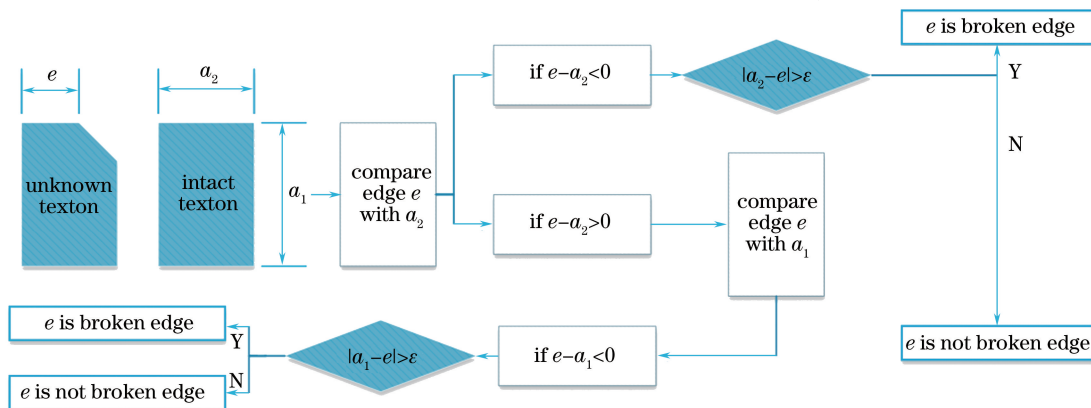


图 4 判断破损纹元示意图

Fig. 4 Judgement chart of broken fragments

2.2.2 断裂弦

由破损碎片形态可知,具体的断裂轮廓存在多种实际情况,为了简化后续分类过程,也避免过多的实际轮廓线对简洁分类的影响,本文在纹理分类时忽略多种断裂曲线轮廓,以纹元断裂处两点间弦长定义为断裂弦,将断裂分割转化为以断裂弦来统一的完整性度量标准,如图5所示。



图5 以断裂弦为标准简化分类不规则断裂处
Fig. 5 Simplified classification of the irregular fault by broken string

2.2.3 完整性度量及分类

对于判定出的破损纹理块,根据其存在的非破损边的个数来度量,即在破损的纹理块中,将边长值 e 与纹元边长 $a_i (i=1, 2)$ 相等的边的个数定义为边的完整性度量 E_c 。具体分类如表1所示。

表1 断裂情况分类

Table 1 Fracture classification

Fractured texture	E_c	Fractured texture	E_c
	2		1
	2		1
	2		0

根据表1可以得到:

$$E_c \begin{cases} = 4, & \text{complete texture} \\ < 4, & \text{broken texture} \end{cases} \quad (2)$$

在以 E_c 为分类根据的基础上,按照破损部分边的个数进一步分类,定义为碎片类型,表示为 $N(kv)$,其中 k 表示 E_c 的值, v 表示破碎部分边的个数,如 $N(25)$,表示 E_c 为2,边数为5的破损块,如表2所示。

表2 破损纹理类型

Table 2 Types of broken texture

Fractured texture	E_c	Number of edges	$N(kv)$	Fractured texture	E_c	Number of edges	$N(kv)$
	2	5	$N(25)$		1	4	$N(14)$
	2	4	$N(24)$		1	3	$N(13)$
	2	3	$N(23)$		0	3	$N(03)$

由表2所示的破损纹理边数分类可以得到不同的破损类型,根据对不同类型的破碎片的定义,可以为下一步的纹理匹配约束规则做出规范处理,便于分析匹配对碎片之间边的互补规律。

2.3 纹元匹配规则

根据不同的纹理破碎片,通过计算推演理想情况下的匹配规则。

- 1) 对每一个碎片 b ,其 $N(\cdot)$ 值包含所有边个数 v ,完整边个数 k ,由于 v 中包含了一条断裂边,因此除去断裂边,每个碎片 b 中的边个数为 $v-1$ 。
- 2) 已知完整边个数为 k ,则不完整边个数为

$$v-1-k。$$

3) 完整边个数为4,已有 k 条完整边,总共剩余待匹配边数为 $4-k$ 。

4) 总共需要匹配边数 $4-k$,已有不完整边数 $v-1-k$,还需要完整边的个数为 $4-k-(v-1-k)$,即 $5-v$ 。

5) 寻找的匹配块总边数为 $v-1-k+5-v+1$ (断裂边),即 $5-k$ 。

6) 综上,对一个碎片 b ,根据其 $N(kv)$ 值,可以得到能与之匹配的另一片碎片的 $N(k'v')$ 值,其对应关系为 $k'=5-v, v'=5-k$ 。

在匹配过程中,用 $P_{N_j}^{N_i}$ 来表示两块碎片的匹配情况,上标和下标分别表示可以匹配的两个碎片类型,如 P_{13}^{24} 表示块 $N(24)$ 与 $N(13)$ 存在匹配的可能。根据其破损形状信息来分析初步纹理匹配的可能性。

为了分析纹理匹配情况,避免多次计算冗余,提出权值度 W 的概念,用来体现匹配情况的优先选择级别。从匹配性分析中可以看出, E_c 的值越大,说明破损的边数越少,趋于完整性纹理的程度越大,匹配程度越高,优先选择此种匹配方式的概率越大,因此权值度 W 就会越大。进一步得出,在 E_c 值相同的情况下, $N(kv)$ 的值越大,趋于完整性纹理的程度越大,匹配概率越大,权值度也会越大。由此,根据 E_c 和 $N(kv)$ 的值,得出这几种碎片分类拼合的权值度 W 的大小。由表 3 中的拼接情况,可以得到 $W_1 > W_2 > W_3 > W_4$ 。

表 3 匹配情况

Table 3 Matching classification

$P_{N_j}^{N_i}$	$N(kv)$	$N(k'v')$	Result	W
P_{03}^{25}				W_1
P_{13}^{24}				W_2
P_{23}^{23}				W_3
P_{14}^{14}				W_4

3 计算过程

3.1 初始化位置

参照匹配规则进行匹配,由于碎片的位置可以任意旋转,不利于统一化处理。因此需要将两块碎片的方位进行调整。以纹元水平线为基准,通过旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} ,调整断裂弦所在的位置,使其相对位置为一个朝下、一个朝上。变换矩阵如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ a & b & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 θ 为旋转角度, a 、 b 为平移单位量。

综合两种变换,得到变换矩阵 $\mathbf{S} = \mathbf{R} \times \mathbf{T}$,将两块碎片位置进行统一。

3.2 边界轮廓线约束

在得到由纹理形状匹配的结果后,为进一步获得精确匹配结果,将碎片断裂部位纹理边界轮廓线进行约束。表面纹理结构是本算法的核心特征,在对碎片断裂轮廓的匹配选择上也侧重于带有纹理的断裂边界。因此,为突出纹理边界特征,将边界轮廓进行图像边缘提取,计算边缘上的每个像素点的曲率,以局部极大值作为角点。得到碎片角点集合之后,受文献[17]方法的启发,化点为线,将边界线上的点集转化为弦长序列。给定待匹配轮廓线角点集合 $C_1 = \{m_1, m_2, \dots, m_{t+1}\}$, $C_2 = \{n_1, n_2, \dots, n_{s+1}\}$,相邻两点连接为弦,用欧氏距离计算弦长,可得到弦长序列 $X_1 = \{h_1, h_2, \dots, h_t\}$, $X_2 = \{l_1, l_2, \dots, l_s\}$ 。对于点集转化成的弦长序列,根据文献[18]中基于邻域的最长公共子串方法,利用弦长序列计算两边界的匹配程度。

如图 6 所示,由角点集合得到的弦长序列 X_1 和 X_2 ,比较其中的元素,若两元素的差值小于阈值 τ ,即认为元素 h_i 和 l_j ($i=1, 2, \dots, t; j=1, 2, \dots, s$) 近似相等,取两元素均值作为公共子串序列 D 的元素。待比较序列遍历完之后,计算 D 中的元素个数,记为 q 。

对于匹配的结果度量,记 $\mu = \min\{t, s\}$, $\omega = \max\{t, s\}$,两序列长度之比 $r_{st} = \frac{\mu}{\omega}$,计算 $r_c = \frac{q}{\omega}$ 。若 $\|r_{st} - r_c\| \leq \tau^+$,即认为两序列匹配,否则,判定为不匹配。匹配度定义为 $s_c = \frac{r_c}{r_{st}}$,可得 $0 \leq s_c \leq 1$ 。

3.3 方法步骤

1) 提取碎片边界破损纹元,计算其 E_c 和 $N(kv)$ 值,根据权值度进行排序。

2) 选取当前权值度较大的匹配对,若两碎片拼接部位有明显重叠或空白,匹配失败,继续选择其他碎片,重复此步骤;否则转至下一步。

3) 当前的纹理拼合上,判断此碎片所在的其他纹理是否具有明显重叠或空白,若有,匹配失败,重复上一步;若无,转至下一步。

4) 利用公共子序列计算两碎片的断裂轮廓线是否匹配,若是,匹配完成;若不是,转至步骤 2)。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

选择秦始皇陵 K9901 号坑出土的兵马俑碎片

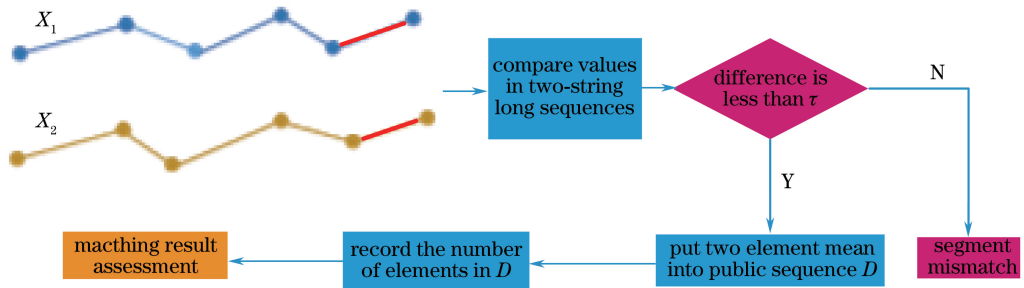


图6 弦长序列比较示意图

Fig. 6 Diagram of chord sequence comparison

为对象,因其为陶制质地,且在挖掘过程中有原始破损或其他原因导致的断裂部位几何信息缺失,是利用计算机虚拟复原的合适数据样本对象。本文使用 Visual Studio 2015 和 Open GL 进行编程,在 Intel Core i7-6700CPU/3.41 GHz, 内存 8.0 GB 的 PC 机上完成。

4.1.1 参数设置

根据已由先验知识判别出的碎片进行多次测量,记录完整与破损纹理边的长度与宽度值,计算均值与标准差。在每个碎片边长的测量中,边长值取

$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} (i=1, 2; j=1, 2, \dots, n)$, 用于判定的边长值取 $\bar{\mu} = \frac{1}{N} \bar{a}_i$, N 为碎片数量, 标准差 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\bar{a}_i^k - \bar{\mu})^2}$, \bar{a}_i^k 为第 k 个碎片的边长值。以 $\epsilon = \sigma$ 作为判断破损纹理的阈值, 表 4 为部分碎片的其中 5 次测量结果。由于秦俑碎片表面铠甲有不同程度的覆盖和衔接部位, 因此部分表面纹理边长有明显差异, 综合计算各个不同部位的边长, 取 $\epsilon = 7.824$ 。

表4 边长测量值

Table 4 Measured values of edges

mm

Parameter	No.	First	Second	Third	Fourth	Fifth	Mean
		measurement	measurement	measurement	measurement	measurement	
Width	1#	53.166	49.245	50.206	51.081	52.178	51.175
	2#	55.129	52.609	54.606	57.075	56.463	55.176
	3#	69.272	69.331	67.624	65.752	61.705	66.736
	4#	61.290	58.973	57.368	62.544	62.745	60.584
Length	1#	85.674	83.147	85.803	81.492	79.681	83.159
	2#	82.05	84.855	83.587	83.04	84.947	83.695
	3#	73.357	75.139	72.965	71.786	70.966	72.842
	4#	69.335	71.377	69.770	72.205	74.759	71.489

在对边界线弦长序列的约束中,判断匹配阈值 $\tau = 1.275$ 。根据匹配结果度量算法的实验测量计算,取其中部分数据,得到其对比差 $\|r_{st} - r_c\|$ 的值和匹配度 s_c 的值变化关系,如图 7 所示。对比差越小,匹配度越高,综合多样本数据,得到最终阈值的取值 $\tau^+ = 0.356$ 。

4.1.2 实验结果

针对选取的实验数据碎片提取纹理谷脊线,由断裂部位纹理缺失类型进行匹配约束,得到不同编号的拼接结果如图 8~10 所示。

4.2 对比分析

4.2.1 参数对比

本文方法对断裂部位存在几何缺损严重但具有

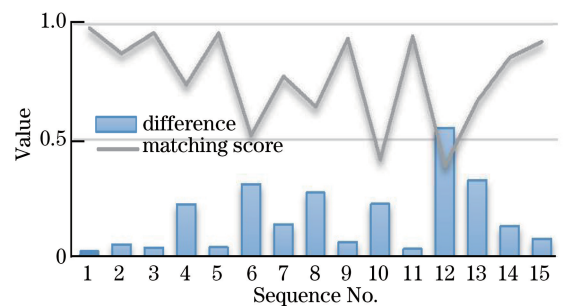


图7 参数变化关系

Fig. 7 Parameter variation relationship

表面纹理的碎片拼合效果较好。纹理特征越强,约束规则就更有准确性和针对性。在进行匹配约束时,权值度 W 不同,得到的成功匹配次数和情况也



图 8 G10-78 号部分碎片拼合结果。(a) #33 与 #34 碎片谷脊线图;(b) #33 与 #34 碎片三维模型;
(c) #33 与 #34 碎片拼合结果

Fig. 8 Splicing results of some fragments of G10-78. (a) Ridge lines of fragment #33 and #34;
(b) 3D models of fragment #33 and #34; (c) splicing results of fragment #33 and #34



图 9 G10-78 部分碎片拼合结果。(a) #5 与 #15 碎片谷脊线图;(b) #5 与 #15 碎片三维模型;
(c) #5 与 #15 碎片拼合结果

Fig. 9 Splicing results of some fragments of G10-78. (a) Ridge lines of fragment #5 and #15;
(b) 3D models of fragment #5 and #15; (c) splicing results of fragment #5 and #15



图 10 G10-26 部分碎片拼合结果。(a) #25 与 #30 碎片谷脊线图;(b) #25 与 #30 碎片三维模型;
(c) #25 与 #30 碎片拼合结果

Fig. 10 Splicing results of some fragments of G10-26. (a) Ridge lines of fragment #25 and #30;
(b) 3D models of fragment #25 and #30; (c) splicing results of fragment #25 and #30

会不同。由图 11 可知,对不同的数据组,不同的权值度 W 所进行的配对迭代次数也呈现差异,当 W 较大时,选择次数就会相对较少。

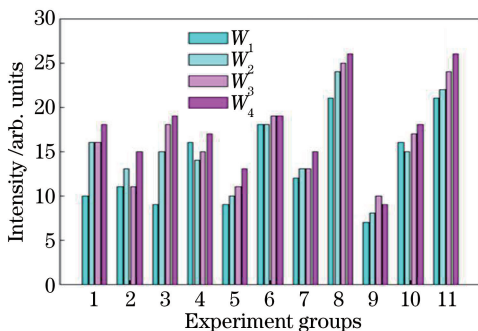


图 11 权值度与迭代次数

Fig. 11 Weight and iterations

4.2.2 实验对比

将本文与文献[11]中基于断裂面的拼接方法结

果进行比较,如图 12 所示,直接根据断裂面凹凸性进行匹配拼接,拼接结果的表面纹理出现明显的不连续和错位,无法准确判断拼接结果的正确性。从碎片的点云模型中,可以进一步看出其断裂面匹配的情况下,表面纹饰呈现错位现象,且碎片间出现了较严重的渗透,根据本文方法提取出的谷脊线进行的纹理拼合可以得到良好的修复效果。

将本文方法与文献[11]方法的运行时间进行比较,结果如表 5 所示。 T_1 和 s_c 分别为本文方法的运行时间与匹配度, T_2 为文献[11]方法的运行时间。结果表明,本文方法的运行时间优于文献[11]的方法,且本文算法的匹配度比较稳定。

5 结 论

通过提取陶制文物碎片三维模型表面纹理,结合纹理特征与断裂边界轮廓线实现碎片两两之间的

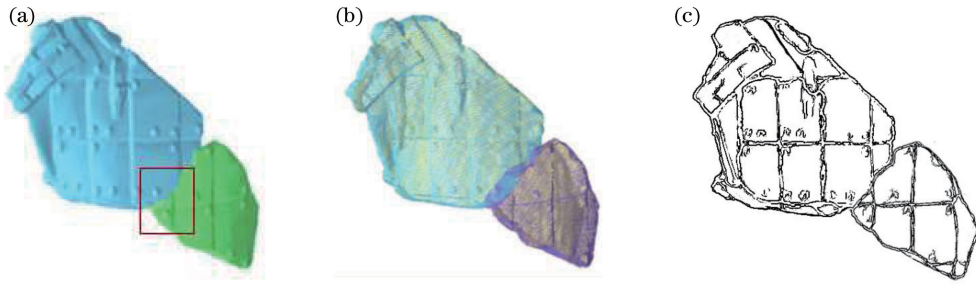


图 12 结果对比。(a)文献[11]方法的拼合结果;(b)文献[11]方法拼合结果的点云模型;(c)本文方法的拼合结果
Fig. 12 Comparison of results. (a) Splicing result of method in Ref. [11]; (b) point cloud model of splicing result of method in Ref. [11]; splicing result of proposed method

表 5 运行时间及适用性对比

Table 5 Comparison of running time and suitability

No.	Time /s		Matching score
	T_1	T_2	s_c
G10-78	10.7684	11.8745	0.9636
G10-26	12.4531	13.1087	0.9427
G10-67	14.8542	15.8141	0.7851
G10-36	13.6925	15.1063	0.8524

匹配。所用方法是先提取碎片显示特征的谷脊线;再将纹理信息的基本单元进行分类和定义,通过不同类别的纹理组合来构造拼接约束规则,判断组合权值度,以此避免穷举和随机选择带来的迭代冗余,提高效率;最后根据断裂边界弦长描述子,运用求公共子串的方法进行断裂边界线的二次匹配约束。在匹配阈值范围内得到的匹配度均大于0.5,匹配度值比较稳定。

本文方法是基于碎片表面纹理特征,因此对于表面纹理特征显著的碎片拼接效果良好,但无法适用于表面磨损严重或不具有纹饰的碎片。寻找更具普适性的特征描述符,结合多种稳健性约束是下一步的研究重点和方向。

参 考 文 献

- [1] Zhang K, Li X. A graph-based optimization algorithm for fragmented image reassembly [J]. *Graphics Models*, 2014, 76: 484-495.
- [2] Yang S, Xia M H, Zheng Z S. Medical image registration algorithm based on polynomial deterministic matrix and SIFT transform [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081002. 杨飒, 夏明华, 郑志硕. 基于多项式确定性矩阵的 SIFT 医学图像配准算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081002.
- [3] Tu C P, Chai Y H, Li G L, *et al.* An image mosaic method based on refined corner points feature

matching [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2011, 30(10): 40-43.

涂春萍, 柴亚辉, 李广丽, 等. 一种基于 Harris 角点特征精确匹配的图像拼接方法 [J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(10): 40-43.

- [4] Ucoluk G, Toroslu I H. Automatic reconstruction of broken 3D surface objects [J]. *Technical Section*, 1999, 23(4): 573-582.
- [5] Cohen F, Liu Z, Ezgi T. Virtual reconstruction of archeological vessels using expert priors and intrinsic differential geometry information [J]. *Computers & Graphics*, 2013, 37(1-2): 41-53.
- [6] Li S S, Geng G H, Zhou M Q, *et al.* Interactive reassembly of fractured fragments based on surface adjacency constraint [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(6): 924-931. 李珊珊, 耿国华, 周成全, 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.
- [7] Guo M, Hu L L, Li J. Local point cloud reconstruction of ceramic-bowl-surface defect based on multi-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.
- [8] Arbae L, Sonnino E, Callieri M, *et al.* Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 14(4): 332-345.
- [9] Huang Q X, Flory S, Gelfand N, *et al.* Reassembling fractured objects by geometric matching [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 569-578.
- [10] Winkelbach S, Wahl F M. Pairwise matching of 3D fragments using cluster trees [J]. *International*

- Journal of Computer Vision, 2008, 78(1): 1-13.
- [11] Li Q H, Zhang J Z, Geng G H, *et al.* Fracture surfaces matching based on contour curve[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(9): 105-110. 李群辉, 张俊祖, 耿国华, 等. 以轮廓曲线为特征的断裂面匹配[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 105-110.
- [12] Zhou P B, Li J J N, Shui W Y. Virtual restoration of broken artifacts based on fracture surface[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 2176-2179. 周蓬勃, 李姬俊男, 税午阳. 基于断裂面匹配的破碎文物的虚拟修复方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 2176-2179.
- [13] Liu J, Zhou M Q, Geng G H, *et al.* Fragments splicing method for terra-cotta figures of Qin Dynasty based on contours and fracture surfaces matching[J]. Computer Engineering, 2014, 40(1): 181-185. 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.
- [14] Zhao F Q, Geng G H. Fracture surface matching method of terracotta based on feature points [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041005. 赵夫群, 耿国华. 基于特征点的秦俑断裂面匹配方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041005.
- [15] Judd T, Durand F, Adelson E. Apparent ridges for line drawing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 19.
- [16] Pang X F, Pang M Y, Xiao C X. An algorithm for extracting and enhancing valley-ridge features from point sets[J]. Acta Automatic Sinica, 2010, 36(8): 1073-1083. 庞旭芳, 庞明勇, 肖春霞. 点云模型谷脊特征的提取与增强算法[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1073-1083.
- [17] Wang D J. The research on pieces of bronze relics virtual stitching technology and geometric feature extraction[D]. Taiyuan: North University of China, 2017: 18-24. 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: 18-24.
- [18] Grabowski S. A note on the longest common substring with k-mismatches problem [J]. Information Processing Letters, 2015, 115(6/7/8): 640-642.