



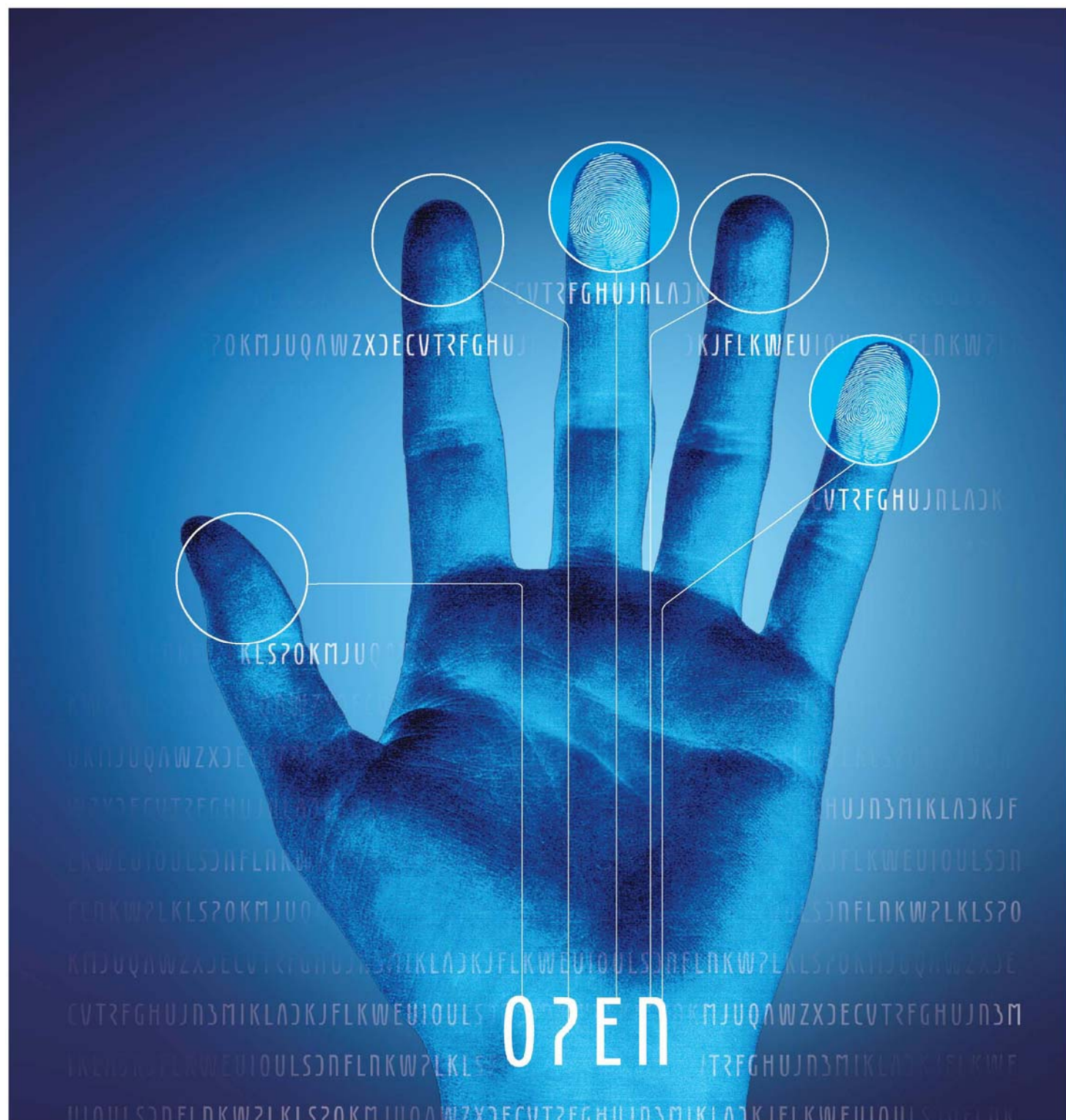
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
07
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第18卷第7期（总第207期）

2013年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。本刊所有图片均为非商业目的使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 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

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

（中国国际书店，邮政信箱：北京399信箱 邮编：100044）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100044, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

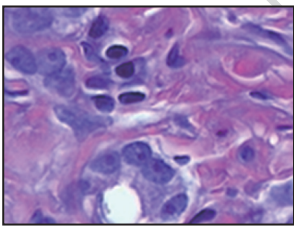
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

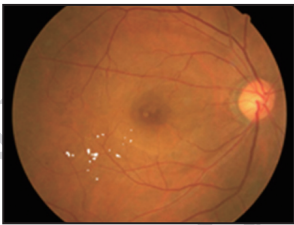
国内定价 50.00元



彩色纹理图像恢复的非局部TV模型 (第753页)



基于Nyström密度值逼近的减法聚类 (第790页)



RBF神经网络和阈值分割实现视网膜硬性渗出自动检测 (第859页)

图像处理和编码

各向异性的均衡化网状扩散模型 熊辉, 赖剑煌	731
特征提取和匹配的图像倾斜校正 钟金荣, 杜奇才, 刘炎, 林嘉宇	738
先进边界区分噪声检测的改进算法 祁冰露, 黄宴委, 陈少斌	746
彩色纹理图像恢复的非局部TV模型 端金鸣, 潘振宽, 台雪成	753
相似性约束的视频超分辨率重建 张义轮, 干宗良, 朱秀昌	761

图像分析和识别

低质量指纹图像方向场提取 卞维新, 徐德琴, 俞庆英	768
方向微分分块统计的运动模糊方向鉴别 李均利, 储诚曦	776
参数自适应的KPCA先验形状约束目标分割 沈霁, 李元祥, 周则明	783
基于Nyström密度值逼近的减法聚类 孙志海, 孔万增	790
空间目标检测序列图像中恒星目标抑制 黄宗福, 孙刚, 陈曾平	799

图像理解和计算机视觉

人体动作的超兴趣点特征表述及识别 王扬扬, 李一波, 姬晓飞	805
轮廓编组中的线索合并模型 王娇, 罗四维, 钟晶晶, 邹琪	813
全局图像特征分析与实时层次化消失点检测 孙愿, 卢鸿波, 张志敏	818
彩色图像特征捆绑的自动模型构建 徐洁, 邓红霞, 李海芳	829

计算机图形学

偏离映射的烙画风格绘制 钱文华, 徐丹, 岳昆, 官铮, 普园媛	836
点云模型法矢调整优化算法 孙金虎, 周来水, 安鲁陵	844

医学图像处理

基于惩罚最大似然优化模型的各向异性约束磁共振成像方法 邓梁, 史仪凯, 张均田	852
RBF神经网络和阈值分割实现视网膜硬性渗出自动检测 高玮玮, 沈建新, 王玉亮	859

遥感图像处理

衡量结构保持性能的SAR图像去噪质量评价 唐益明, 杨学志	866
地面LiDAR数据中建筑轮廓和角点提取 童礼华, 程亮, 李满春, 陈焱明, 王亚飞, 张雯	876

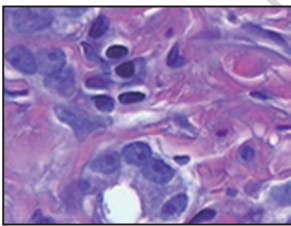
《中国图象图形学报》论文摘要写作要求	884
--------------------	-----

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Non-Local TV models for restoration of color texture images (P753)



Density value approximation for subtractive clustering based on Nyström method (P790)



Automatic detection of hard exudates based on RBF neural network and threshold segmentation (P859)

Image Processing and Coding

Equalized net diffusion model based on the anisotropy diffusion Xiong Hui, Lai Jianhuang	731
Robust method of skew correction based on feature points matching Zhong Jinrong, Du Qidai, Liu Ying, Lin Jiayu	738
Modification of advanced boundary discriminative noise detection algorithm Qi Binglu, Huang Yanwei, Chen Shaobin	746
Non-Local TV models for restoration of color texture images Duan Jinming, Pan Zhenkuan, Tai Xuecheng	753
Video super-resolution method based on similarity constraints Zhang Yilun, Gan Zongliang, Zhu Xiuchang	761

Image Analysis and Recognition

The orientation field extraction method for low quality fingerprints Bian Weixin, Xu Deqin, Yu Qingying	768
Identification of motion blur direction from motion blurred image by directional derivation and block statistics Li Junli, Chu Chengxi	776
Shape prior constrained KPCA object segmentation with parameter adaption Shen Ji, Li Yuanxiang, Zhou Zeming	783
Density value approximation for subtractive clustering based on Nyström method Sun Zhihai, Kong Wanzeng	790
Stellar targets suppression in image sequences for space targets detection Huang Zongfu, Sun Gang, Chen Zengping	799

Image Understanding and Computer Vision

Human action recognition based on super-interest points features Wang Yangyang, Li Yibo, Ji Xiaofei	805
Cue combination model for contour grouping Wang Jiao, Luo Siwei, Zhong Jingjing, Zou Qi	813
Hierarchical real-time vanishing point detection based on holistic image feature Sun Yuan, Lu Hongbo, Zhang Zhimin	818
Construction of the automatic model for feature binding of color image Xu Jie, Deng Hongxia, Li Haifang	829

Computer Graphics

Rendering pyrography style painting based on deviation mapping Qian Wenhua, Xu Dan, Yue Kun, Guan Zheng, Pu Yuanyuan	836
Optimal algorithm for normal adjustment of point clouds Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling	844

Medical Image Processing

Anisotropically constrained MR imaging based on penalized maximum likelihood optimality model Deng Liang, Shi Yikai, Zhang Juntian	852
Automatic detection of hard exudates based on RBF neural network and threshold segmentation Gao Weiwei, Shen Jianxin, Wang Yuliang	859

Remote Sensing Image Processing

Image quality assessment of SAR image despeckling for measuring structure-preserving capability Tang Yiming, Yang Xuezhi	866
Extraction of building contours and corners from terrestrial LiDAR data Tong Lihua, Cheng Liang, Li Manchun, Chen Yanming, Wang Yafei, Zhang Wen	876

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)07-0844-08

论文引用格式: 孙金虎, 周来水, 安鲁陵. 点云模型法矢调整优化算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(7): 844-851. [DOI: 10.11834/jig.20130711]

点云模型法矢调整优化算法

孙金虎, 周来水, 安鲁陵

南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;
江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016

摘要: 点云中存在奇异情况时, 采用最小生成树法进行法矢调整会出现错误, 而采用曲面重建方法运算效率又较低, 为此提出一种点云模型法矢调整的优化算法。算法分别处理薄壁特征、垂直法向和相邻曲面 3 种奇异情况。对薄壁特征, 算法提取特征点并在该处强制进行法矢取反; 对垂直法向, 算法通过扩大邻域搜索范围来获得法矢变化趋势; 对相邻曲面, 算法在 K 邻域中剔除歧义邻域点, 避免在最小生成树中生成错误边。实验结果表明, 该算法在点云中存在奇异情况时能够进行正确的法矢调整, 并且相较于曲面重建方法具有较高的效率。

关键词: 点云; 法矢调整; 最小生成树; K 邻域; 曲面重建

Optimal algorithm for normal adjustment of point clouds

Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China

Abstract: When abnormal conditions occur in point clouds, the normal adjustment may have erroneous results when using the minimum spanning tree algorithm, while the efficiency is low when using the surface reconstruction algorithm. In order to solve this problem, an optimal algorithm for normal adjustment of point cloud is proposed. It deals with three abnormal conditions separately. For the thin feature condition, it extracts feature points and reverses orientations compulsively. For the perpendicular normal condition, the neighboring region is expanded to get the tendency of the normal. For close-by surfaces condition, ambiguous neighbors are removed from the K-nearest neighbors to avoid creating an erroneous minimum spanning tree edge. Experiments show that the algorithm can adjust the normals correctly even when such abnormal conditions exist. Compared with surface reconstruction algorithm, the algorithm can adjust the normals more efficiently.

Key words: point cloud; normal adjustment; minimum spanning tree; K-nearest neighbors; surface reconstruction

0 引言

点云模型的法矢是进行点云模型绘制、光顺以及曲面重建等数据处理的基础, 正确估算点云的法矢至关重要。目前点云法矢的估算主要采用协方差分析法^[1], 该方法对各点的邻域拟合微切平面, 将

微切平面的法矢作为该点的法矢。但估算出的法矢部分指向点云曲面的一侧, 部分指向另一侧, 为了便于后续的数据处理, 需要对法矢方向进行调整, 使得所有点的法矢都指向点云曲面的同一侧, 该过程称为点云的法矢调整。

现有的法矢调整算法主要包括 3 类: 最小生成树法^[1-6]、光度立体视觉法^[7-8]以及曲面重建法^[9-11]。

收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2012-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875126); 江苏省高校优势学科建设工程

第一作者简介: 孙金虎(1983—), 男, 南京航空航天大学航空宇航制造工程专业在读博士研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM、逆向工程。E-mail: jinhu_sun@163.com

最小生成树法是最先提出也是应用最为广泛的法矢调整算法。算法首先确定一个种子点, 然后沿着一个较平坦的路径来遍历点云的最小生成树(MST), 调整路径上点的法矢, 使得相邻点的法矢内积为正。算法最先由 Hoppe 等人^[1]于 1992 年提出, 但存在运算效率较低、不适于处理大规模点云等问题, 为此, 学者们提出了许多改进方法, 旨在提高 MST 的生成效率, 实现方法包括 Riemannian 图^[2]、点云分块^[3]、区分“平坦点”和“非平坦点”^[4,6]、提取传播边界^[5,6]等。光度立体视觉法利用光照几何和曲面反射等先验知识来计算曲面法向, 曲面上一点的法向通过 3 个或 3 个以上的光源照射来确定, 但算法易受镜面反射、材料伪影以及相互遮挡的影响, 稳定性较差。曲面重建法首先利用局部优化投影^[9](LOP)、自适应球面覆盖^[10](ASC)、自组织神经网络^[11](SOM)等方法对原始点云进行重采样, 得到原始点云的均匀分布近似结构, 如粒子系统^[9]、三角网格^[10-11]等, 接着计算近似结构的法矢, 最后由近似结构的法矢来调整原始点云的法矢。曲面重建法能够对具有相邻曲面、薄壁特征等奇异情况的点云进行正确的法矢调整, 但算法中模型重采样和近似结构的法矢计算都是曲面重建的必要步骤, 耗时较多。

本文研究含有奇异情况的点云的法矢调整。现有的 MST 法没有解决该问题, 而曲面重建法虽然解决了该问题但运算效率较低, 本文算法通过对现有 MST 法的修改来确保法矢能够正确调整, 同时由于采用的是 MST 法, 具有较高的效率。

1 本文算法

1.1 问题描述

MST 法^[1-6]将点云模型划分为法矢已调整的点集 U 和未调整的点集 W 两部分, 然后在 U 和 W 之间选取权值最小的两点(u, w)来进行法矢传播, 点 w 的法矢方向由 u 的法矢方向来确定, 确保两者之间法矢方向不发生突变。权值的选取方式决定了法矢传播的方向, 如 Hoppe 等人^[1]将权值设为 $1 - |\mathbf{n}_u \cdot \mathbf{n}_w| = 1 - |\cos \alpha|$, $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ]$ 为两点 u 和 w 法矢所在直线之间的夹角, 表明法矢传播会沿着法向变化最为平缓的区域进行。实际实现时, 算法首先提取一种子点, 确保该点的法矢方向正确, 然后沿着权值最小的方向进行传播, 每传播到一个新的点

就按照法矢方向不发生突变的原则对新点的法矢进行修改并更新点集 U 和 W , 依次进行直到遍历完所有点, 此时所有点的法矢都进行了调整。整个遍历过程形成一个包含所有点并且边的权值总和最小的树, 该树称为 MST, 因此该算法称为 MST 法, 传播方向上的两点 u 和 w 构成 MST 的一条边。

MST 法能够对大部分点云进行正确的法矢调整, 但是当点云中存在一些奇异情况时法矢调整结果会发生错误。点云中的奇异情况主要包括 3 类: 相邻曲面、薄壁特征以及垂直法向, 如图 1 所示, 图中带箭头的实线表示法矢方向, 带箭头的虚线表示 MST 的传播方向, 由图 1 可知 3 种情况下都出现了法矢方向错误。分析出错原因, 相邻曲面是由于法矢传播未能沿着点云表面进行, 薄壁特征问题是由于特征点附近法矢应该发生突变而 MST 法抑制法矢突变, 而垂直法向问题是法矢突变与不突变的临界位置, 需单独考虑。3 种奇异情况中, 图 1(b) 薄壁特征通常在点云中存在薄壁结构或者细小缝隙时才会出现, 薄壁特征的周围通常会伴随出现相邻曲面的情况, 点云在薄壁特征处法矢方向会发生突变。采用 MST 法只能得到错误结果, 需要对特征点进行提取, 然后在相邻面间强制性地法矢取反, 具体见文献^[9]。这里主要研究如何解决相邻曲面和垂直法向导致的法矢错误调整问题。

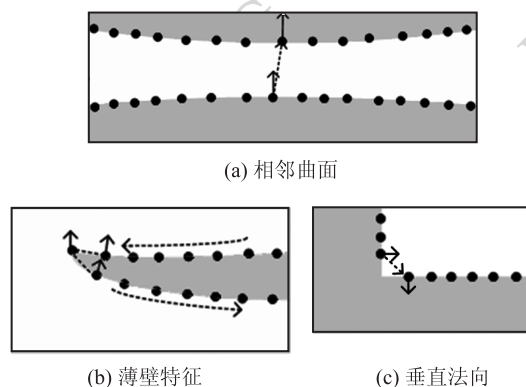


图 1 法矢调整中的奇异情况

Fig. 1 Abnormal conditions in normal adjustment

1.2 算法流程

算法对垂直法向和相邻曲面分别进行处理, 处理过程都是对传统 MST 法进行修改。基于效率考虑, 传统 MST 法选用文献^[6]的方法。根据对两种奇异情况处理的先后顺序, 算法存在两种流程: 先处理垂直法向后处理相邻曲面, 先处理相邻曲面后处

理垂直法向,如图2所示,其中图2(a)为点云模型,图2(b)(c)为对法矢调整结果采用径向基函数(RBF)进行曲面重建^[12]后的效果,未直接显示法矢调整结果是因为法矢调整结果不易观察,图2(b)(c)中的3个图依次表示了传统MST算法结果、

第1次处理后的结果以及第2次处理后的结果。由图2可知,两种奇异情况处理的先后顺序不会影响算法的最终结果,因此算法对两种奇异情况的处理具有完全的独立性,在处理某种奇异情况时不需考虑其他奇异情况对本次处理的影响。



图2 奇异情况处理的算法流程

Fig. 2 The procedure of solving abnormal conditions

1.3 垂直法向的处理

垂直法向通常发生在垂直连接的两块子点云之间,垂直法向能导致相邻的两块子点云法矢方向完全相反,如图3(a)所示将改锥点云模型分割为5块子点云,相邻的两个子点云在交接处互相垂直,对整块点云模型进行法矢调整时,初始点选在平坦区域子点云2中,保证了子点云2的法矢方向正确,应用传统MST算法进行法矢传播,最终会发现子点云2、4法向正确,指向点云曲面的外部,而子点云1、3、5法向错误,均指向点云曲面的内部。体现在曲面重建后的模型上(如图3(b)所示),与正确的曲面重建效果(见图2(c)的最右侧图)相比,子点云2、4处正确反应了曲面的形状,而子点云1、3、5处均发生错误,点云1处生成了无穷远曲面,点云3处由光

滑曲面变成凹凸不平的曲面,点云5处模型由平底变成了凸底。分析垂直法向问题(见图3(c)),假定MST的当前边为 uw ,两端点法矢互相垂直,法矢内积为0,导致 w 的法矢可以保持原有方向也可以进行反向,有一半的可能性发生法向错误。解决方法是增大 w 的邻域范围,得到 w 的法矢变化趋势,见图3(d)。通常将邻域由 K 邻域增大到 $2K$ 邻域,重新计算 w 点的法矢 n_w^1 ,新的法矢 n_w^1 与原有法矢 n_w 存在一定夹角,然后根据 u 的法向来确定新法矢 n_w^1 的方向,最后在 n_w 和 $-n_w$ 中选取与 n_w^1 夹角较小的向量作为 w 的最终法矢。

1.4 相邻曲面的处理

点云中存在两个或多个曲面非常靠近时,法矢调整通常会发生错误,产生错误的原因是点云的 K 邻域中含有歧义邻域点。如图4所示, p_i 点为当前点, $N_k(p_i)$ 为 p_i 的 K 邻域,点 $r_j(j=0,1,\dots,t; 0 \leq t \leq K)$ 为 p_i 的邻域点并且与 p_i 分属于两个不同的曲

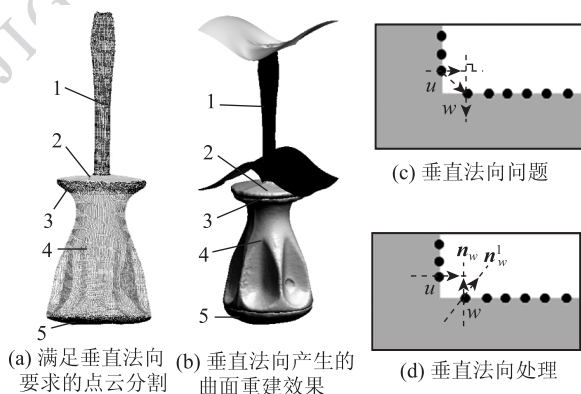


图3 垂直法向及其处理方法

Fig. 3 Perpendicular normals and its solution

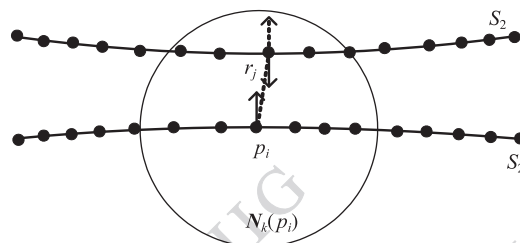


图4 歧义邻域点

Fig. 4 The ambiguous neighbors

面 S_2 和 S_1 , 称为歧义邻域点。在 MST 法中, 若 $p_i r_j$ 构成 MST 上的一条边, 则由 p_i 点法向计算出的 r_j 点法向(向上, 图 4 中虚线所示)与 r_j 点实际法向(向下, 图 4 中实线所示)不一致, 法矢出现了错误调整。通常 MST 的当前边起点为 p_i 点, 终点在 p_i 点的 K 邻域中进行查找, 为避免 $p_i r_j$ 成为 MST 上的边, 需要将点 r_j 从 p_i 的 K 邻域中剔除。

分析 r_j 点的特性, 可得: 1) r_j 与 p_i 分别位于两个不同的曲面 S_2 和 S_1 中, 导致 r_j 与 p_i 的距离较大; 2) 与切向相比, r_j 更偏向于 p_i 点的法向。这两个特性引出剔除歧义邻域点 r_j 的两种思路: 邻域增长法和法向距离法。为更好地剔除歧义邻域点, 将邻域增长法和法向距离法进行组合。

1) 邻域增长法。点云模型的歧义邻域点 r_j 与当前点 p_i 分别位于两个不同的曲面 S_1 和 S_2 中, 通常 S_1 和 S_2 会相隔较大的距离, 导致 r_j 与 p_i 的距离也较大, 若对 p_i 的 K 邻域按到 p_i 的距离从小到大进行排序, 则 r_j 会位于 K 邻域中比较靠后的位置, 因此减小邻域点的数目就能减少出现歧义邻域点的可能性, 减至一定程度就可能不会出现歧义邻域点, 这正是邻域增长法的原理。算法假定邻域点的数目减小到 m 个 ($1 \leq m \leq K$) 时所有点的邻域点集中都不会出现歧义邻域点, 此时, 为了在 K 邻域中剔除歧义邻域点, 算法会从 p_i 的 m 邻域出发, 沿着曲面 S_1 逐环地向外增长, 并且确保增长过程不与曲面 S_2 相交, 这样得到的点集就剔除了歧义邻域点, 增长过程如图 5 所示。具体实现如下: 首先计算 p_i 的 m 邻域 $N_m(p_i) = \{p_{ij} : p_{ij} \text{ 是距离 } p_i \text{ 最近的 } m \text{ 个点中的一点}\}$, 然后递归地增长 $\tilde{N}_m(p_i) \leftarrow \tilde{N}_m(p_i) \cup \tilde{N}_m(p_{ij})$, 其中 $\tilde{N}_m(p_{ij}) = \{\tilde{p}_{ij} : \tilde{p}_{ij} \in N_K(p_i) \wedge \tilde{p}_{ij} \in N_m(p_{ij}) \wedge \tilde{p}_{ij} \notin \tilde{N}_m(p_i)\}$, 直至 $\tilde{N}_m(p_{ij}) = \emptyset$ 时为止。邻域增长法在 $m \geq K$ 时无效, 本文中 K 取 20。

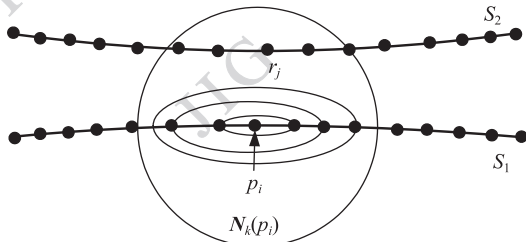


图 5 邻域增长法

Fig. 5 The neighbor growth method

2) 法向距离法。法向距离法主要考虑法矢传播方向与点的法向之间的关系。当存在相邻曲面

时, 法矢的传播应尽量沿切线方向进行, 避免法向传播。这里通过计算相邻两点的法向平均距离来衡量传播方向的好坏, 如图 6 所示, x_i, x_j 为两采样点, n_i, n_j 为相应的法矢, x_i^1, x_i^2 为 x_i 正负法向上的两点并且与 x_i 的距离为单位长度, 同样得到两点 x_j^1, x_j^2 , m_{rs} 为线段 $x_i^r x_j^s$ 的中点 ($r, s \in \{1, 2\}$), o_{rs} 为 m_{rs} 到直线 $x_i x_j$ 的投影, 则法向平均距离为 $d_{ij} = \max_{r,s \in \{1,2\}} \|m_{rs} - o_{rs}\|$, d_{ij} 的大小体现了传播的优先程度, d_{ij} 越大, 由 x_i 向 x_j 传播的可能性也越大。当法矢方向 $x_i^1 x_i^2, x_j^1 x_j^2$ 与 $x_i x_j$ 重合时(图 6(b)), x_j 位于 x_i 的法线方向, $d_{ij} = 0$, x_i 向 x_j 传播的可能性最小; 当法矢方向 $x_i^1 x_i^2, x_j^1 x_j^2$ 都与 $x_i x_j$ 垂直时(图 6(c)), x_j 位于 x_i 的切线方向, $d_{ij} = 1$, x_i 向 x_j 传播的可能性最大; 其余情况 $d_{ij} \in (0, 1)$ (图 6(a))。为剔除当前点 p_i 的歧义邻域点, 预先给定阈值 d ($d \in [0, 1]$), 计算出 p_i 与它的每个邻域点之间的 d_{ij} 值, 当 $d_{ij} < d$ 时将该邻域点作为歧义邻域点从 K 邻域中剔除, 否则予以保留。

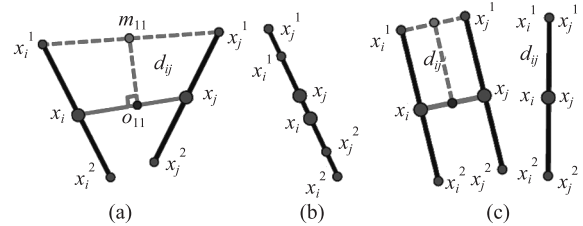


图 6 法向平均距离

Fig. 6 The average normal distance

3) 组合方法。法向距离法与邻域增长法都具有剔除歧义邻域点的效果, 将两者组合效果会更好。组合时只需在邻域增长法的每个 $N_m(p_i)$ 中都按法向平均距离 d_{ij} 进行一次歧义点剔除。组合方法可以转化为法向距离法或邻域增长法。当 $m \geq K$ 时, 邻域增长法无效, 组合方法转化为法向距离法, 类似地, $d = 0$ 时组合方法转化为邻域增长法。

以手骨点云为例, 当采用文献[6]的方法进行法矢调整时, 得到的 MST 和法矢结果分别如图 7(b)(c) 所示。由图 7 可知, MST 发生错误, 有部分边跨越了相邻曲面, 相应地, 法矢也发生错误, 部分指向曲面外部, 部分指向内部。在组合方法中, 为检测歧义邻域点的剔除效果, 对 MST 错误边数进行了记录, 错误边数越少, 表明剔除效果越好, 当错误边数为 0 时, 剔除效果最佳, 法矢正确调整。表 1 显示了组合方法中不同 d, m 对法矢调整结果的影响。由表 1 可知, 当 m 值固定时, 随着 d 的增大, MST 错

误边数减少,运算时间先微小振荡后急剧增加。当 d 值固定时,随着 m 的减少,MST 错误边数减少,运算时间在 $0 < d \leq 0.6$ 时先减小后增大,在 $d = 0$ 或 $d \geq 0.8$ 时一直增大。为了法矢正确调整,要求 MST

错误边数必须为 0,同时考虑时间因素,因此组合方法中参数取值为 $m = 10, d = 0.9$,调整后的 MST 结果和法矢取反结果如图 8 所示,由图 8 可知,MST 中没有横跨两个不同曲面的错误边,法矢方向也正确。

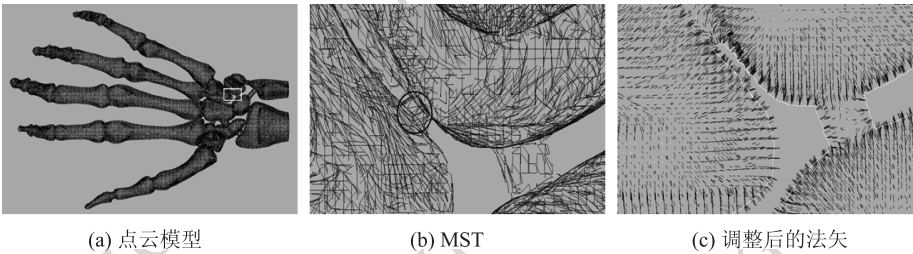


图 7 文献[6]算法法矢调整结果
Fig. 7 Normal adjustment effect with reference[6] method

表 1 组合方法中参数 d, m 对法矢调整结果的影响

m		d						
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.95
20	MST 错误边数	28	27	26	18	3	1	0
	运算时间/s	47.166	51.052	44.397	42.471	44.254	47.781	138.305
10	MST 错误边数	27	26	19	15	3	0	0
	运算时间/s	50.701	39.518	39.269	39.258	45.491	56.016	163.071
5	MST 错误边数	8	8	8	5	2	0	0
	运算时间/s	103.271	93.280	93.267	89.317	102.340	116.922	233.852

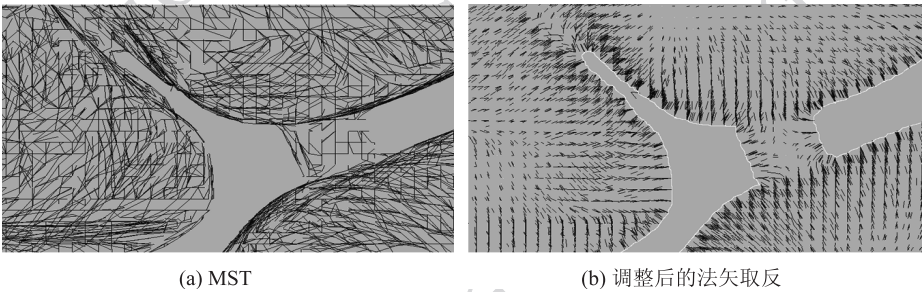


图 8 组合方法法矢调整结果
Fig. 8 Normal adjustment effect with combination method

2 实验结果与分析

在 CPU 为 AMD Athlon64 X2 5000 +, 内存为 2 G,编程环境为 VC6.0 的 PC 机上选取改锥模型、手骨模型和手掌模型进行法矢调整,然后在运算效果上将本文算法与传统 MST 算法^[6]进行比较,在运算效率上与曲面重建算法^[9]进行比较。各算法的

参数如下:1)文献[6]算法:夹角阈值 $\alpha_0 = 5^\circ$;2)本文算法:夹角阈值 $\alpha_0 = 5^\circ$,邻域增长参数 $m = 10$,法向距离参数 $d = 0.9$;3)文献[9]算法:对不同模型重采样参数 h 和迭代次数 $Iter$ 各不相同,对改锥模型: $h = 0.003, Iter = 9$;手骨模型: $h = 0.012, Iter = 7$;手掌模型: $h = 0.047, Iter = 5$ 。本文算法与其他算法的比较如下:

1)运算效果方面:比较本文算法与文献[6]的

传统 MST 算法, 结果如图 9—图 11 所示。由于整块点云的法矢显示效果不太明显, 图中只对点云的局部进行法矢显示, 又由于正确的法矢通常指向曲面外部, 容易掩盖错误的法矢, 因此局部法矢图中显示的是法矢取反值而非法矢本身。法矢的整体效果由曲面重建结果来代替。由图 9(b)—图 11(b) 的重建曲面对比可知, 本文算法的曲面重建结果能正确地反应模型的形状, 而文献[6]算法存在错误。对

比点云的局部法矢取反图可知, 文献[6]算法的法矢取反值或者存在正反两个方向(图 9(b)、图 11(b))或者全部指向曲面外部(图 10(b)), 本文算法的法矢取反值都正确地指向了曲面内部。其中图 9(c) 右侧图中尖角处法矢取反值是向右而非预期的向下, 出现该错误的原因是尖角处的法矢估算存在较大的误差^[9], 目前还没有较好的解决方法。分析文献[6]算法在各局部位置处的错误原因, 可得:

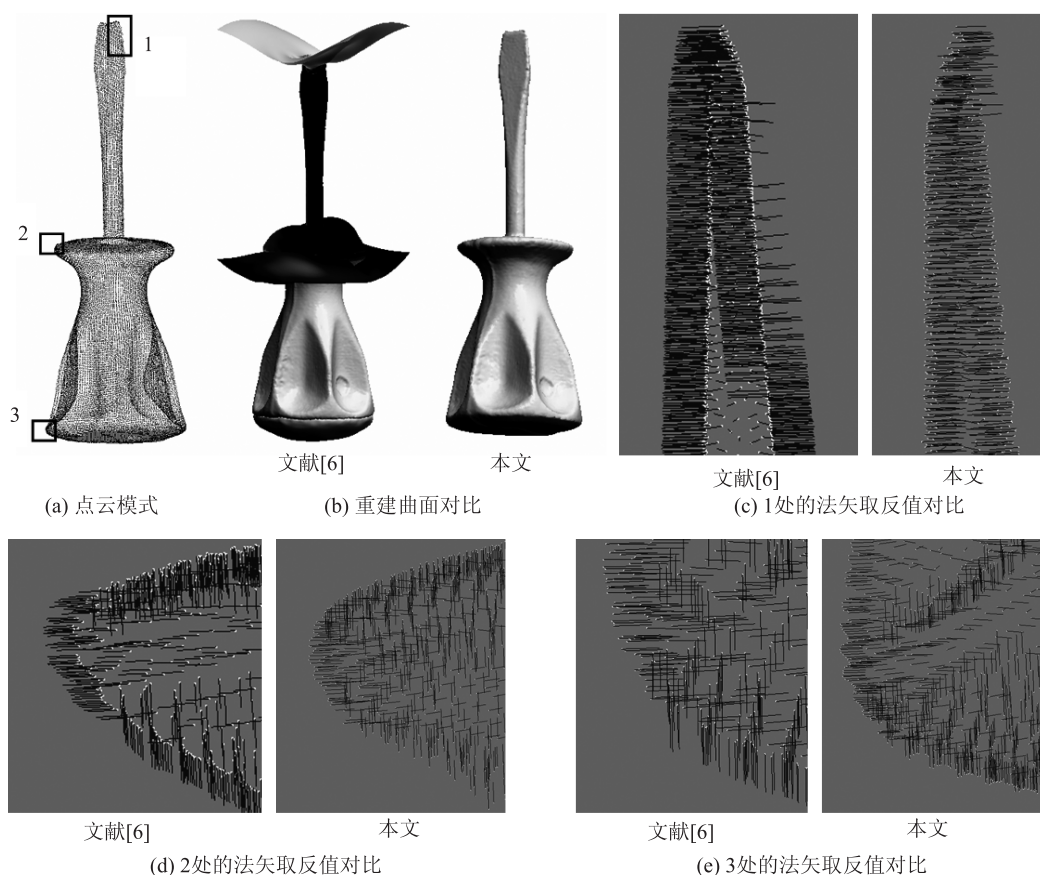


图 9 改锥模型的法矢调整效果对比

Fig. 9 The comparison for normal adjustment effect of screw driver

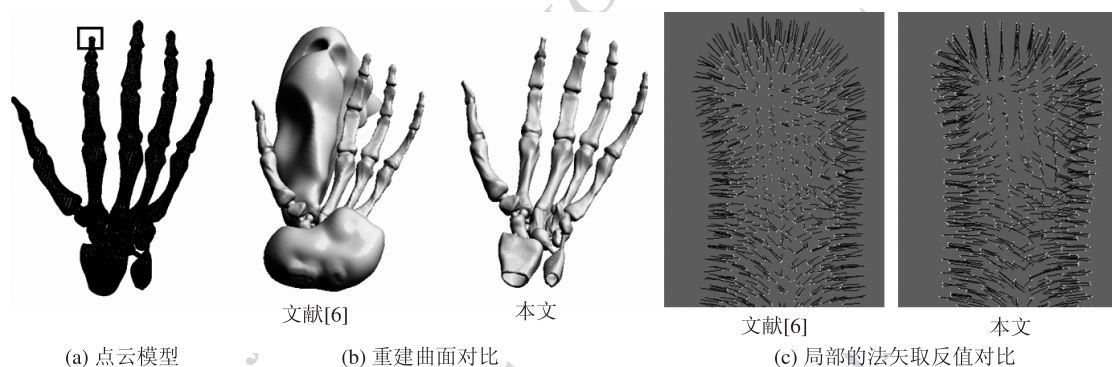


图 10 手骨模型的法矢调整效果对比

Fig. 10 The comparison for normal adjustment effect of skeleton hand

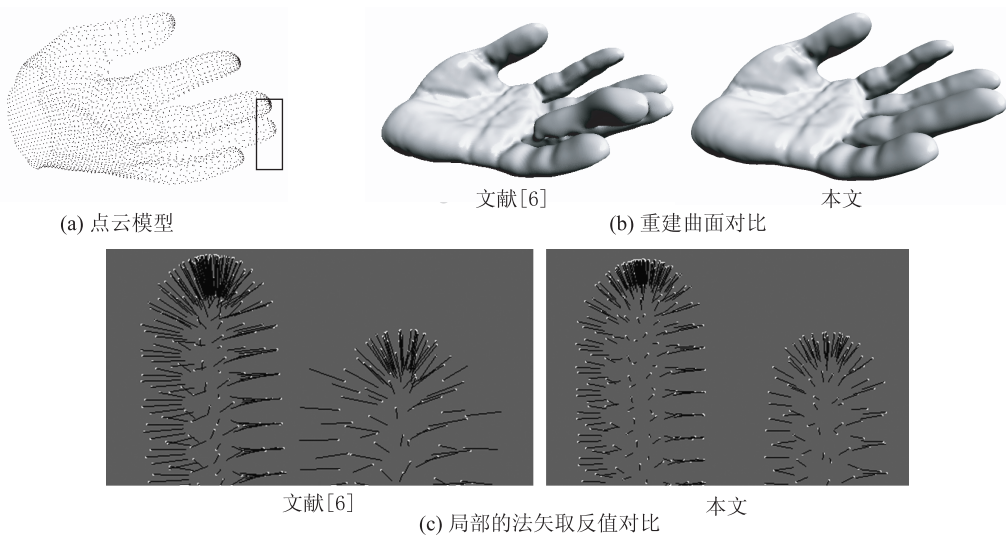


图 11 手掌模型的法矢调整效果对比

Fig. 11 The comparison for normal adjustment effect of hand

(1)改锥模型中,2 和 3 处的法矢取反值错误地指向外部,其原因是该处存在垂直法向问题,1 处的法矢取反值部分指向外部,部分指向内部,指向外部的出错原因是手柄与刀杆之间存在垂直法向问题,指向内部并不表明该处法矢进行了正确调整,而是垂直法向问题与相邻曲面问题共同作用的结果;(2)手骨模型中食指处出现错误,出错原因是手骨关节处存在的相邻曲面问题;(3)手掌模型中无名指上出现错误,错误原因是中指和无名指比较靠近,之间存在相邻曲面问题。使用手掌模型作为实例主要用于说明本文算法对稀疏点云的适应性。

2)运算效率方面:将本文算法与文献[9]算法进行对比。两种算法的相同点是都能对存在奇异情况的点云进行正确的法矢调整,不同点是解决思路不同,本文算法直接对传统 MST 进行修改而文献[9]算法利用曲面重建来调整点云法矢。文献[9]算法的主要目的是进行曲面重建,法矢调整只是一个顺带功能,因此作为法矢调整算法时运算效率不高。两种算法的运算时间对比如表 2 所示,由表 2

可知,相较于文献[9]算法,本文算法运算效率上有很大提高。

3 结 论

本文算法具有以下特点:

- 1)通过对点云模型中奇异情况的处理解决了传统 MST 算法法矢调整出错的问题。
- 2)对奇异情况的处理思路是对传统 MST 法进行修改而非曲面重建,提高了运算效率。
- 3)算法共处理了相邻曲面、薄壁特征和垂直法向 3 种奇异情况,并且最终结果与处理顺序无关。若以后发现新的奇异情况,其处理过程可直接加入到本文算法中,即算法具有较好的可扩充性。

参考文献 (References)

[1] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78.

[2] Zhou R R, Zhang L Y, Su X, et al. Algorithmic research on surface reconstruction from dense scattered points[J]. Journal of Software, 2001, 12(2): 249-255. [周儒荣,张丽艳,苏旭,等.海量散乱点的曲面重建算法研究[J].软件学报,2001,12(2):249-255.]

[3] Du J. Research on application of radial basis function in reverse engineering[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. [杜洁. 径向基函数在逆向工程中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.]

表 2 本文算法与文献[9]算法的运算时间对比
Table 2 The comparison for running time between our method and reference[9] method

点云	点数	运算时间/s	
		本文算法	文献[9]算法
改锥模型	27 152	1. 172	9. 109
手骨模型	327 323	162. 468	231. 531
手掌模型	3 372	0. 156	1. 343

- [4] Liu D F, Dai N, Sun Q P, et al. Algorithm for adjusting directions of normal vectors of tangent planes based on surface reconstruction[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(2): 192-197. [刘大峰, 戴宁, 孙全平, 等. 面向曲面重构的切平面法矢方向调整算法[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(2): 192-197.]
- [5] Meng X L, He W T, Zhao C, et al. Point cloud-nearest-neighbor search and normal vector estimation relative algorithm in reverse engineering[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009, (2): 44-47. [孟祥林, 何万涛, 赵灿, 等. 逆向工程中点云邻域搜索及法矢估算相关算法研究[J]. 制造技术与机床, 2009, (2): 44-47.]
- [6] Sun J H, Zhou L S, An L L. Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(7): 858-865. [孙金虎, 周来水, 安鲁陵. 应用 MST 实现点云分割[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 858-865.]
- [7] Sun J, Smith M, Farooq A. Examining the uncertainty of the recovered surface normal in three light photometric stereo[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(7): 1073-1079.
- [8] Ma W C, Hawkin T, Peers P, et al. Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination[C]//Eurographics Symposium on Rendering. Grenoble, France: The Eurographics Association, 2007: 183-194.
- [9] Huang H, Li D, Zhang H, et al. Consolidation of unorganized point clouds for surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 176-183.
- [10] Liu S J, Charlie C W. Orienting unorganized points for surface reconstruction[J]. Computers & Graphics, 2010, 34(3): 209-218.
- [11] Zeng F, Zhong Z C, Yang T, et al. Scattered point cloud normal vector calculation based on SOM[J]. Computer Engineering, 2012, 38(8): 287-290. [曾峰, 钟治初, 杨通, 等. 基于 SOM 的散乱点云法矢计算[J]. 计算机工程, 2012, 38(8): 287-290.]
- [12] Ohtake Y, Belyaev A, Seidel H P. 3D scattered data interpolation and approximation with multilevel compactly supported RBFs[J]. Graphical Models, 2005, 67(3): 150-165.