

文章编号 1004-924X(2017)06-1597-10

基于轮廓线特征点的交互式文物拼接

周明全^{1*}, 袁 洁², 耿国华², 张雨禾²

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

摘要:针对计算机辅助文物虚拟复原中断裂部位受损而引起的几何特征丢失问题,提出一种结合表面纹饰信息与轮廓线上特征点的交互式破损文物拼接算法。首先,通过生成拉普拉斯线得到碎片表面的纹饰特征和断裂部位表面轮廓线。领域专家根据纹饰特征的连续性标记表面约束点,再采用 Douglas-Peucker 算法提取断裂部位轮廓线上的特征点;然后,结合特征点至约束点的距离、特征点与邻接点的内角以及相邻特征点的欧氏距离构造能有效表示断裂部位拼合关系的特征点描述符,同时定义匹配度函数从而获取特征点匹配对集合;最后,采用四元组方法计算刚体变换矩阵,实现碎片的精确拼合。实验结果表明,拼合时间节省了约 13%~16%,拼合误差小于 1 mm。该方法避免了传统的断裂面拼合方法因数据量大带来的高时间代价,可快速有效地实现破损文物碎片模型的虚拟复原。

关键词:虚拟复原;交互式算法;拉普拉斯线;Douglas-Peucker 算法;刚体变换

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172506.1597

Interactive reassembly of fractured fragments based on feature points of contour line

ZHOU Ming-quan^{1*}, YUAN Jie², GENG Guo-hua², ZHANG Yu-he²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

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

* Corresponding author, E-mail: m qzhou@nwnu.edu.cn

Abstract: A novel interactive method which can assemble the fractured fragments was proposed based on the surface pattern breakpoint and feature points on contour line of the fracture fragments. Firstly, the geometric structure and contour line were obtained by generating Laplacian lines, and pattern breakpoints and feature points were selected. Then, the combination for distance of feature points to pattern breakpoint, the inner angles and distance of adjacent feature points can produce feature descriptors which determine the adjacency relationship between fragments. All the pairwise points were searched through matching function. Finally, the quaternion outputted the rigid transformation matrices, then two fragments were precisely aligned based on optimal rigid motion through exhaustive search. The experimental results indicate that the reassembly time with 13% to 16% saved and result errors are less than 1 mm. The method can reassemble fractured fragments efficiently and successfully.

Key words: virtual restoration; interactive algorithm; Laplacian lines; Douglas-peucker; rigid transformation

收稿日期:2016-12-13;修订日期:2017-02-20.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61673319, No. 61373117);高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20136101110019)

1 引言

刚性物体破碎后会形成若干任意形状的子物体,随着三维扫描技术的不断发展,通过计算机辅助实现破碎刚体的虚拟复原在文物保护、工业设计和医学领域中有着重要的应用价值^[1]。根据虚拟复原过程是否有人工干预,可将复原方法分为自动化复原和半自动化复原;根据所选取的特征不同,传统的虚拟复原方法可分为基于几何特征的虚拟复原和非几何特征的虚拟复原。

自动化虚拟复原技术大多以碎片的几何特征为依据,提取碎片断裂部位的几何特征进行相似性判断以实现碎片的完整拼接。根据破损文物的厚度信息不同,自动化虚拟复原技术又可大致分为两类:一类是针对可忽略文物厚度信息的薄壁碎片,鉴于轮廓曲线匹配^[2]是模式识别、机器视觉中的重要方法,针对该类文物碎片,提出了基于空间轮廓曲线^[3-7]的拼合方法,其代表性研究有樊少荣等^[3]基于碎片网格模型,提取断裂部位轮廓线,根据曲线的匹配程度进而确定碎片间的拼合关系。这一拼合方法是对通常应用于壁画等薄壁类文物碎片拼合^[4]的二维平面曲线匹配的延伸。此外学者 Cristina 等^[5]基于动态规划的思想,对曲线上的顶点曲率进行编码,通过对比编码确定曲线的邻接关系。针对三维空间曲线匹配问题,Kong 等^[6]首先定义曲线亲密度从而确定碎片的拼合关系,然后通过计算能量最小化来实现空间曲线的匹配。Li 等^[7]基于模板匹配的思想在确定颅骨碎片的位置关系后结合相邻碎片轮廓曲线进行精确拼合。Wolfson 等^[8]根据轮廓线上采样点的曲率值进行编码,运用哈希算法完成匹配。轮廓曲线是描述物体形状的最重要信息之一,故基于此的空间曲线匹配简单而高效;但该类复原方法对噪声较敏感并且易忽略文物的厚度信息,针对部分碎片模型难以取得满意的拼合效果。另一类方法则针对断裂面具有一定厚度的破碎文物,提出了基于断裂部位空间曲面匹配的拼合方法^[9-10],代表性研究有 Huang 等^[9]采用积分不变量提取出碎片表面的尖锐特征,进而实现断裂面的分割,再基于向前搜索技术完成相邻

断裂面的空间曲面匹配,最终实现破碎文物的虚拟复原。文献^[10]Huang 等提出的方法是通过提取约束性的特征簇来完成碎片间的两两拼合。空间曲面匹配算法的关键在于断裂面的正确分割和特征匹配,由于能够准确反映模型断裂部位的邻接关系的碎片模型包含较多的特征信息,故基于空间曲面的碎片拼合,具有一定优势;但针对断裂面部位受损较严重的碎块,匹配的正确性则难以保证。

除上述研究外,还有以半自动化为主要技术的虚拟复原方法。半自动化方法主要以人机交互为基础,引入领域专家的先验知识辅助计算机的复原过程从而实现碎片拼合。代表性的研究有 Parikh 等^[11]从碎片集中筛选明显的可匹配碎片,使用户重组出文物模型的大致原型,再采用自动化复原方法对拼合线索不明显的碎片做拼接。Mellado 等^[12]借助一个可触摸屏幕使得领域专家能够确定碎片间的初始相对位置和方向。上述方法为复杂文物碎片的拼合提供了新的研究思路。

鉴于兵马俑碎片存在断裂部位缺损的情况,采用基于空间断裂曲面的拼合方法难以取得精确的拼合结果。因此针对难以采用自动化复原方法进行拼合的文物碎片模型,本文以传统的半自动化复原方法为基础,提出一种结合表面纹饰信息与轮廓线特征点的交互式破损文物拼接方法。本文算法的核心思想是以表面纹饰断点为约束点,对断裂部位轮廓线上非均匀采样的特征点进行特征描述。本文采用 Douglas-Peucker 算法^[13-20]提取轮廓线上的特征点,避免了均匀采样算法可能获取的大量非特征点,将计算量较大的空间点对应关系转换成少量的轮廓线特征点匹配,从而有效提高了刚体转换效率,同时借助表面纹饰断点信息的可控性和鲁棒性,构造能有效表示相邻碎片断裂部位拼合关系的特征点描述符;然后根据特征点的匹配度测量函数,获得相邻碎片间的特征点匹配对集合;最后采用四元组法完成碎片的刚体转换。

2 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原模型中的冗余点,保留尽可能少的点表

示原模型的形状。首先,本文采用高斯拉普拉斯算子(Laplacian of Gaussian,LoG)对三维模型表面进行边缘检测,提取出模型的特征线,即拉普拉斯线;然后领域专家结合先验知识和表面纹饰特征标记表面约束点;最后,改进 Douglas-Peucker 算法从而提取模型断裂部位表面轮廓线上的特征点。

2.1 拉普拉斯线生成

拉普拉斯线^[14]定义为一种视相关的物体空间特征线。给定网格模型 M ,拉普拉斯线则定义为 M 表面 S 上所有满足条件 $\Delta I=0, \|\nabla I\|>\epsilon$ 点的集合。其中, $I(p)=\mathbf{n}(p)\cdot\mathbf{v}(p)$ 是 p 点的漫反射光亮度,通过在视点处放置一个单位强度的点光源计算得到; $\mathbf{n}(p)$ 和 $\mathbf{v}(p)$ 分别是 p 点的法向量和视线方向; $\Delta I=\frac{\partial^2 I}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$ 是光亮度 I 的拉普拉斯; ∇I 是光亮度 I 的梯度; ϵ 是用户指定的阈值。

直观地讲,拉普拉斯线是对图像处理中基于 LoG 算子进行边缘检测的方法在三维模型表面上的一种推广,是将特征线上定义为 LoG 算子的输出结果为 0 并且梯度值“足够大”的点集合。

该算法得到的模型特征线更符合人类的视觉特性,并清晰、光滑地表示碎片模型外表面复杂的几何纹饰特征。通过视相关的 LoG 算子提取出的点集合构造出碎片模型的拉普拉斯线如图 1 所示。



图 1 拉普拉斯线提取

Fig. 1 Extraction of Laplacian lines

2.2 表面约束点标记

Palmas 等^[15]通过引入约束的概念来描述相邻碎片断裂部位的几何特征以确定碎片之间的空间关系。在传统的交互式复原方法中,领域专家只给出初始位置和方向,本文以此为基本思想,结合断裂碎片外表面几何纹饰结构的连续性,在提取碎片的拉普拉斯线上标记表面约束点 q ,即表面纹饰断点,并将此点映射到碎片模型以此确定潜在的对应区域。

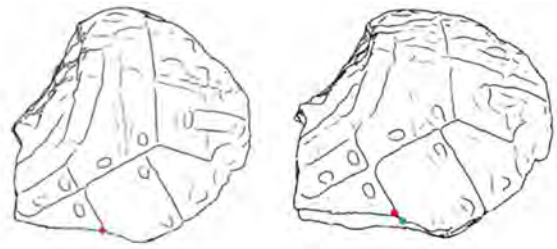


图 2 表面约束点标记

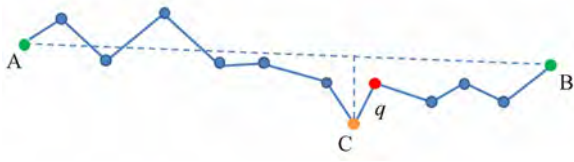
Fig. 2 Surface constraint points marked

拉普拉斯线的生成是基于视相关的,用户在碎片断裂部位的表面轮廓线上选取表面约束点时可能会出现错位现象,即将约束点标记在模型表面非断裂轮廓线上,由于用户在不同视角下观察到的断点位置可能不同,如图 2(彩图见期刊电子版)所示,图中红色标记点为该视角下的表面约束点 q ,而实际情况中的最准确的表面纹饰断点为图中的绿色标记点位置;为了标记尽可能准确的表面约束点,本文最终选取的表面约束点需位于断裂部位轮廓线与表面纹饰特征线的交叉点,即满足条件 $\Delta I(p)=0, \|\nabla I(p)\|>\epsilon$ 。

2.3 轮廓线特征点选取

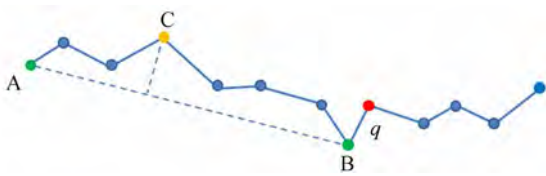
轮廓特征点的选取要最大程度地反应轮廓的形状特征,并同时具有最少的特征点数。Douglas-Peucker 算法最早是由 Urs Ramer 等^[13]提出,是将曲线近似的用一系列特征点表示,并尽可能减少点的数量的一种算法。本文结合表面约束点 q 对 Douglas-Peucker 算法进行改进,非均匀的对碎片断裂部位表面轮廓线上的点进行采样。该算法避免了传统的 Douglas-Peucker 算法由于无法记录中间的距离最大顶点,造成重复循环的次数过多的结果,同时满足本文表面约束点对轮廓特征点的约束

性。该算法的基本思想是由远到近,找出与曲线两端点连线的垂足之间距离最大的顶点并判断其是否满足要求,如图 3 所示,具体步骤如下:



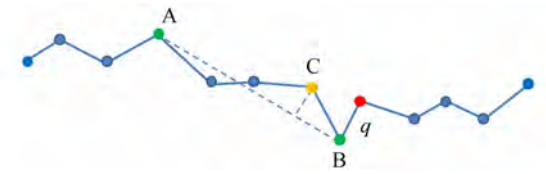
(a) 第 1 步到第 2 步的结果, C 为距离最远点

(a)The result from step 1 to step 2



(b) 第 3 步到第 2 步的结果, 上次的 C 现为 B

(b)The result from step 3 to step 2



(c) 第 4 步到第 2 步的结果, (b) 中的 C 现为 A, (a) 的 C 现为 B

(c)The result from step 4 to step 2

图 3 特征点提取过程

Fig. 3 The process of extracting feature points

Step 1 对曲线的离散点序列 $p_1, p_2, \dots, q, \dots, p_n$, 设 $A=p_1$ 和 $B=p_n$, 用线段连接 AB, 并将 B 放入特征点列的末尾;

Step 2 在 AB 范围内的点序列中寻找与 AB 线段具有最大距离的点, 若最大距离点为 q , 则寻找次大距离点, 记为 C;

Step 3 判断 C 点到 AB 的距离是否小于阈值, 若否, 则设 $B=C$, 并将 C 按原顺序放入特征点列, 记为 D, 用线段连接 AB, 回到 Step 2;

Step 4 将 A 按原顺序放入特征点列, 判断 B 是否等于 D, 若否, 设 $A=C, B=D$, 用线段连接 AB, 回到 Step 2;

Step 5 判断 B 是否等于 p_n , 若否, 则设 $A=B, B=D^+$, D^+ 为 D 的下一个特征点, 用线段连接 AB, 回到 Step 2;

Step 6 结束。

本文根据碎片的拉普拉斯线, 获得碎片断裂部位的外表面轮廓线, 如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示, 根据表面约束点 q 改进的 Douglas-Peucker 算法提取出断裂部位外轮廓线上的特征点。最后, 获得对应空间曲线上的 2 个粗匹配特征点集合 $S=\{s_1, s_2, \dots, q_s, \dots, s_m\}$ 和 $T=\{t_1, t_2, \dots, q_t, \dots, t_n\}$, 其中 $m, n > 3$ 。图 4 为碎片断裂部位外轮廓线上选取的特征点, 红色标记点为表面约束点 q , 绿色标记点则为提取的轮廓线特征点。

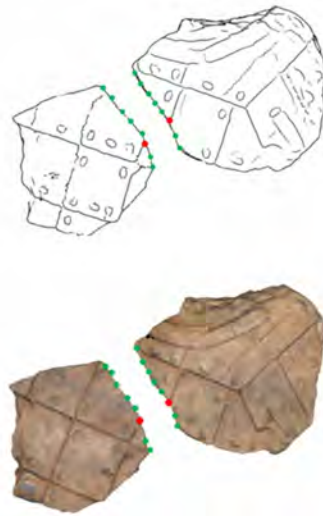


图 4 轮廓线特征点

Fig. 4 Feature points on contour lines

3 构造匹配点集

本文以提取的碎片特征为基础, 结合表面纹饰断点信息与特征点的 3 种特征属性构造出能够有效表示碎片断裂部位拼合关系的特征点描述符, 然后通过特征点匹配度函数来确定特征点集合中的对应关系, 再依据法向一致性筛选出最优的特征点匹配对集合。

3.1 特征点描述符定义

定义本文的特征点描述符由主动轮廓线上的 3 个特征点属性组合构成。以下为轮廓线特征点 s_i 的 3 个特征点属性的具体定义:

(1) d_i 表示特征点 s_i 到表面约束点 q 的距离。该距离以表面纹饰断点为约束, 给出了断裂部位轮廓线特征点的相对位置。

(2) 与相邻两个特征点构成的内角定义为 θ_i 。

如图 5(彩图见期刊电子版)所示,特征点 s_i 的内角则表示为特征点 s_{i-1}, s_i, s_{i+1} 之间连线的夹角,并且为碎片内侧的夹角。

(3) L_i 定义为特征点 s_i 与 s_{i+1} 之间的欧氏距离。如图 5 中褐色线段,特征点 s_i 与其下一个特征点之间的邻接关系。

该 3 个特征点属性均具有旋转、平移、缩放不变性,组合构成的特征点描述符融合了断裂部位轮廓线上的几何特征,能够有效地表示碎片断裂部位的拼合关系。因此,对 1.3 节提取的任意特征点 s_i ,其特征描述符表示为 $s_i(\theta_i, d_i, L_i)$,如图 5 中所示,特征点 s_i 可表示为 $s_i(153^\circ, 8.3, 2.7)$ 。

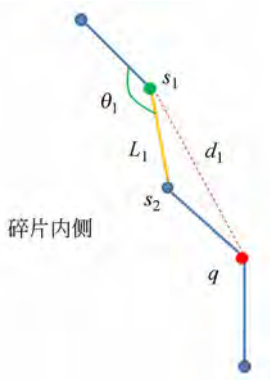


图 5 特征点描述符构造

Fig. 5 Feature points descriptor proposed

3.2 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,需对特征点描述符进行匹配度测量,从而获取初始的匹配点对关系。

设模板碎片的断裂部位轮廓线特征点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 目标碎片的断裂部位轮廓线特征点集合为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 其中 $m, n \geq 3$ 。以固定的表面约束点对 (q_s, q_t) 为起始点对,沿断裂部位轮廓线两个相反的方向,依次遍历特征点集合,计算特征点对之间的匹配度值。

设 $s_i(\theta_i, d_i, L_i)$ 和 $t_j(\theta_j, d_j, L_j)$ 分别为特征点集合 S 和 T 中的任意一个特征点的特征描述符,本文定义特征点间的匹配度函数

$$SP(s_i, t_j) = \sqrt{\alpha_1 (\sin \theta_i - \sin \theta_j)^2 + \alpha_2 (d_i - d_j)^2 + \alpha_3 (L_i - L_j)^2}$$

其中, α_1 、 α_2 和 α_3 分别为 3 个特征属性的权重系数,本文取 $\alpha_1 = 0.5$ 、 $\alpha_2 = 0.3$ 和 $\alpha_3 = 0.2$ 。

本文采用表面纹饰断点作为约束点,向相反

的两侧方向遍历匹配。当 $SP(s_i, t_j)$ 的值越接近于 0,表示该特征点对的匹配度越高。给定匹配度阈值 $\epsilon_{sp} > 0$,若特征点对 (s_i, t_j) 满足条件 $SP(s_i, t_j) < \epsilon_{sp}$,则将该特征点对 (s_i, t_j) 列入初始匹配点对集合 $L = \{(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_k, t_k)\}$, $k \leq \min(m, n)$ 中,否则,开始遍历目标碎片的下一个特征点,从而找到特征点 s_i 所有可能的对应点。

3.3 最优匹配集

在上述匹配度测量过程中,模板碎片上的特征点 s_i 可能存在多个满足条件 $SP(s_i, t_j) < \epsilon_{sp}$ 的对应点,特征匹配产生的多重对应联系将降低模型匹配的效率,因而必须建立强有力的约束条件排除断裂部位之间的错误联系,以获得正确的坐标变换。本文根据特征点之间的法线夹角一致性,建立约束条件,进一步精炼测量数据与模型曲面间的对应关系,剔除错误匹配点对。定义法向夹角的约束条件为

$$\left| \frac{\text{ang}(s) - \text{ang}(t)}{\text{ang}(s)} \right| \leq \epsilon_{\text{ang}}$$

其中, (s, t) 为初始特征点对集合中的任意一个元素, $\text{ang}(s)$ 为特征点 s 与约束点 q_s 法向量之间的夹角; $\text{ang}(t)$ 为特征点 t 与约束点 q_t 法向量之间的夹角; ϵ_{ang} 为给定的角度阈值。将满足约束条件的初始特征匹配点对列入最优特征匹配集合 S , 否则,删除该点对。

经过上述法向量夹角约束的进一步处理,得到如图 6 所示的特征匹配点对,即最优的特征点对匹配集合 $S = \{(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_k, t_k) \mid k \leq \min(m, n)\}$ 。

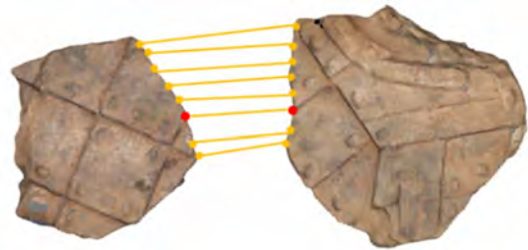


图 6 特征点对匹配

Fig. 6 Pairwise feature points matching

4 碎片拼合

三维拼接的实质就是求取测量装置在不同的

测量位置时,各坐标系与基准坐标系之间的位置变换矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。

综上所述,获取最优匹配点对后,特征点对数较少,可靠性高,因此采用穷举的搜索策略寻找出每 3 组不共线的特征点对,采用四元组法计算刚体变换,并筛选出正确率较高的匹配变换,最终将断裂面精确对齐。四元组法最早是由 Horn 提出来的,其基本思想是用两组一一对应的三维坐标点集求解出两组三维点集之间的坐标旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{T} 。

算法步骤如下:

Step1:采用三点组合坐标变换法,以三点不共线为原则,在特征点对匹配集合 S 中,采用穷举搜索策略筛选出满足条件的 3 组特征点对,构成集合 $Q = \{((s_i, t_i), (s_j, t_j), (s_m, t_m)) \mid i, j, m \in [0, k] \cap i \neq j \neq m\}$, 设 Q 中的元素个数为 p 个;

Step2:遍历集合 Q 中的所有特征点对,采用四元组法计算刚体变换的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} ,构造刚体变换数组 $D[t], t=1, 2, \dots, p$;

Step3:集合 Q 中的特征点对经过 $D[t]$ 变换之后,若满足 $|s_i^A - (s_i^B \mathbf{R}_t + \mathbf{T}_t)| < \epsilon_1, \epsilon_1 > 0$, 则表明该特征点对匹配正确,其中, A 和 B 分别代表可匹配的相邻碎片;否则为错误匹配。遍历集合 Q 可求出 $D[t]$ 的匹配正确率 $q = \frac{c}{2p+1}, c = c+1$, c 的初值设为 0。遍历整个数组 $D[p]$, 计算所有特征点对刚体变换的正确匹配率;

Step4:筛选出匹配正确率最高的刚体变换,完成待拼接碎片的精确对齐。

5 实验结果与分析

为检验本文算法的有效性,以秦始皇陵 1 号坑出土的部分兵马俑碎片网格模型为实验数据。本文实验采用 Visual C++ (visual studio 2010) 和 OpenGL 编程, Intel Core i7-3770 CPU/3.4Ghz, 4GB 内存的 PC 机上实现。

5.1 本文算法结果

图 7~9 所示为分别在 G10-19 号俑、G10-26 号俑和 G10-24 号俑部分邻接碎片上采用本文拼接算法的实验结果,这 3 组碎片断裂部位均有不同程度的缺损,可以看出,本文算法在断裂部位受损的碎片模型上可取得较好的拼接结果。图 10

~12 所示为一组整俑模型采用本文算法的拼接结果,可明显看出,该组整俑后背、胸腔以及胳膊部位均取得较好的拼合效果,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。如图 11(彩图见期刊电子版)中红色矩形框标注的有小部分缺失的碎片,该整俑仍可取得较好的拼合结果。



图 7 G10-19 号俑部分碎片拼合结果
Fig. 7 Assembly result of G10-19

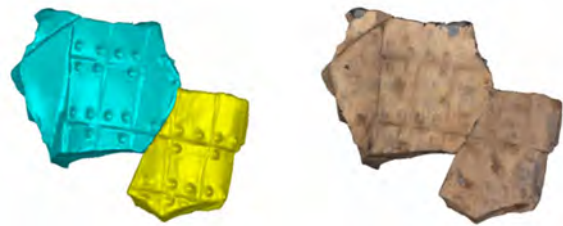


图 8 G10-26 号俑部分碎片拼合结果
Fig. 8 Assembly result of G10-26



图 9 G10-24 号俑部分碎片拼合结果
Fig. 9 Assembly result of G10-24

本文选取 G10-36 号俑上受损严重、表面纹饰清晰的碎片 G10-36-4 和 G10-36-11(7) 为数据模型,采用本文算法进行碎片拼合,实验结果如图 13 所示。图 13(a) 中碎片 G10-36-11(7) 断裂部位轮廓线上,红色圆点所示的表面约束点,黄色圆点所示的左侧轮廓线均受损严重,在邻接碎片 G10-36-4 上无法找到对应点,绿色圆点所示为碎片轮廓线上有效的特征点集,均可在邻接碎片上找到



(a) 俑体正面
(a) Front of Terracotta Army



(b) 俑体背面
(b) Back of Terracotta Army

图 10 G10-18 号俑部分碎片拼合结果
Fig. 10 The assembly result of G10-18



(a) 俑体正面
(a) Front of Terracotta Army



(b) 俑体背面
(b) Back of Terracotta Army

图 12 G10-22 号俑部分碎片拼合结果
Fig. 12 Assembly result of G10-22

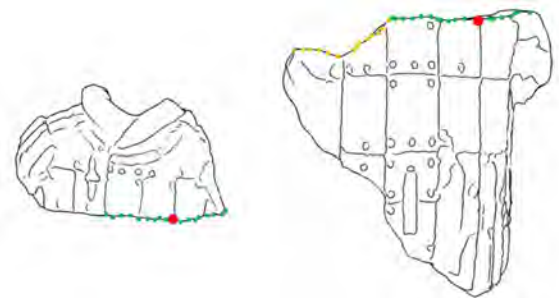


(a) 俑体正面
(a) Front of Terracotta Army



(b) 俑体背面
(b) Back of Terracotta Army

图 11 G10-36 号俑部分碎片拼合结果
Fig. 11 Assembly result of G10-36



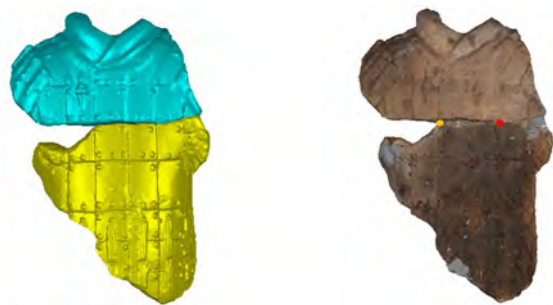
G10-36-4

G10-36-11(7)

(a) 线画图

(a) Line drawing

对应的特征点,形成特征点对集合,实现碎片拼合,实验结果如图 13(b)所示。因此,本文算法针对受损严重但仍具有部分共同轮廓线的碎片模型仍可实现较好的拼接结果。



(b) 拼合结果

(b) Assembly result

图 13 受损严重碎片拼接结果

Fig. 13 Assembly result of damaged fragments

5.2 算法运行时间

表 1 所示为成组断裂部位受损的碎片模型采用文献[3]轮廓线匹配算法、文献[10]基于断裂面几何特征算法和本文算法的实验数据对比结果。

表 1 算法运行时间和拼合误差对比

Tab. 1 Comparison of running times and reassembly errors

编号	运行时间/s			拼合误差/mm		
	t_1	t_2	t_3	δ_1	δ_2	δ_3
G10-19	12.983	14.957	15.246	0.819	1.253	1.302
G10-26	10.109	11.652	11.983	0.794	1.321	1.479
G10-24	11.074	12.787	12.810	0.923	1.494	1.403
G10-18	11.074	12.787	12.810	0.923	1.494	1.403
G10-36	54.384	62.539	63.357	0.877	1.407	1.325
G10-22	35.412	40.821	41.981	0.896	1.368	1.241

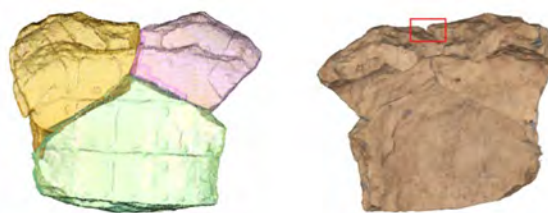
5.3 对比实验结果

本文选取 3 组断裂部位受损程度不同的碎片作为实验数据,进行结果对比,3 组碎片分别为:G10-19 号俑、G10-18 号俑和 G10-36 号俑部分碎片。这 3 组邻接碎片分别具有不同的特点:G10-19 号俑碎片断裂部位缺失较严重;G10-18 号俑碎片内侧断裂部位缺失严重,碎片不完整;G10-36 号俑碎片断裂部位存在较小部分缺损。

如图 14(彩图见期刊电子版)所示为分别采用文献[10]基于断裂面几何特征的方法和文献[3]基于断裂面轮廓线匹配的方法进行碎片拼合的结果。若两个断裂面可实现正确匹配,那么当两个碎片完成精确配准之后,相邻的两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]。本文在图 14(a)中将已拼接的 G10-19 号俑碎片模型转换成点云数据,分别采用黄

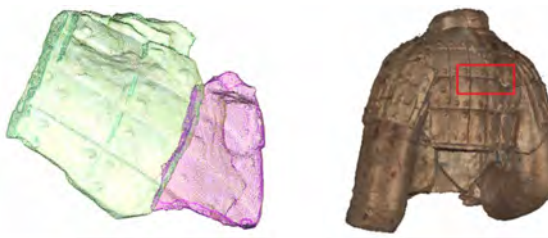
表 1 中 t_1 、 t_2 和 t_3 分别表示采用本文算法、文献[3]算法以及文献[10]算法的运行时间。本文算法基于碎片断裂部位轮廓线上的特征点进行匹配,由于采用不均匀采样方法,使得提取的特征点数量较少,随之也减少了碎片拼合时间,由表 1 可得,本文算法的运行时间比文献[3]和文献[10]算法的拼合时间提高了约 13%~16%,有效地提高了算法的效率。

本文定义邻接碎片的拼合误差为 δ ,是指当碎片完成精确拼接后,邻接碎片轮廓线上的特征点对的欧氏距离之和的平均值。表 1 中 δ_1 、 δ_2 和 δ_3 分别表示采用本文算法、文献[3]算法以及文献[10]算法的拼合误差。实验结果表明,本文算法的拼合误差更小,原因是本文算法能够筛选出较优的刚体转换矩阵从而实现更高精度的配准。



(a) 文献[10]方法出现渗透现象

(a) Permeation into fragments in reference [10]



(b) 文献[3]方法出现渗透现象

(b) Permeation into fragments in reference [3]



(c)文献[3]方法出现表面纹饰不连续现象
(c)Discontinuity of pattern in reference[3]

图14 不同方法结果对比

Fig. 14 Results of different methods

色、紫色和绿色着色,可明显看出,文献[10]中基于断裂面的几何特征方法,当碎片模型断裂处存在缺损时,几何特征无法完整地表示断裂面结构,出现边界渗透现象,难以取得较好的拼合结果,如图中红色矩形框标注所示;图14(b)中所示为采用文献[3]基于断裂面轮廓线的拼合方法对G10-18号俑部分碎片的拼合结果,由于碎片断裂部位存在缺失,造成不准确的位置匹配,出现边界渗透

现象;文献[3]方法针对G10-36号俑部分碎片出现碎片表面纹饰信息不连续的现象,如图14(c)所示。

6 结 论

本文讨论的重点问题在于针对断裂部位受损严重而无法采用传统的自动化复原方法进行拼合的碎片模型,提出了一种结合断裂部位的表面纹饰断点信息和轮廓线特征点的交互式拼合方法。该算法将传统的自动化拼合方法中的关键判定信息可视化,利用表面纹饰信息的连续性对特征点的描述进行约束,从而定义了能够有效判断碎片之间邻接关系的特征点描述符,提高了碎片的拼合效果,使得拼合误差小于1 mm。同时,本文对断裂部位表面轮廓线进行不均匀采样,提取少量特征点,减少了均匀采样过程中的冗余点,节省碎片拼合时间约13%~16%。

由于本文算法利用了破损文物模型上的表面纹饰连续性,因此,针对表面光滑无纹饰特征的碎片模型,本文算法可能无法取得有效的实验结果。寻找更加鲁棒、有效的特征描述符从而推广其适用的模型范围,将是我们下一步工作的重点。

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.
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. (in Chinese)
- [2] ZHENG S Y, HUANG R Y, LI J, *et al.*. Reassembling 3D thin fragments of unknown geometry in cultural heritage[J]. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, 2(5): 393-399.
- [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方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 2003-2009.
FAN S R, RU S F, ZHOU M Q, *et al.*. A method of extracting feature contour from triangular fractured solid[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(9): 2003-2009. (in Chinese)
- [4] COOPER D B, WILLIS A, ANDREWS S, *et al.*. Assembling virtual pots from 3D measurements of their fragments[J]. *In Virtual reality, archeology, and cultural heritage*, 2001, 11: 241-254.
- [5] CHAO H, THOMAS S H, CHUN Y. A multi-scale method for automatic correction of intensity non-uniformity in MR images[J]. *Journal of Magnetic resonance imaging*, 2001, 13: 428-436.
- [6] KONG W, KIMIA B B. On solving 2D and 3D puzzles using curve matching[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001: 583-590.
- [7] KANG Z, WU Y Y, MARY M, *et al.*. 3D fragment reassembly using integrated template guidance and fracture-region matching[J]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015: 2138-2146.
- [8] WOLFSON H J. On curve matching[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(5): 483-489.
- [9] HUANG Q X, FLORY S, GELFAND N, *et al.*. Reassembling fractured objects by geometric mat-

- hing[J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2006, 25(3):569-578.
- [10] 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.
- LI J J N, GENG G H, ZHOU M Q, *et al.*. Surface feature optimization for virtual matching of relic Fragments[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(12):2149-2154. (in Chinese)
- [11] PARIKH D, SUKTHANKAR R, CHEN T, *et al.*. Feature-based part retrieval for interactive 3D reassembly[C]. *Applications of Computer Vision*, 2007:14.
- [12] MELLADO N, REUTER P, SCHLICK C. Semi-automatic geometry-driven reassembly of fractured archeological objects[C]. *In Virtual reality, archeology, and cultural heritage*, 2010:33-38.
- [13] MUSTAFA A A, SALEM M J. The detection of the suitable reduction value of douglas-peucker algorithm in online handwritten recognition systems [C]. *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics*, 2015:82-87.
- [14] ZHANG L, YING H, XUE X X, *et al.*. Laplacian lines for real-time shape illustration[C]. *Proceedings of the Symposium on Interactived Graphics & Games*, 2009, 3:129-136.
- [15] PALMAS G, PIETRONI N, CIGNONI P, *et al.*. A computer-assisted constraint-based system for assembling fragmented objects [C]. *Proceedings of the Symposium on Interactived Graphics & Games*, 2013, 1:529-536.
- [16] 方兰兰, 刘贵喜, 吕孟娇, 等. 利用边缘直线特征的异源图像配准[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10):753-761.
- FANG L L, LIU G X, LV M J, *et al.*. Multi-source matching of multi-sensor images based on edge line features[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):753-761. (in Chinese)
- [17] 张雨禾, 耿国华, 魏潇然. 散乱点云谷脊特征提取[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):310-318.
- ZHANG Y H, GENG G H, WEI X R. Valley-ridge feature extraction from point clouds[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):310-318. (in Chinese)
- [18] 冯筠, 陈雨, 全鑫龙, 等. 三维颅骨特征点的自动标定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1388-1394.
- FENG J, CHEN Y, TONG X L, *et al.*. Automatic feature point extraction for three-dimensional skull [J]. *Opt. Precising Eng.*, 2014, 22(5):1388-1394. (in Chinese)
- [19] 马鑫, 魏仲慧, 何昕, 等. 三维枪痕点云数据处理及特征提取研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(9):889-896.
- MA X, WEI Z H, HE X, *et al.*. Processing and feature extraction for three-dimensional bullet point cloud data [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(9):889-896. (in Chinese)
- [20] 田浩南, 张叶. 基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(4):666-672.
- TIAN H N, ZHANG Y. Quality evaluation of stereo image based edge and characteristic point matching [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4):666-672. (in Chinese)

作者简介:



周明全(1954—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,现任北京师范大学信息科学与技术学院院长,主要从事虚拟现实与可视化技术、智能信息处理、数据库与模式识别等方面的研究. E-mail: m qzhou@nwu. deu. cn



袁洁(1992—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,2015年于西北大学获得学士学位,主要从事计算机图形图像处理与可视化技术方面的研究. E-mail: yuanjie4920@163. com