

基于轮廓线双向距离场的文物碎片拼接算法

袁 洁¹, 周明全^{1,2}, 耿国华¹, 张雨禾¹

(1. 西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710127; 2. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘 要: 在文物碎片自动拼接中, 由于断裂部位受损造成几何特征缺失, 传统基于几何驱动拼接算法难以拼合。为此, 提出一种基于断裂部位轮廓线双向距离场的文物碎片自动拼接算法。通过提取文物碎片表面的显示脊线, 从而得到碎片的纹饰特征, 采用最小逼近误差法提取表面纹饰轮廓上的特征点, 依据顶点曲度值获取断裂面特征点, 构建碎片断裂面轮廓线至表面特征点和断裂面特征点的双向距离场, 引入欧式距离一致性和凹凸互补性的约束, 构造特征描述符, 定义匹配度函数获取特征点匹配对集合, 使用四元数算法计算刚体变换矩阵, 以迭代最近点法实现精确拼合。实验结果表明, 与传统断裂面拼接算法相比, 该算法能节省拼合时间, 且拼合误差较小。

关键词: 距离场; 显示脊线; 最小逼近误差法; 四元数; 迭代最近点

中文引用格式: 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.

英文引用格式: YUAN Jie, ZHOU Mingquan, GENG Guohua, et al. Heritage debris splicing algorithm based on contour line two-way distance field[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 207-212, 218.

Heritage Debris Splicing Algorithm Based on Contour Line Two-way Distance Field

YUAN Jie¹, ZHOU Mingquan^{1,2}, GENG Guohua¹, ZHANG Yuhe¹

(1. College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

[Abstract] In the automatic reassembly of cultural fragments, because of the loss of the geometric characteristics caused by the damage of the fractured faces, an automatic reassembly algorithm based on the two-way distance field of the break-curves is proposed. Through the extraction of apparent ridges of fragments surface, so as to get the sculpture structure, using the minimum approximation error method to extract feature points on the contour surface decoration, on the basis of the vertex curvature value acquiring feature points of fractured faces, construction of bidirectional distance field fracture profile feature points to the surface and fracture surface feature points, the introduction of Euclidean distance from the consistency and complementarity of convex constraints, structuring feature descriptors, defining matching degree function to obtain the feature points matching set, and using quaternions algorithm to calculate the rigid transform matrix, the iterative closest point method to achieve accurate registration. Experimental results show that compared with the traditional splicing algorithm, the algorithm can save reassembly time and reduce the errors.

[Key words] distance field; display ridge line; minimum approximation error method; quaternion; iterative nearest point

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046520

0 概述

虚拟复原问题是计算机图形学、模式识别、可视化技术等众多领域里一个颇具挑战的问题。20 世纪末, 随着计算机技术的快速发展, 将计算机技术引入到文物碎片的虚拟拼接过程中, 提高了文物复原的

效率, 对文物保护和复原至今有着重要的意义^[1]。根据文物的厚度信息, 自动化虚拟复原技术可大致分为 2 类: 薄壁类和非薄壁类文物碎片^[2]。针对可忽略文物厚度信息的薄壁类碎片, 主要采用基于空间轮廓曲线的拼接算法, 该类算法的代表性研究有文献^[3]基于碎片网格模型, 提取断裂面的内轮廓线

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61673319, 61373117)。

作者简介: 袁 洁(1992—), 女, 硕士研究生, 主研方向为计算机图形学、可视化技术、虚拟现实; 周明全, 教授; 耿国华, 教授、博士; 张雨禾, 博士研究生。

收稿日期: 2017-03-27 **修回日期:** 2017-05-19 **E-mail:** yuanjie4920@163.com

和外轮廓线,根据曲线的匹配程度,确定碎片间的拼合关系。文献[4]将轮廓曲线上顶点的曲率和挠率作为匹配的特征向量,然后通过特征串匹配的算法搜索匹配对。文献[5]基于动态规划的思想,对曲线上的顶点曲率进行编码,通过对比曲线的编码确定碎片之间的邻接关系。文献[6]通过定义曲线亲密度确定碎片的拼合关系,然后计算能量最小化实现碎片的拼合。针对具有一定厚度的非薄壁类刚体匹配,往往采用基于断裂面几何特征的匹配算法。文献[7]采用Z缓冲算法,得到碎片的断裂面投影,然后计算当前位置断裂区域的“位置误差”,最终实现碎片之间的最优匹配。该算法适用于雕塑、纪念碑等大体积破碎模型的修复。文献[8]采用随机采样的算法,利用顶点的法向和曲率等特征,实现碎片的拼合。文献[9]通过计算断裂面特征点体积积分不变量形成匹配约束簇,然后定义3类空间几何一致性约束,提出一种基于空间曲面特征优化的匹配算法。文献[10]利用顶点的积分不变量,实现对破碎文物的断裂面分割,然后基于条件约束的算法进行碎片的两两匹配。

鉴于兵马俑碎片断裂部位存在不同程度缺损,采用基于空间断裂曲面的拼合算法难以取得精确的拼接结果。因此,本文利用表面纹饰特征点和断裂面上显著的凹凸特征点,提出一种基于轮廓线双向距离场^[11]的自动化文物碎片拼接算法。

1 碎片特征提取

以碎片的网格模型为研究对象,特征提取问题即是删除元模型中的冗余点,保留尽可能少的点表示原模型的形状。首先,本文计算模型表面曲率变化最大值的点,从而提取碎片表面的纹饰特征和断裂部位轮廓线。然后通过最小逼近误差法^[12]提取纹饰结构特征点,再基于顶点曲度值,提取出断裂面特征点。

1.1 显示脊线提取

本文针对的是断裂部位受损严重但轮廓线较完整地兵马俑碎片拼合问题,因此,提取文物碎片模型表面的显示脊线,可准确地表示其断裂部位轮廓线和表面纹饰特征,为碎片拼合提供线索。

显示脊线的概念最早是在文献[13]提出,定义在视角范围内模型表面曲率变化达到局部最大值时点的轨迹为显示脊线。在传统的显示脊线提取过程中引入视相关的定义,从而得到显示脊线的提取算法,然后,以视相关的曲率变化为依据提取出三维模型表面的显示脊线。

本文定义三维模型 T 的二维投影屏幕为 V , p' 是点 $m \in T$ 和对应点 $m' \in V$ 之间的平行投影^[14]。首

先,计算三维模型 T 中每一个顶点的曲率值 S ; 然后,采用 p 的逆从而计算每个顶点的视相关曲率算子 $Q = SP^{-1}$, 由此,可获得每个顶点的视相关最大曲率 $q_1 = \max_{\|s\|=1} |Q(S)|$; 最后,计算 q_1 在主方向 t 上的导数,即 $D_t q_1$, 当 $D_t q_1 = 0$ 时,显示脊线即为该顶点所在的轨迹。采用该算法提取的模型纹饰特征更符合人类的视觉特性,可精确、高效地表示破碎文物的几何特征。针对几组兵马俑碎片模型采用视相关算法提取的显示脊线,结果如图1所示。

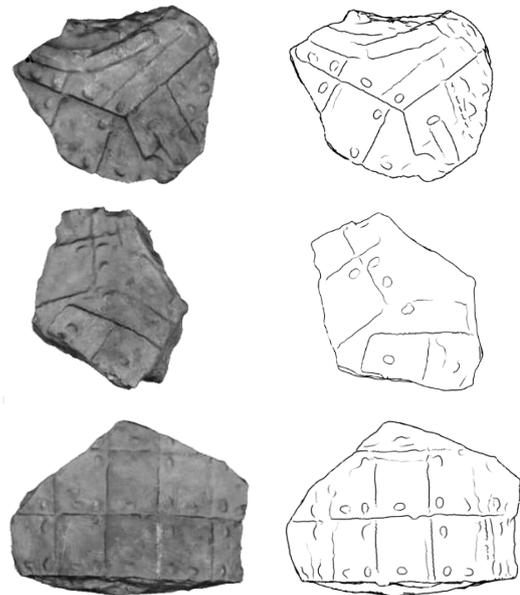


图1 显示脊线的提取结果

1.2 纹饰特征点提取

曲线特征点提取算法的衡量标准不仅包括时间与空间复杂度,同时,需要以最少的特征点数目最大程度地表示一个曲线的形状。本文采用基于最小逼近误差的多边形逼近特征点提取算法,提取碎片模型表面纹饰上的特征点集。

本文定义单边弧是指弧上所有点在弦的同一侧。设轮廓中一个子轮廓的起点为 P_0 , 终点为 P_N , 用 $P_0 P_N$ 表示子轮廓, 其弦 $\overrightarrow{P_0 P_N}$ 对于轮廓 $P_0 P_N$ 的逼近误差为 E_{P_0, P_N} , 依据其定义可表示为:

$$E_{P_0, P_N} = A = \sum_{i=1}^{N-1} |h_{i, P_0 P_N}| \quad (1)$$

其中, $h_{i, P_0 P_N}$ 为弧上点 P_i 到弦 $\overrightarrow{P_0 P_N}$ 的有向距离, $h_{j, P_0 P_N}$ 为弧上点 P_j 到弦 $\overrightarrow{P_k P_N}$ 的有向距离。

由图2可知,当 P_0, P_N 之间增加一个逼近点后,其逼近误差减小了 $\triangle P_0 P_k P_N$ 的面积:

$$E_{P_0, P_N} - E_{P_0, P_k, P_N} = \frac{1}{2} |\overrightarrow{P_0 P_N} \times \overrightarrow{P_0 P_k}| \quad (2)$$

其中, $E_{P_0, P_N} \geq 0, E_{P_0, P_k, P_N} \geq 0$ 并且 $E_{P_0, P_N} \geq E_{P_0, P_k, P_N}$

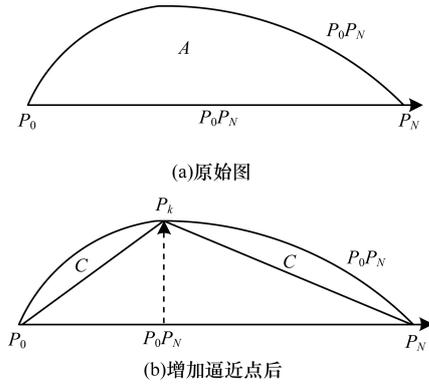


图 2 最小误差特征点

由式(3)可知:

$$E_{P_0, P_k, P_N} = E_{P_0, P_N} - \frac{1}{2} |\overrightarrow{P_0 P_N} \times \overrightarrow{P_0 P_k}| = E_{P_0, P_N} - \frac{1}{2} |h_{k, \overrightarrow{P_0 P_N}}| |\overrightarrow{P_0 P_k}| \quad (3)$$

要使 E_{P_0, P_k, P_N} 达到最小,需使 $|h_{k, \overrightarrow{P_0 P_N}}| |\overrightarrow{P_0 P_k}|$ 取得最大值,而若处于同一子轮廓中, $|\overrightarrow{P_0 P_k}|$ 值一定时,需使 $|h_{k, \overrightarrow{P_0 P_N}}|$ 取得最大值,当插入点 P_k 满足如下公式:

$$|h_{k, \overrightarrow{P_0 P_N}}| = \max_{i=1, 2, \dots, N-1} (|h_{i, \overrightarrow{P_0 P_N}}|) \quad (4)$$

逼近误差 E_{P_0, P_k, P_N} 得到最大限度的提高,因此,称 P_k 为弧 $P_0 P_N$ 的最小逼近误差特征点,最终获得碎片表面纹饰信息的特征点集。

1.3 断裂面特征点提取

针对断裂面上的特征点,本文依据最大最小主曲率信息,从而定义顶点的曲度值来提取断裂面上的显著特征点^[15]。定义顶点的 v 的曲度为:

$$C_v(r) = \sqrt{\frac{k_1^2 + k_2^2}{2}} \quad (5)$$

特征点的提取采用多尺度的曲度信息进行,定义尺度 r_k 为顶点 v 的 k 阶邻域的顶点个数,本文取 $k=1, 3, 5$ 。具体算法步骤如下:

步骤 1 对于碎片模型上的任意一个顶点 v ,计算并搜索其 $k=1, 3, 5$ 阶邻域点,如图 3 所示为目标点的一阶邻域点,分别以 k 阶邻域顶点进行曲面拟合,求出在尺度 r_k 下的最大最小主曲率。

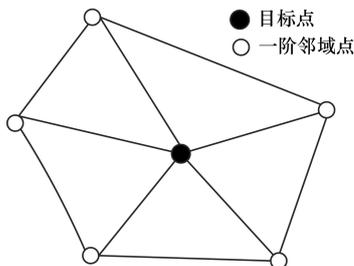


图 3 顶点 v 的邻域点

步骤 2 根据式(5)计算顶点 v 在 r_k 尺度下的曲度值 $C_v(r_k)$ 。

步骤 3 对于任意一个顶点 v ,若其在 r_k 尺度下的曲度值 $C_v(r_k)$ 均大于给定阈值 $T(r_k)$,则定义该顶点 v 为特征点。

2 特征点对集构造

以提取的碎片特征为基础,本文结合断裂部位轮廓线,以表示碎片表面纹饰结构的特征点和断裂面上表示凹凸信息的特征点分别向断裂轮廓线构建不同方向的距离场,其可有效地表示相邻碎片之间的位置关系,然后,引入欧式距离一致性和凹凸互补性约束,通过特征点匹配度函数确定特征点集合中的对应关系,筛选出特征点匹配对集合。

2.1 边界距离场

距离场^[11]是计算机图形学中的一种基本的图形表示模型,起初用在计算机图形学中体绘制和建立偏移表面。常用的距离场是一个标量场,它表示空间内任一点到给定的三维物体表面的最小距离。在数学和应用上无符号距离场定义为: $dist_{\Sigma}(x) = \inf_{p \in \Sigma} \|p - x\|$,它表示空间中一个点 x 到集合 Σ 中的最近点的距离。

在实际应用中更多的使用符号距离场,符号距离场是在无符号距离场的基础上加上正负号来表示点 x 在某几何体 A 的边界 ∂A 的内外,是区分点在物体对象的内部还是外部的标志。一般定义在封闭曲面 ∂A 内部的点的距离场符号为负,在 ∂A 外的点的距离场符号为正,因此,符号距离场定义为:

$$\varphi_A(x) = \text{sgn}(x) \inf_{a_x \in \partial A} \|a_x - x\| \quad a_0 = h_d \times f + n \quad (6)$$

其中, $\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & x \in A \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$ 。

本文结合表面纹饰信息特征点和断裂面特征点构造基于轮廓线的符号距离场,定义碎片模型表面的特征点属于模型外点,断裂面上的特征点定义为内部点。

首先,依据兵马俑碎片表面纹饰信息的连续性,定义碎片表面的非完整纹元是表示由于碎片断裂造成的不完整表面纹饰单元,如图 4 中的 A 和 B 所指区域所示。

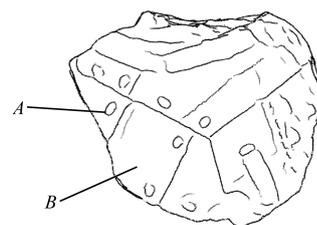


图 4 非完整纹饰单元

然后,计算断裂部位表面非完整纹元轮廓线上的特征点集 S ,到断裂部位轮廓线上的距离场为:

$$\text{dist}_+(t_i, d_i) = \{(t_1, d_1), (t_2, d_2), \dots, (t_n, d_n)\}$$

其中, t_i 是碎片 A 上断裂部位非完整纹元上的特征点, d_i 表示特征点 t_i 到断裂部位轮廓线上的最近距离,其距离值的符号表示碎片表面纹饰特征点为外部点。

最后,计算碎片模型断裂面上的特征点到断裂面外表面轮廓线的距离场,定义其为: $\text{dist}_-(t_i, d_i, \sigma_i) = \{(t_1, d_1, \sigma_1), (t_2, d_2, \sigma_2), \dots, (t_n, d_n, \sigma_n)\}$, $\sigma_i \in (0, 1)$ 。其中, t_i 是碎片 A 断裂面上的特征点, d_i 表示特征点 t_i 到断裂部位轮廓线上的最近距离,带符号的距离值 d_i 表示该特征点属于模型内部。 σ_i 表示该特征点的凹凸性,1 表示凸点,0 表示凹点。

2.2 匹配度测量

基于以上分析,为了确定特征点之间的对应关系,需对相邻碎片的边界距离场进行匹配度测量,从而获取特征点匹配对集合。

依据兵马俑碎片模型表面纹饰信息的连续性,本文在匹配度测量阶段引入欧氏距离一致性约束,求解邻接碎片间的匹配关系。本文定义欧氏距离一致性约束,即对于碎片 φ_A 和 φ_B 上的任意表面纹饰特征点 t_i 和 s_j ,其到边界轮廓线上的最近距离点分别为 p_i 和 q_j ,当匹配度函数满足式(7)时,则将该特征点对所对应的最近距离点 (p_i, q_i) 列入匹配点对集合 $L = \{(p_1, q_1), (p_2, q_2), \dots, (p_k, q_k)\}$, $k \leq \text{sum}(m, n)$ 中。

$$SP_+(t_i, t_j) = \frac{\| (d_i + d_j) - D \|}{D} < \varepsilon_d^+ \quad (7)$$

其中, D 为兵马俑碎片表面完整纹元的边长, ε_d^+ 为欧氏距离阈值。

针对断裂面上的特征点在轮廓线的距离场,设 (t_i, d_i, σ_i) 和 (t_j, d_j, σ_j) 分别为兵马俑碎片 φ_A 和 φ_B 断裂面上的任意特征点,若这 2 个特征点同时满足式(8)和式(9),则将该特征点对列入特征点匹配对集合 $L = \{(p_1, q_1), (p_2, q_2), \dots, (p_k, q_k)\}$, $k \leq \text{sum}(m, n)$ 中。

$$SP_-(t_i, t_j) = \frac{\| d_i - d_j \|}{d_i + d_j} < \varepsilon_d^- \quad (8)$$

$$\sigma_i \cdot \sigma_j = 0 \quad (9)$$

其中, ε_d^- 为距离阈值, d_i 与 d_j 分别为特征点 t_i 与 t_j 到边界轮廓线上的最近距离。如图 5 所示为相邻碎片间的特征点对关系。

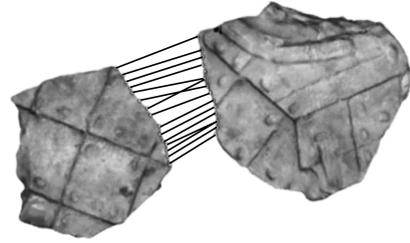


图5 特征点匹配对关系

3 碎片拼合

三维模型的虚拟拼合的实质是为了求取处于不同位置时的测量装置,其坐标系与基准坐标系之间的刚体转换矩阵。

针对上述获取的特征点匹配对集合 L ,计算出所有质心不在同一直线上的 3 个匹配点对,根据每一个质心坐标,采用四元数算法,计算出刚体转换矩阵,从而实现断裂面的粗匹配^[15]。四元数法最早是在文献[16]提出来的,其基本思想是用 2 组相对应的三维点集坐标,求解出其之间的刚体转换矩阵 R 和 T 。

设待拼合碎片 φ_A 和 φ_B 的特征点对匹配集 $L = \{(p_1, q_1), (p_2, q_2), \dots, (p_k, q_k)\}$, $k \leq \text{sum}(m, n)$,假设特征点匹配对 (p_i, q_i) ,向量 A 是由碎片 φ_B 上的特征点 q_i 经过旋转和平移得到的,如下:

$$B = RA + t \quad (10)$$

其中,列向量 B 由碎片 φ_A 上的特征点构成, R 为旋转矩阵, t 为平移向量。

已知特征点的坐标和对应关系,采用四元数法估计旋转平移矩阵,使得式(11)取得最小值,然后采用文献[15]中给出的迭代算法进行求解。

$$E = \sum_{i=1}^N \| (RA + t) - B \|^2 \quad (11)$$

在得到邻接碎片的初始位置后,然后采用迭代最近点算法 (Iterative Closest Point, ICP)^[15] 进行精确对齐,实现碎片正确拼合。

4 实验结果与分析

本文实验采用 Visual Studio 2010 和 OpenGL 编程,在 Intel Core i7-3770 CPU/3.4 GHz,4 GB 内存的 PC 机上实现。为检验本文算法的有效性,以兵马俑 1 号坑出土的部分兵马俑碎片网格模型为实验数据。实验阈值均是通过经验值以及数据统计获取的, $\varepsilon_d^- = 0.5 \text{ mm}$, $\varepsilon_d^+ = 0.5 \text{ mm}$ 。

4.1 本文算法结果

本文选取 G10-19 号俑、G10-26 号俑和 G10-24 号俑上部分邻接碎片,其断裂部位均存在不同程度的受损,采用本文算法进行碎片拼合,实验结果如图 6~图 8 所示。

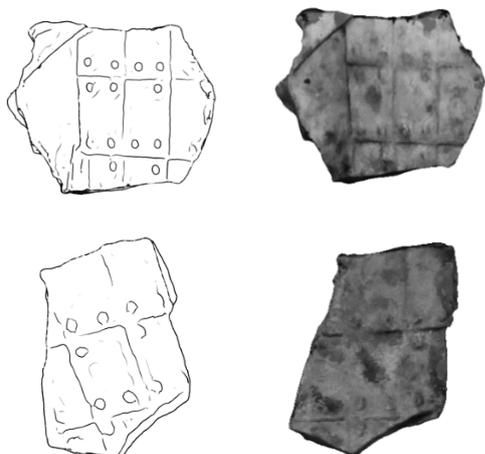


图 6 G10-19 号俑部分碎片拼合结果

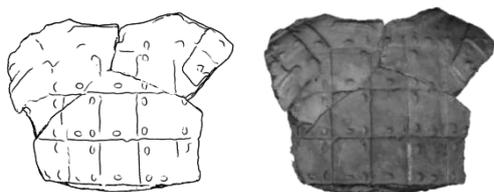


图 7 G10-26 号俑部分碎片拼合结果



图 8 G10-24 号俑部分碎片拼合结果

可以看出,本文算法在断裂面受损的碎片模型上可取得较好的拼接结果。图 9~图 11 所示为本文算法在一组整俑碎片模型上的拼接结果,如图 11 中原始兵马俑模型上矩形框标注的部分缺失的碎片,实验结果表明,本文算法在断裂部位受损的整俑模型上仍可取得较好的拼合结果。



(a)俑体正面

(b)俑体背面

图 9 G10-18 号俑拼合结果



(a)俑体正面

(b)俑体背面

图 10 G10-36 号俑拼合结果



(a)俑体正面

(b)俑体背面

图 11 G10-26 号俑拼合结果

本文选取 G10-18 号俑上断裂部位受损严重,表面纹饰模糊的碎片 G10-18-9 和 G10-18-13 为数据模型,采用本文算法进行虚拟拼接,实验结果如图 12 所示。图 12 中碎片 G10-18-13 由于断裂部位边缘受损严重,并且碎片表面纹饰信息模糊,导致边界轮廓的距离场计算不准确,无法完整有效地表示碎片断裂部位信息,导致碎片拼接结果出现缝隙过大的不准确拼合现象,如图 12 所示。实验结果表明,本文算法针对断裂部位轮廓缺损严重的碎片难以取得较好的拼合结果。

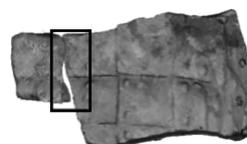
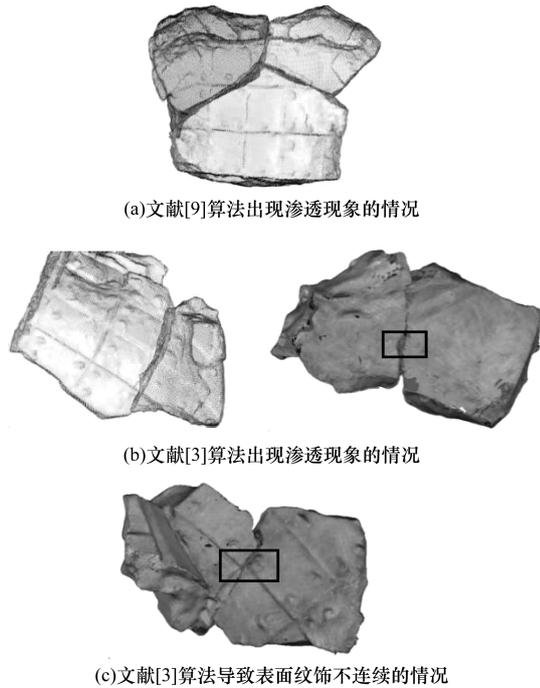


图 12 缺失严重碎片拼合结果

4.2 实验结果对比

图 13 所示分别为采用基于断裂部位轮廓线的匹配算法^[3]和基于断裂面几何特征的算法^[9]进行碎片拼接的结果。3 组碎片模型分别为 G10-19 号、G10-36 号和 G10-23 号俑上受损程度不同的碎片。



(a)文献[9]算法出现渗透现象的情况

(b)文献[3]算法出现渗透现象的情况

(c)文献[3]算法导致表面纹饰不连续的情况

图 13 不同拼合算法结果对比

当 2 个断裂面可实现正确匹配,那么该 2 个碎片完成精确匹配之后,相邻的 2 个断裂面之间不应该发生明显的碰撞、缝隙过大以及相互重叠交错^[1]。图 13(a)为采用文献[9]基于断裂面几何特征的算法进行拼接的结果,本文将该模型转换成点云数据,并且采用不同颜色进行着色,可明显看出,该算法出现边界渗透的现象。如图 13(b)所示,为采用文献[3]基于断裂部位轮廓线的算法进行碎片拼合的结果,由于断裂部位存在缺失,造成边界距离场计算不精确,出现边界渗透现象。断裂部位的严重缺失也导致碎片拼接结果出现表面纹饰信息不连续的现象,如图 13(c)所示。

4.3 算法实验数据

本文算法针对成组的兵马俑碎片拼合时间和实验数据如表 1 所示,其中,提取碎片显示脊线的时间为 Stage1,本文算法每次提取 2 个碎片模型的显示脊线,特征匹配集获取的时间为 Stage2,同理,每次获取 2 个碎片的特征匹配集,Stage3 为碎片拼合的时间。实验数据表明,成组兵马俑的碎片个数对 Stage1 有直接的影响,这是因为碎片的个数越多,需

提取显示脊线的碎片模型的次数增加,从而增加了 Stage1 的运行时间,Stage2 是本文算法最耗时的部分,因为需要计算每个特征点到边界轮廓线的距离场。

表 1 本文算法运行时间 s

编号	Stage1	Stage2	Stage3	总时间
G10-19	4.039	6.773	1.517	12.329
G10-26	5.637	7.961	2.426	16.024
G10-24	4.218	7.919	2.054	14.191
G10-18	21.083	34.185	7.169	62.437
G10-36	15.379	26.557	6.315	48.251
G10-23	8.981	14.918	4.298	28.197

表 2 为本文算法的运行时间与文献[9]算法的运行时间对比, T_1 表示本文算法的运行时间, T_2 表示文献[9]算法的运行时间。实验数据表明,本文算法相比文献[9]算法运行时间提高 3%~6%,同时,本文算法的拼合误差小于 1 mm,可取得精确的碎片拼合结果。

表 2 不同算法运行时间对比

编号	T_1/s	T_2/s	速度提升率/%	拼合误差/mm
G10-19	12.329	12.832	4.087	0.816
G10-26	16.024	16.622	3.735	0.923
G10-24	14.191	15.011	5.782	0.895
G10-18	62.437	66.129	5.914	0.961
G10-36	48.251	50.558	4.782	0.903
G10-23	28.197	29.495	4.605	0.924

5 结束语

针对断裂部位受损的文物碎片模型,本文基于表面纹饰特征,提出一种边界轮廓线距离场的文物碎片拼接算法。实验结果表明,对于断裂面存在较小缺损,并且表面纹饰清晰的文物碎片,该算法可实现较好的拼合效果。由于本文算法利用了破碎文物模型表面纹饰的连续性,因此寻找更加鲁棒、有效的特征描述子,从而更加准确地表示模型的局部特征将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZHENG Shunyi, HUANG Rongyong, LI Jian. Reassembling 3D thin fragments of unknow geometry in cultural heritage [J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, 2(5): 393-399.

(下转第 218 页)

5 结束语

本文提出一种粘连害虫分割算法,该算法首先对图像中的粘连害虫区域进行提取,然后使用改进的 Harris 算法将粘连区域的候选角点检测出来,提取凹点,找出粘连害虫的分离点快速筛选出分割点,最后达到准确分割。本文算法能对串连、并连以及混连3种典型的粘连方式进行准确的分割。在凹点检测耗时上,改进算法的平均耗时占传统 Harris 算法的1/3。在凹点检测个数上,改进算法的分割率比分水岭算法高11%,分割的错误率是分水岭算法的1/2。在有效性上,本文算法比分水岭算法高16.3%。实验结果表明,本文算法在分割时间以及分割的准确性上都有了明显的提高。

参考文献

- [1] 高华,祝玉华,甄彤. 仓储害虫检测技术的研究现状及展望[J]. 粮油食品科技,2016,24(2):93-96.
- [2] 陈梅香,杨信廷,石宝才,等. 害虫自动识别与计数技术研究进展与展望[J]. 环境昆虫学报,2015,37(1):176-183.
- [3] 缪慧司,梁光明,刘任任,等. 结合距离变换与边缘梯度的分水岭血细胞分割[J]. 中国图象图形学报,2016,21(2):192-198.
- [4] 王鑫,胡洋洋,杨慧中,等. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. 南京理工大学学报,2016,40(3):285-289.
- [5] 张瑞华. 基于 ECCC 的细胞图像分割算法[J]. 电子技术应用,2016,42(7):126-129.
- [6] 权龙哲,辛伯来,奚德君,等. 粘连玉米粒群的分水岭分割与粒形的多尺度小波校正算法研究[J]. 中国科技论文,2016(2):191-196.
- [7] 张颀康,李翠丽,李源,等. 基于图像分割的玉米粒数高通量估算方法[J]. 湖北农业科学,2016,55(12):3185-3188.
- [8] ZHOU D, WU G, YANG H, et al. The improvement of adhesive grain particles image segmentation algorithm based on mathematical morphology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(12):152-159.
- [9] 周凤香. 一种新的表格字符分割算法的研究与实现[J]. 数字技术与应用,2016(3):151-152.
- [10] 施隆照,王凯. 基于连通区域的复杂车牌的字符分割算法[J]. 计算机工程与设计,2016,37(8):2138-2142.
- [11] 朱亚萍,邱锦山,杨成忠. 基于改进连通域算法的车牌字符分割方法[J]. 杭州电子科技大学学报,2016,36(2):48-51.
- [12] BARBEDO J G A. Using digital image processing for counting whiteflies on soybean leaves [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2014, 17(4):685-694.
- [13] 刘国成,张杨,黄建华,等. 基于 K-means 聚类算法的叶螨图像分割与识别[J]. 昆虫学报,2015,58(12):1338-1343.
- [14] SIVA S A, SARASWADY D. Analyzing the optimal performance of pest image segmentation using non linear objective assessments [J]. Journal of Computational Information Systems, 2016(1):2789-2796.
- [15] 王民,周兆镇,李昌华,等. 基于像素点灰度差的 Harris 角点检测算法[J]. 计算机工程,2015,41(6):227-230.
- [1] 高华,祝玉华,甄彤. 仓储害虫检测技术的研究现状及展望[J]. 粮油食品科技,2016,24(2):93-96.
- [2] 陈梅香,杨信廷,石宝才,等. 害虫自动识别与计数技术研究进展与展望[J]. 环境昆虫学报,2015,37(1):176-183.
- [3] 缪慧司,梁光明,刘任任,等. 结合距离变换与边缘梯度的分水岭血细胞分割[J]. 中国图象图形学报,2016,21(2):192-198.
- [4] 王鑫,胡洋洋,杨慧中,等. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. 南京理工大学学报,2016,40(3):285-289.
- [5] 张瑞华. 基于 ECCC 的细胞图像分割算法[J]. 电子技术应用,2016,42(7):126-129.
- [6] 权龙哲,辛伯来,奚德君,等. 粘连玉米粒群的分水岭分割与粒形的多尺度小波校正算法研究[J]. 中国科技论文,2016(2):191-196.
- [7] 张颀康,李翠丽,李源,等. 基于图像分割的玉米粒数高通量估算方法[J]. 湖北农业科学,2016,55(12):3185-3188.
- [8] ZHOU D, WU G, YANG H, et al. The improvement of adhesive grain particles image segmentation algorithm based on mathematical morphology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(12):152-159.
- [9] 周凤香. 一种新的表格字符分割算法的研究与实现[J]. 数字技术与应用,2016(3):151-152.
- [10] 施隆照,王凯. 基于连通区域的复杂车牌的字符分割算法[J]. 计算机工程与设计,2016,37(8):2138-2142.
- [11] 朱亚萍,邱锦山,杨成忠. 基于改进连通域算法的车牌字符分割方法[J]. 杭州电子科技大学学报,2016,36(2):48-51.
- [12] BARBEDO J G A. Using digital image processing for counting whiteflies on soybean leaves [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2014, 17(4):685-694.
- [13] 刘国成,张杨,黄建华,等. 基于 K-means 聚类算法的叶螨图像分割与识别[J]. 昆虫学报,2015,58(12):1338-1343.
- [14] SIVA S A, SARASWADY D. Analyzing the optimal performance of pest image segmentation using non linear objective assessments [J]. Journal of Computational Information Systems, 2016(1):2789-2796.
- [15] 王民,周兆镇,李昌华,等. 基于像素点灰度差的 Harris 角点检测算法[J]. 计算机工程,2015,41(6):227-230.

编辑 索书志

(上接第212页)

- [3] 樊少荣,茹少峰,周明全,等. 破碎刚体三角网格曲面模型的特征轮廓线提取算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(9):2003-2009.
- [4] UCOLUK G I, HAKKI T. Automatic reconstruction of broken 3-D surface objects [J]. Computer & Graphics, 1999, 23(4):573-582.
- [5] CRISTINA H, LEITAO G, STOLFI J. A Multi-scale method for the re-assembly of fragmented objects [C]// Proceedings of British Machine Vision Conference. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2008:1239-1251.
- [6] KONG W, KIMIA B B, Kong W, et al. On solving 2D and 3D puzzles using curve matching [C]// Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2001:583-590.
- [7] PAPAIOANNOU G, KARABASSI E A, THEOHARIS T. Virtual archaeologist: assembling the past [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(2):53-59.
- [8] WINKELBACH S, RILK M, SCHONFELDER C. Fast random sample matching of 3D fragments [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3175:129-136.
- [9] 李姬俊男,耿国华,周明全,等. 文物碎块虚拟拼接中的表面特征优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(12):2149-2154.
- [10] HUANG Qixing, FLORY S, GELFAND N, et al. Reassembling fractured objects by geometric matching [J]. ACM Transaction on Graphics, 2006, 25(3):569-578.
- [11] 颜廷秦,周昌雄,刘淑芬. 一种距离场约束下的普适细化算法[J]. 南京大学学报,2013,49(2):189-195.
- [12] 郑军,刘正文,马兆瑞,等. 基于最小误差逼近的轮廓特征点提取[J]. 清华大学学报,2008,35(2):164-168.
- [13] JUDDY T, DURAND F, ADELSON E. Apparent ridges for line drawing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):19.
- [14] 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.
- [15] 李群辉. 基于断裂面匹配的破碎刚体复原研究[D]. 西安:西北大学,2013.
- [16] HORN B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(4):629-642.

编辑 刘冰