

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **10**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年10月 第17卷 第10期(总第198期)

目次

综述

张量值图像插值方法综述 邵宇, 刘莹, 孙富春(1197)

图像处理和编码

利用模运算及其周期性特点的安全隐写算法 廖琪男(1206)

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽(1213)

Weber 定律下尺度空间的自适应构建 刘立, 张瑞军, 万亚平, 黄欣阳, 彭复员(1222)

改进权值函数的非局部均值去噪算法 单建华(1227)

图像分析和识别

非相似度保持投影 陈才扣, 侯钰(1232)

非正交二值子空间模板表示的并行生成 杨培, 武港山, 杨扬, 任桐炜(1237)

Adaboost 和随机图划分的无监督图像分类 李巍, 杨素锦, 段晓华(1245)

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 陈炳文, 王文伟, 秦前清(1252)

韦伯-中心环绕结构的图像显著性检测模型 林丽莉, 周文晖(1261)

气象传真图信息提取 李存东, 肖传毅, 潘海朗, 陈日清, 杨劲松(1268)

图像理解和计算机视觉

多要素空间场景相似性匹配模型及应用 宋腾义, 汪闽(1274)

计算机图形学

Delaunay 三角网通用合并算子及分治算法的简化 刘永和, 冯锦明, 郭维栋, 田根, 金毅(1283)

基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割 马亚奇, 李忠科, 赵静(1292)
 断裂面匹配的破碎刚体复原 李群辉, 周明全, 耿国华(1298)

虚拟现实与增强现实

核爆炸外观景象实时模拟 郑涛, 徐晓刚, 邵承永(1305)

医学图像处理

全局脑白质纤维群智能跟踪算法 冯远静, 王哲进, 张贵军, 俞立(1312)

遥感图像处理

对偶四元数线阵遥感影像几何定位 盛庆红, 姬亭, 刘微微, 王惠南(1319)

修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 吴荣华, 杨忠东, 关敏, 李翔翔(1327)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊) 第 17 卷 第 10 期 2012 年 10 月 16 日出版

<p>主管单位 中国科学院</p> <p>主 办 中国科学院遥感应用研究所 中国图象图形学学会 北京应用物理与计算数学研究所</p> <p>主 编 李小文</p> <p>编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会 北京 9718 信箱 邮编 100101 电子信箱:jig@irsa.ac.cn 电话:010-64807995 010-82614429 网 址:www.cjig.cn</p> <p>印刷装订 北京北林印刷厂</p> <p>广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号</p> <p>总 发 行 北京报刊发行局</p> <p>订 购 全国各地邮局</p> <p>国外发行 中国国际图书贸易总公司 (中国国际书店) (北京 399 信箱 邮编 100044)</p>	<p>Superintended by Chinese Academy of Sciences</p> <p>Sponsored by Institute of Remote Sensing Application, CAS China Society of Image and Graphics Institute of Applied Physics and Computational Mathematics</p> <p>Chief editor LI Xiaowen</p> <p>Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China) E-mail:jig@irsa.ac.cn</p> <p>Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals</p> <p>Domestic All Local Post Offices in China</p> <p>Foreign China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)</p> <p>Printed by Beijing Beilin Printing House</p>
--	---

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 10 October 2012

Contents

Review

Overview of tensor valued images interpolation technology Shao Yu, Liu Ying, Sun Fuchun (1197)

Image Processing and Coding

Secure steganography based on modulo and its cyclical characteristic Liao Qinan (1206)

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer
..... Li Yufeng, Feng Xiaoyun, Xu Mingwei, Huang Wenli (1213)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law
..... Liu Li, Zhang Ruijun, Wan Yaping, Huang Xinyang, Peng Fuyuan (1222)

Non-local means denoising algorithm with enhanced weight function Shan Jianhua (1227)

Image Analysis and Recognition

Dissimilarity preserving projection Chen Caikou, Hou Yu (1232)

Parallel algorithm for generating template representation based on non-orthogonal binary subspace
..... Yang Pei, Wu Gangshan, Yang Yang, Ren Tongwei (1237)

Unsupervised image categorization based on Adaboost and stochastic graph partition Li Wei, Yang Sujin, Duan Xiaohua (1245)

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet
..... Chen Bingwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing (1252)

Image saliency detection model with Weber's law based on center-surround structure Lin Lili, Zhou Wenhui (1261)

Information extraction from meteorological facsimile maps
..... Li Cundong, Xiao Chuanyi, Pan Hailang, Chen Riqing, Yang Jinsong (1268)

Image Understanding and Computer Vision

Multi-feature based spatial scene matching model and its application Song Tengyi, Wang Min (1274)

Computer Graphics

Merging planar Delaunay triangulations based on universal operators and the implementation of a divide-conquer algorithm
..... Liu Yonghe, Feng Jinming, Guo Weidong, Tian Gen, Jin Yi (1283)

Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift
..... Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing (1292)

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching Li Qunhui, Zhou Mingquan, Geng Guohua (1298)

Virtual Reality and Augmented Reality

Real-time simulation of nuclear explosion scene Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong (1305)

Medical Image Processing

Global white matter tractography using swarm optimization Feng Yuanjing, Wang Zhejin, Zhang Guijun, Yu Li (1312)

Remote Sensing Image Processing

Geo-positioning line-array CCD images with dual quaternion Sheng Qinghong, Ji Ting, Liu Weiwei, Wang Huinan (1319)

Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix
..... Wu Ronghua, Yang Zhongdong, Guan Min, Li Xiangxiang (1327)

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)10-1298-07

论文引用格式: 李群辉,周明全,耿国华. 断裂面匹配的破碎刚体复原[J]. 中国图象图形学报,2012,17(10):1298-1304.

断裂面匹配的破碎刚体复原

李群辉^{1,2}, 周明全³, 耿国华¹

1. 西北大学信息科学与技术学院, 西安 710069; 2. 长安大学理学院, 西安 710064;
3. 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875

摘要: 提出一种根据断裂面匹配进行破碎刚体复原的算法。首先根据积分不变量采用简单区域生长算法,将碎块表面以棱边为界限分割成多张曲面,根据法矢扰动区分出断裂面和原始面;然后根据断裂面顶点的平均积分不变量是否相近和邻域曲面是否相似,获得少量特征显著的相似点对,其中采用基于相容性约束的方法判断邻域曲面的相似性;之后采用引入三角形相似约束的穷举搜索的方法和投票机制进行断裂面的匹配;最后使用基于回溯的子图融合的方法进行碎块的整体拼合。实验结果表明,该算法能够对较复杂的碎块进行准确的拼接复原。

关键词: 破碎刚体复原;积分不变量;断裂面分割;断裂面匹配;碎块拼合

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching

Li Qunhui^{1,2}, Zhou Mingquan³, Geng Guohua¹

1. School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
2. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
3. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: In this paper, we present a system for automatic reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching. First, the fragments are segmented into a set of surfaces bounded by edge using a region growing strategy according to volume integral invariants, and then these surfaces are classified into the original surfaces and fractured surfaces by computing their perturbation of the normal vectors. Second, a small number of salient matching point pairs are obtained through first comparing feature point's volume integral invariants and then comparing the feature point's neighbor regions based on compatibility constraint. After that, we use exhaustive search method constrained by triangle similarity and voting scheme to match the fractured surfaces. Finally, we employ a sub-graph merging algorithm based on backtracking to merge all matched fragments until the object is reassembled. Experimental results show the algorithm is capable of reassembly of broken 3D solids.

Key words: reassembling fractured objects; integral invariants; fractured surfaces segmentation; fractured surfaces matching; fragments reassembly

0 引言

破碎刚体复原是指将刚体破碎后形成的碎块或碎片进行匹配拼接恢复其完整的形状,对于薄壁类

的碎片,目前主要是根据其轮廓曲线进行匹配复原^[1-2],对于具有一定厚度的碎块,则是根据断裂面进行匹配复原^[3-6],其主要过程是:首先将碎块表面以棱边为界限分割成多张曲面,区分出原始面和断裂面,然后根据断裂面进行碎块配对,计算出配对碎

收稿日期:2012-01-13;修回日期:2012-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61172170);国家重点基础研究发展计划(973)计划前期研究专项(2011CB311802);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC121)

第一作者简介:李群辉(1975—),女,讲师,西北大学计算机软件与理论专业博士研究生,主要研究方向为图形图像处理。E-mail:qhli@chd.edu.cn

块间的 3 维变换,最后将配对的碎块进行整体拼合恢复刚体完整的形状。

关于断裂面的分割,文献[3]根据法矢采用区域生长算法对碎块进行曲面分割,然后利用曲面的深度图像计算曲面的粗糙度,粗糙度大于给定阈值的为断裂面,否则为原始面。该方法以法矢为特征进行曲面分割,对棱边较复杂的情况分割效果不理想。文献[4]使用积分不变量提取碎块的边界曲线进行曲面分割,再根据曲面顶点的法矢扰动定义曲面粗糙度,区分出原始面和断裂面。由于积分不变量能够克服法矢、曲率这些微分特征对噪声敏感的缺点^[7],所以分割效果较好。本文也采用积分不变量进行曲面分割,与文献[4]不同在于,文献[4]采用基于边的方法而本文采用基于面的方法进行分割,因为碎块的棱边较复杂,提取出的边界线误差较大,而且即使真匹配的两个断裂面在边界处也可能会有较大的不同,因此让棱边周围一定范围内的区域不参加后面的曲面匹配,就不需要提取出非常严格准确的边界曲线,所以可以采用快速的简单区域生长算法进行曲面分割。

根据断裂面信息进行碎块的配对,可以参考 3 维曲面匹配和深度图像校准的相关算法,这些算法可以分为粗匹配和细匹配两类。细匹配算法的特点是曲面已处于粗对齐状态,通过迭代求精后收敛到最优对齐位置,最具代表的是最近点迭代(ICP)算法^[8]。粗匹配算法主要解决曲面的对应关系问题,现有算法大多是基于局部几何特征的,即先提取曲面的特征点,得到两个曲面的相似点对,然后通过某种算法得到曲面之间的真实对应关系,将曲面粗略对齐。一般地,低维特征主要有曲率^[9-10]、积分不变量^[4]等,计算速度相对较快,但因为其蕴含的信息量少,所以对顶点的区分度较差,会包含较多的误匹配。高维特征主要有自旋图^[11]、直方图^[12]、多维几何特征^[4,10]等,包含了顶点及其邻域内的多维信息,但是这类特征的计算过程复杂并且耗时。本文给出一种新的将顶点低维特征和其邻域曲面的多维信息相结合的方法,只得到少量特征显著的相似点对,不需要计算所有顶点的多维信息,因此计算速度快,误匹配少。

根据局部特征进行曲面匹配的算法,有几何哈希^[9-10]、聚类算法^[13]、遗传算法^[14]、随机抽样一致性算法^[15]等,由于获得的是少量特征显著的相似点对,因此采取穷举搜索的方法,加入三角形相似的约束条件进行断裂面的匹配,使用投票的方法得到最

优匹配。

在整体拼合阶段,文献[3]采用基于串的回溯和迭代的方法进行整体拼合,文献[4]采用贪婪算法,以子图融合的方式递增地进行整体拼合。本文采用一种简单快速的基于回溯的子图融合方法进行整体拼合。

1 积分不变量的定义

3 维曲面 φ 上一点 p 的积分不变量定义为在 p 的球形邻域内对曲面示性函数进行积分,记为 $V_r(p) = \int_{B_r(p)} g_D(x) dx$,式中, $B_r(p)$ 为以 p 为球心半径为 r 的球体,曲面示性函数 $g_D(x)$ 定义为当点 x 在曲面外侧(或法矢方向)时 $g_D(x) = 1$,当 x 在曲面 φ 内侧(或法矢反方向)时 $g_D(x) = 0$ 。该积分不变量的几何意义为:球 $B_r(p)$ 在曲面外侧部分的体积,也称为体积积分不变量,如图 1 所示,分别为其 3 维和 2 维表示,且当 $V_r(p) = \frac{2\pi r^3}{3}$ 时, p 在半径 r 邻域内为平面顶点,并可以得出, $V_r(p)$ 的值与曲面在点 p 附近的凹凸程度有关,与 r 的大小成正比,且 $B_r(p)$ 内部的噪声点对 $V_r(p)$ 的大小没有影响,可见 $V_r(p)$ 反映了点 p 邻域曲面的凹凸程度,可以进行不同半径尺度的计算,分析不同尺度下曲面的性质,且对噪声具有鲁棒性。文献[7]从理论上详细讨论了其相对于微分性质的鲁棒性和稳定性,并且进一步证明了,当 $r \rightarrow 0$ 时,该积分不变量和平均曲率 H 的关系为: $V_r(p) = \frac{2\pi}{3}r^3 - \frac{\pi H}{4}r^4 + O(r^5)$,可见,积分不变量本质上包含了曲率的信息,但对噪声鲁棒。

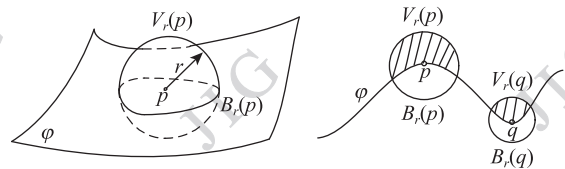


图 1 体积积分不变量

Fig. 1 Volume integral invariants

参考文献[4]中定义曲面光滑度的思想,定义曲面 φ 上任一顶点 p 的凹凸度为

$$S(p) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(V_{r_i}(p) - \frac{2}{3} \pi r_i^3 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, r_i 为半径尺度, 取值为 $r_i = r_{\min} + i \cdot (r_{\max} - r_{\min}) / (N - 1)$, $i = 1, 2, \dots, N$, $N = 8$, r_{\max} 为所有断裂面平均直径的 0.1 倍, $r_{\min} = r_{\max} / 2$ 。如图 2 所示, 阴影部分的体积为对应顶点的凹凸度, 显然, 点的邻域曲面越凹凸不平坦, 其凹凸度越大, 邻域曲面越平坦, 凹凸度越小, 当邻域曲面为平面时, 凹凸度为 0。定义顶点 p 在多尺度 r_i 下的平均体积积分不变量为

$$V(p) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{r_i}(p) \quad (2)$$

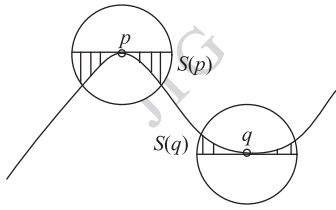


图2 顶点的凹凸度
Fig. 2 Degree of crook

2 断裂面分割

由于曲面交界处顶点的凹凸度大于曲面上顶点的凹凸度^[4], 因此通过比较凹凸度是否大于给定阈值, 采用区域生长算法^[3], 对碎块的外表面进行分割。在选择种子顶点时, 规定其凹凸度小于给定阈值 $T_{\text{seg}} = \frac{1}{5N} \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi r_i^3$, 这样确保总是从曲面点而不是边界点开始搜索每张曲面, 由于规定凹凸度大于给定阈值 T_{seg} 的顶点为边界点, 那么对于曲面上少量凹凸度大于给定阈值 T_{seg} 的点, 也会被当成边界点, 所以分割出的曲面中可能会包含一些较小的曲面, 采用文献[4]中的方法, 将这些小曲面和其周围相邻的曲面进行合并, 然后区分出断裂面和原始面。设待匹配复原的碎块共有 N_{obj} 个, 记为 obj_k , 式中, $k = 1, 2, \dots, N_{\text{obj}}$, 对每一个碎块 obj_k 进行断裂面分割得到若干个断裂面, 记为 $F_{k,m}$, 其中 $m = 1, 2, \dots, N_{k,\text{facets}}$, $N_{k,\text{facets}}$ 表示碎块 obj_k 的断裂面个数。

3 碎块配对

3.1 断裂面相似点对的计算

设 $(F_{k,m}, F_{l,n})$ 为待匹配的断裂面, $F_{k,m} \in \text{obj}_k$, 为碎块 obj_k 的第 m 个断裂面, $F_{l,n} \in \text{obj}_l$, 为碎块 obj_l 的第 n 个断裂面, $k, l = 1, 2, \dots, N_{\text{obj}}$, $k \neq$

l , $m = 1, 2, \dots, N_{k,\text{facets}}$, $n = 1, 2, \dots, N_{l,\text{facets}}$, $N_{k,\text{facets}}$ 和 $N_{l,\text{facets}}$ 分别表示碎块 obj_k 和 obj_l 的断裂面个数。

1) 根据式(1)计算出 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 上每一顶点的凹凸度, 凹凸度大于给定阈值 $T_{\text{bump}} = \frac{1}{10N} \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi r_i^3$ 的为特征点;

2) 找出断裂面 $F_{k,m}$ 中距离边界点大于等于 r_{\max} 的所有特征点, 记为 $L = (p_{k,m}^1, p_{k,m}^2, \dots, p_{k,m}^i, \dots, p_{k,m}^{N_{\text{feature}}})$;

3) 找出 L 中凹凸度最大的特征点, 记为 $p_{k,m}^{i_{\max}}$, 在断裂面 $F_{l,n}$ 中寻找和点 $p_{k,m}^{i_{\max}}$ 的平均体积积分不变量相近的所有特征点, 即满足 $|V(p_{k,m}^{i_{\max}}) - V(p_{l,n}^j)| < \varepsilon_v$ 的所有点 $V(p_{l,n}^j)$, 其中 $\varepsilon_v = \frac{1}{20N} \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi r_i^3$, 如果找到, 记为 $(p_{l,n}^1, p_{l,n}^2, \dots, p_{l,n}^j)$, 转步骤 4), 否则将 $p_{k,m}^{i_{\max}}$ 从 L 中删除, 继续步骤 3);

4) 设以 $p_{k,m}^{i_{\max}}$ 为球心, r_{\max} 为半径的球和断裂面 $F_{k,m}$ 的相交曲面为 $R_{k,m}^i$, 分别以 $(p_{l,n}^1, p_{l,n}^2, \dots, p_{l,n}^j)$ 为球心半径为 r_{\max} 的球和 $F_{l,n}$ 的相交曲面为 $(R_{l,n}^1, R_{l,n}^2, \dots, R_{l,n}^j)$, 使用基于相容性约束的方法比较 $R_{k,m}^i$ 和 $R_{l,n}^j$ 的相似性, $j = 1, 2, \dots, j_i$, 得到 s_i 个相似的局部曲面对, 则两个位于球心的特征点为最终得到的相似点对, 记为 $(p_{k,m}^i, p_{l,n}^j)$, $j = 1, 2, \dots, s_i$, 加入相似点对列表 list 中;

5) 将 $R_{k,m}^i$ 中包含的特征点从 L 中删除, 将 L 中距离 $p_{k,m}^i$ 距离小于 $2r_{\max}$ 的点删除; 如果 L 为空, 则算法结束, 否则转步骤 3)。

算法根据当前凹凸度最大的特征点 $p_{k,m}^{i_{\max}}$, 将曲面 $F_{k,m}$ 分成以多个不同的 $p_{k,m}^{i_{\max}}$ 为中心大小相等互不重叠的局部曲面, 曲面 $F_{l,n}$ 被分成多个大小相等但可能重叠的局部曲面, 其中心为 $p_{k,m}^{i_{\max}}$ 的相似点, 如图 3 所示。算法总是首先寻找当前凹凸度最大的特征点的相似点, 保证最终得到的相似点对具有较显著的特征, 计算相似点对时, 首先比较其多尺度下的平均积分不变量是否相近, 然后再比较其所在局部曲面的相似性, 保证得到的点对可靠性较高。对于 $F_{k,m}$ 中的局部曲面, 由于已经找到其在 $F_{l,n}$ 中的相似局部曲面, 而且因为只要 3 对非线性的匹配点对, 就能将曲面对齐, 所以对于其内部的其他特征点不再寻找相似点对, 减少了搜索的空间, 提高了算法的速度, 但算法可靠性并没有降低。

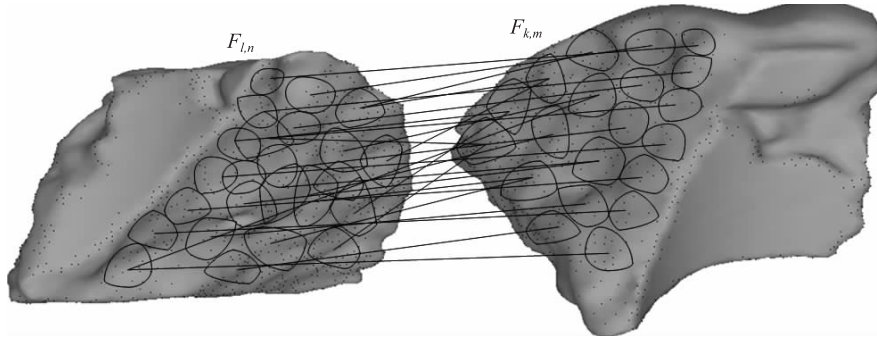


图 3 相似特征点对

Fig. 3 Matching feature point pairs

3.2 基于相容性约束计算曲面局部区域的相似性

关于曲面局部区域的相似性计算,文献[4]根据主成分分析法使用区域的重心、主方向等几何特征组成特征串比较区域的相似性,文献[12]根据区域内顶点的直方图判断区域是否相似,文献[10]使用区域的面积、顶点曲率的标准差等几何特征判断区域是否相似。本文给出一种基于相容性约束判断局部区域相似性的方法,如图 4 所示,设两个局部区域为 $R_{k,m}^i(p_{k,m}^i, p_{k,m}^i, \dots, p_{k,m}^i)$, $R_{l,n}^j(p_{l,n}^j, p_{l,n}^j, \dots, p_{l,n}^j)$, 其中 $p_{k,m}^i, p_{k,m}^i, \dots, p_{k,m}^i, p_{l,n}^j, p_{l,n}^j, \dots, p_{l,n}^j$ 为区域内部的特征点, $p_{k,m}^i, p_{l,n}^j$ 为中心, 如果 $R_{k,m}^i$ 和 $R_{l,n}^j$ 中存在若干对相似点对,且这些相似点对相对于中心点的分布相近,则认为 $R_{k,m}^i$ 和 $R_{l,n}^j$ 相似。

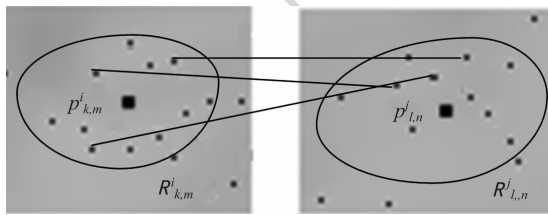


图 4 局部区域的结构

Fig. 4 Structure of surface patches

$R_{k,m}^i$ 和 $R_{l,n}^j$ 中特征点的分布是否相近根据相容性约束^[11]来判断,设 $(p_{k,m}^i, p_{l,n}^j)$ 为 $R_{k,m}^i$ 和 $R_{l,n}^j$ 中的匹配点对,则 1) 距离约束为 $|d_1 - d_2| < \varepsilon_{\text{dist}}$, $d_1 = \|p_{k,m}^i - p_{k,m}^i\|$, $d_2 = \|p_{l,n}^j - p_{l,n}^j\|$, $\varepsilon_{\text{dist}} = 2.5f_{\text{res}}$, f_{res} 为网格精度; 2) 法矢约束为 $|\alpha_1 - \alpha_2| < \varepsilon_n$, $\alpha_1 = n_{k,m}^i \cdot n_{k,m}^i$, $\alpha_2 = n_{l,n}^j \cdot n_{l,n}^j$, 由于 $-1 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 1$, 故 $0 \leq |\alpha_1 - \alpha_2| \leq 2$, 文中设 $\varepsilon_n = 1$; 3) 唯一性约束为特征点之间不存在一对多或多对多的关系, 即不存在 $p_{k,m}^i = p_{k,m}^i$ 而 $p_{l,n}^j \neq p_{l,n}^j$, 或 $p_{l,n}^j = p_{l,n}^j$ 而

$p_{k,m}^i \neq p_{k,m}^i$ 的情况。图 4 中,局部区域 $R_{k,m}^i$ 和 $R_{l,n}^j$ 中只有 3 对相似的特征点对,且它们相对于各自的中心 $p_{k,m}^i$ 和 $p_{l,n}^j$ 的分布差别较大,所以两个区域不相似,中心特征点 $p_{k,m}^i$ 和 $p_{l,n}^j$ 不是相似点对。

3.3 断裂面匹配

因为获得的是少量特征显著的相似点对,而且只要 3 对非线性的匹配点对,就能确定曲面间的转换矩阵,将曲面对齐,所以采取穷举搜索的方法,加入三角形相似的约束条件,使用投票的方法根据列表 *list* 中的点对进行断裂面的匹配。算法如下:

1) 对于相似点对列表 *list* 中的任意 3 个不共线的相似点对 $(p_{k,m}^0, p_{l,n}^0)$, $(p_{k,m}^1, p_{l,n}^1)$, $(p_{k,m}^2, p_{l,n}^2)$, 判断 $\Delta p_{k,m}^0 p_{k,m}^1 p_{k,m}^2$ 和 $\Delta p_{l,n}^0 p_{l,n}^1 p_{l,n}^2$ 是否相似,如果不相似,说明这 3 个点对中存在错误的匹配,需要重新选择另外 3 个点对,否则转步骤 2);

2) 根据 $(p_{k,m}^0, p_{l,n}^0)$, $(p_{k,m}^1, p_{l,n}^1)$, $(p_{k,m}^2, p_{l,n}^2)$ 计算出曲面 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 之间的 3 维变换 T_c ^[13];

3) 计算 *list* 中其余的相似点对 $(p_{k,m}^i, p_{l,n}^i)$ 在变换 T_c 下是否为正确匹配,即如果 $\|T_c(p_{l,n}^i) - p_{k,m}^i\| < \varepsilon_{\text{match}}$, 则为正确匹配,否则为错误匹配,阈值 $\varepsilon_{\text{match}} = 0.01$, 正确匹配的点对数记为 $\text{score}(T_c)$;

4) 重复以上 3 步,直到遍历完 *list* 中所有不共线的 3 个匹配点对;

5) 最佳变换 T_{opt} 为所有变换中得分最高的变换,即满足 $\text{score}(T_{\text{opt}}) = \max(\text{score}(T_c))$, $c = 1, 2, \dots, \text{num}$, num 为 3 维变换的个数;

6) 计算在此最优变换下,曲面 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 的曲面匹配误差,如果该曲面匹配误差小于给定阈值 $\varepsilon_{\text{error}} = 0.01$, 说明两个曲面匹配,否则不匹配。

判断 $\Delta p_{k,m}^0 p_{k,m}^1 p_{k,m}^2$ 和 $\Delta p_{l,n}^0 p_{l,n}^1 p_{l,n}^2$ 是否相似的方法是,3 条边的长度是否相近和 3 个内角的大小是

否相近,定义

$$DT = \frac{1}{3} \sum_{0 \leq i < j \leq 2} \frac{|\|P_{k,m}^i P_{k,m}^j\| - \|P_{l,n}^i P_{l,n}^j\||}{\|P_{k,m}^i P_{k,m}^j\| + \|P_{l,n}^i P_{l,n}^j\|}$$

用来描述对应3边的相似程度,定义

$$DA = \frac{1}{3} \sum_{0 \leq i, j, k \leq 2} \frac{|\angle P_{k,m}^i P_{k,m}^j P_{k,m}^k - \angle P_{l,n}^i P_{l,n}^j P_{l,n}^k|}{\angle P_{k,m}^i P_{k,m}^j P_{k,m}^k + \angle P_{l,n}^i P_{l,n}^j P_{l,n}^k}$$

用来描述3个对应内角的相似程度,式中,

$j = (i + 1) \bmod 3, k = (j + 1) \bmod 3$,如果 $DT < \varepsilon_t$ 和 $DA < \varepsilon_a$ 表明两个三角形相似,式中 $\varepsilon_t = 0.1$, $\varepsilon_a = \pi/36$ 。

曲面 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 曲面匹配误差的计算方法如下:

1)对于曲面 $F_{k,m}$ 上每一个网格顶点 $p_{k,m}^i$,根据式(2)计算出平均积分不变量 $V(p_{k,m}^i)$,在 $F_{l,n}$ 中找出所有和 $p_{k,m}^i$ 的平均积分不变量相近的点 $(p_{l,n}^j, \dots, p_{l,n}^{j_i})$,即 $|V(p_{k,m}^i) - V(p_{l,n}^j)| < \varepsilon_v$,式中 $j = j_1, \dots, j_i$;

2)通过变换 T 将曲面 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 对齐;

3)找出每一个 $p_{k,m}^i$ 在对应点集 $(p_{l,n}^j, \dots, p_{l,n}^{j_i})$ 中距离最近的点 $p_{l,n}^{j_{\min}}$,即满足 $\|p_{k,m}^i - p_{l,n}^{j_{\min}}\| = \min(\|p_{k,m}^i - p_{l,n}^j\|), j = j_1, \dots, j_i$;

4)定义曲面 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 的曲面匹配误差^[3]为 $error(F_{k,m}, F_{l,n}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|p_{k,m}^i - p_{l,n}^{j_{\min}}\|$,式中, M 表示 $F_{k,m}$ 和 $F_{l,n}$ 之间的对应顶点数,如果 $error(F_{k,m}, F_{l,n}) < \varepsilon_{error}$,表明两曲面匹配,阈值 $\varepsilon_{error} = 0.01$ 。

4 碎块的整体拼合

假设给定的碎块能组装成一个整体,即不存在孤立无法拼接的碎块。允许碎块间存在着一对多的匹配关系,这可能是因为:1)一个碎块有多个断裂面,相应的就会有多个不同的匹配碎块;2)同一个断裂面的不同部分对应不同的断裂面;3)存在误匹配。在这样的条件下,定义图 $G(V, E)$ 为碎块间的匹配关系图,图 G 的每个顶点 v_i 表示一个碎块,图 G 的每一条边 e_{ij} 表示碎块 v_i 和 v_j 间存在一个匹配关系,定义边 e_{ij} 的属性为 $(F_{i,m}, F_{j,n}, T(e_{ij}))$,表示碎块 v_i 的断裂面 $F_{i,m}$ 和碎块 v_j 的断裂面 $F_{j,n}$ 间存在匹配关系,3维变换为 $T(e_{ij})$,定义边 e_{ij} 的权值为 $w(e_{ij})$,表示断裂面 $F_{i,m}$ 和 $F_{j,n}$ 间的匹配误差。算法开始时将图 G 的每一个顶点看成一个子图 G_i , $i = 1, 2, \dots, N_{obj}$,构成子图集合 S ,然后经过多次子图合并,将 S 中的子图合并为一个子图,该子图包含

N_{obj} 个顶点。具体过程为

1)设 S 中当前共有 n 个子图,则子图对有 C_n^2 个,设其中有边连接的子图对有 m 个,如果 $m = 0$,说明没有可以合并的子图,转步骤3)进行回溯,否则在这 m 个子图对中选择匹配误差最小的子图对,记为 G_1 和 G_2 。

2)如果 G_1 和 G_2 的匹配断裂面没有通过碰撞检测^[3],则将 G_1 和 G_2 间对应的边从 E 中删除,重新选择 G_1 和 G_2 ,否则将 G_1 和 G_2 合并生成新的子图,记为 G_{12} ,加入当前子图集合 S 中,同时将 G_1 和 G_2 从 S 中删除;如果 S 中只剩下1个子图,算法结束,否则转步骤1)。

3)将最近加入到 S 中的合并子图 G_{12} 还原,即将相应的 G_1 和 G_2 加入 S 中,同时将 G_{12} 从 S 中删除,重新选择 G_1 和 G_2 ,转步骤2)。

5 实验结果和分析

用 Vienna University of Technology 进行破碎物体复原的部分实验数据^[16]验证本文算法,原始数据是用3维扫描仪扫描得到的点云数据,首先对其进行了三角网格优化剖分。实验结果如图5—图6所示,断裂面分割结果中,浅灰色曲面为原始面,深色曲面为断裂面。

实验结果表明,本文算法能正确地分割出断裂面和原始面,但是对于边界较复杂的碎块,边界处会有一定的误差,因为边界附近的区域不参加后面的曲面匹配,所以并不影响整个算法的结果。

碎块配对算法能找到绝大多数真匹配碎块,且拼合效果较准确,但也存在少量的误匹配。图5(a)中所示的6个碎块,共找到配对碎块9对,其中,碎块对1-2、1-3、4-5、4-6和5-6中匹配的两个断裂面为完全匹配,碎块对1-4和2-5为部分-完全匹配,而碎块对2-4为部分-部分的匹配。碎块对1-5为误匹配,但在整体拼合阶段,通过碰撞检测会排除掉该误匹配,使得碎块能够正确拼合。

用 Visual C++ 和 OpenGL 编程,在 CPU 为 Pentium(R)/2.0 GHz,内存为 1.0 GB 的 PC 机上实现了本文算法,图5(a)中的6个碎块在断裂面分割阶段耗时 1.3 s,特征提取和碎块配对阶段耗时 2.2 s,整体拼合阶段耗时 3.3 s,整个过程耗时 6.8 s。

本文算法和文献[3,5]相比较能实现更复杂碎块的匹配和拼接,文献[3,5]只能实现碎块间的完

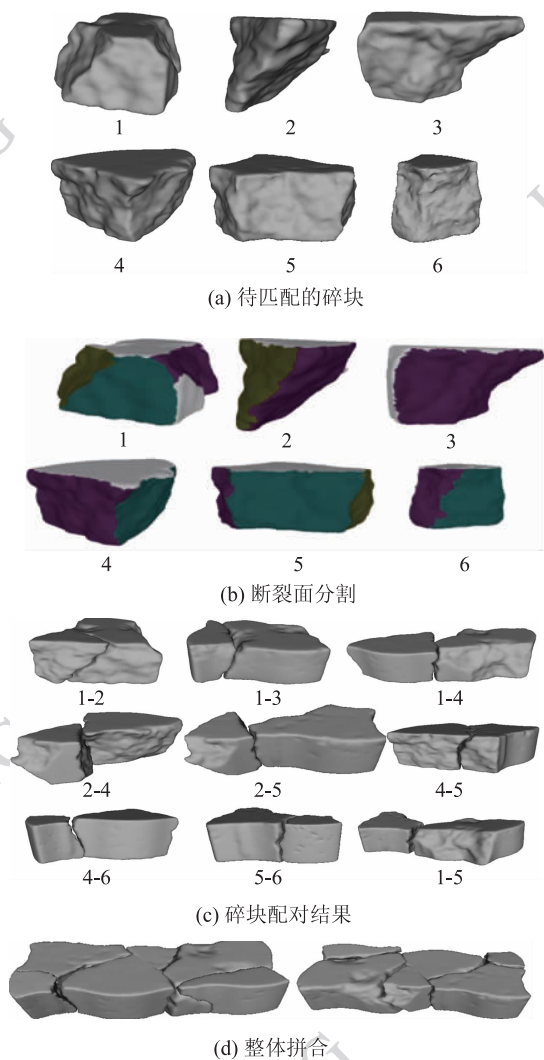


图 5 brick 碎块的复原

Fig. 5 Reassembling a fractured brick model

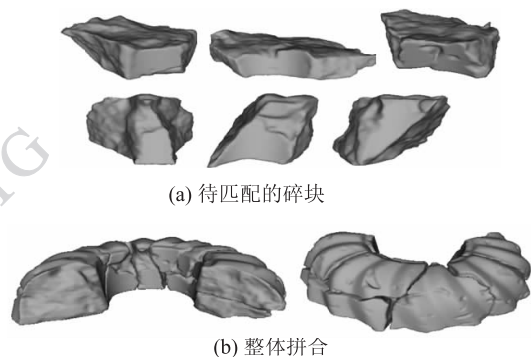


图 6 cake 碎块的复原

Fig. 6 Reassembling a fractured cake model

全匹配,不能实现部分匹配。文献[3]采用基于串的整体拼合的方法,当碎块配对阶段有误匹配时,有可能得不到正确的整体拼合结果。

本文算法和文献[4]的算法相比,两个算法都能实现较复杂碎块的匹配复原,但因为本文在断裂面分割阶段采用了快速的区域生长算法,不需要处理复杂的边界信息,在碎块配对阶段使用了一种新的匹配算法,只提取出少量特征显著的相似点对,大大减少了匹配的搜索空间,在整体拼合阶段,使用了一种简单快速的子图融合的拼合算法,因此整个算法速度较快。文献[4]在 CPU 为 1.4 GHz,内存为 512 MB 的 PC 机上,使用图 5(a)中的 6 个碎块测试其算法,断裂面分割和特征提取共耗时 4 s,碎块配对耗时 2 s,整体拼合耗时 5 s,整个过程耗时 11 s。本文和文献[4]的以上执行时间均不包含每个顶点在多尺度下的积分不变量的计算,因为两文采用的是同样的计算方法^[7],因此耗时相同。

6 结 论

本文给出的破碎刚体复原算法,使用积分不变量进行断裂面分割和匹配,避免了传统微分方法对噪声敏感的缺点,算法鲁棒性好,采用将特征点和断裂面分块相结合的方法寻找相似点对,不需要搜索所有特征点空间,获取的相似点对数量少且可靠性高,使用引入了三角形相似约束的穷举搜索的方法和投票机制寻找最优匹配,能够实现断裂面的部分和完全匹配,且正确率较高,但碎块的拼合算法具有一定的局限性,当碎块数量较大有较多误匹配时,可能会出现错误的拼合结果,这是算法下一步需要改进之处。

参考文献(References)

- [1] Cohen F, Taslidere E, Liu Z X, et al. Virtual reconstruction of archaeological vessels using expert priors & surface markings [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA: IEEE Computer Society, 2010: 7-14.
- [2] Zhou S C. On mosaicing of 3D complex shape and restoration of fragmented objects [D]. Xi' an: Northwest University, 2007: 52-73. [周术诚. 3 维复杂形状拼接与破碎物体复原技术研究 [D]. 西安: 西北大学, 2007: 52-73.]
- [3] Papaioannou G, Karabassi E A, Theoharis T. Virtual archaeologist: Assembling the past [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(2): 53-59.
- [4] 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.

- [5] Winkelbach S, Friedrich M. Pairwise matching of 3D fragments using cluster trees [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 78(1) : 1-13.
- [6] Wang J. Research on key technology of irregular fragments re-assembly [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 61-80. [王坚. 非规则碎片拼合关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 61-80.]
- [7] Pottmann H, Huang Q X, Yang Y L. Integral invariants for robust geometry processing [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2009, 26(1) : 37-60.
- [8] Besl P, McKay N D. A method for registration of 3D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2) : 239-256.
- [9] Pan X L, Zhang L Y, Jie Y W, et al. Algorithm for three-dimensional partial surface matching [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 36(5) : 544-549. [潘小林, 张丽艳, 揭裕文, 等. 3 维曲面部分匹配的算法研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(5) : 544-549.]
- [10] Ran G, Daniel C. Salient geometric features for partial shape matching and similarity [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(1) : 130-150.
- [11] Wang J, Zhou L S. Surface rough matching algorithm based on maximum weight clique [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(2) : 167-173. [王坚, 周来水. 基于最大权团的曲面粗匹配算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2) : 167-173.]
- [12] Aguiar C S R, Druon S, Crosnier A. Pairwise region-based scan alignment [C] // *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*. czech St. Louis, USA: IEEE Computer Society, 2009: 4047-4053.
- [13] Xiao G, Ong S H, Foong K W C. Efficient partial-surface registration for 3D objects [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2005, 98(2) : 271-294.
- [14] Wang J, Zhou L S, Zhang L Y, et al. Surface matching based on genetic algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(4) : 695-699. [王坚, 周来水, 张丽艳, 等. 基于遗传算法的曲面匹配 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(4) : 695-699.]
- [15] Yang S, Qi Y, Shen X K, et al. Rapid and automatic method for 3D scanned data registration [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(6) : 1438-1450. [杨琴, 齐越, 沈旭昆, 等. 一种快速的 3 维扫描数据自动配准方法 [J]. 软件学报, 2010, (21)6: 1438-1450.]
- [16] Huang Q X. 3D Puzzles-Reassembling fractured objects by geometric matching [EB/OL]. [2010-11-29]. [http://www. geometry. tuwien. ac. at/ig/3dpuzzles. html](http://www.geometry.tuwien.ac.at/ig/3dpuzzles.html).