



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

2016
01
VOL.21

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



医学图像处理 P69

中国图象图形学报

刊名题字：宋健 | 月刊（1996年创刊）



第21卷第1期（总第237期）
2016年1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
中文核心期刊

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。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

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@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
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
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

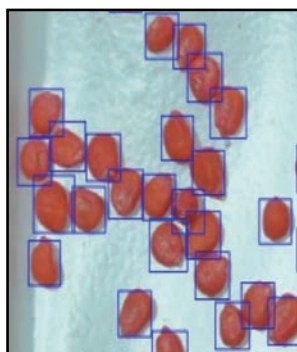
Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

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@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, 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 60.00元



多尺度特征融合与极限学习机的玉米种子检测
(第0024页)



深度卷积神经网络的显著性检测(第0053页)



双树复小波域的MRI图像去噪(第0104页)

图像处理和编码

空时形状预测与高效编码

朱仲杰, 王玉儿, 蒋刚毅..... 1

第二小方向导数信息熵的兴趣点检测

卢健, 黄杰, 潘峰..... 8

采用面积采样的反走样字符旋转算法

郑凯文, 刘文波..... 17

图像分析和识别

多尺度特征融合与极限学习机的玉米种子检测

柯道, 杜明智..... 24

图像理解和计算机视觉

结合NSCT和压缩感知的红外与可见光图像融合

陈木生..... 39

Plücker直线描述的空间后方交会

盛庆红, 陈姝文, 肖晖, 张斌, 王青, 费利佳..... 45

深度卷积神经网络的显著性检测

李岳云, 许悦雷, 马时平, 史鹤欢..... 53

计算机图形学

以优先点为中心的Delaunay三角网生长算法

尤磊, 唐守正, 宋新宇..... 60

医学图像处理

快速数字影像重建的2维/3维医学图像配准

刘坤, 吕晓琪, 谷宇, 于荷峰, 任国印, 张明..... 69

小波-Lagrange方法进行医学图像层间插值

武士想, 尚鹏, 王立功..... 78

遥感图像处理

多主体框架下结合最大期望值和遗传算法的SAR图像分割

张金静, 李玉, 赵泉华..... 86

第十届图像图形技术与应用学术会议

视差互信息引导下的立体航空影像与LiDAR点云自动配准

吴军, 胡彦君, 饶云, 彭智勇..... 95

双树复小波域的MRI图像去噪

黄学优, 张长江..... 104

快速定位图像尺度和区域的3维跟踪算法

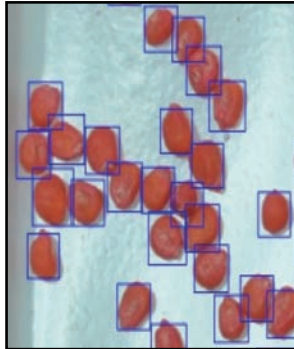
赵奇可, 孙延奎..... 114

局部不变特征点的精度指标

滕日, 周进, 蒋平, 崔雄文..... 122

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Detection of maize seeds based on multi-scale feature fusion and extreme learning machine(P0024)



Saliency detection based on deep convolutional neural network(P0053)



MRI denoising based on dual-tree complex wavelet transform(P0104)

Image Processing and Coding

- Spatio-temporal shape prediction and efficient coding
Zhu Zhongjie, Wang Yuer, Jiang Gangyi 1
- Interest point detection by using information entropy of the second small direction derivative
Lu Jian, Huang Jie, Pan Feng 8
- Anti-aliasing algorithm for character rotation based on area sampling
Zheng Kaiwen, Liu Wenbo 17

Image Analysis and Recognition

- Detection of maize seeds based on multi-scale feature fusion and extreme learning machine
Ke Xiao, Du Mingzhi 24

Image Understanding and Computer Vision

- Image fusion of visual and infrared image based on NSCT and compressed sensing
Chen Musheng 39
- Space resection method based on Plücker line
Sheng Qinghong, Chen Shuwen, Xiao Hui, Zhang Bin, Wang Qing, Fei Lijiao 45
- Saliency detection based on deep convolutional neural network
Li Yueyun, Xu Yuelei, Ma Shiping, Shi Hehuan 53

Computer Graphics

- Growth algorithm centered on priority point for constructing the Delaunay triangulation
You Lei, Tang Shouzheng, Song Xinyu 60

Medical Image Processing

- The 2D/3D medical image registration algorithm based on rapid digital image reconstruction
Liu Kun, Lyu Xiaoqi, Gu Yu, Yu Hefeng, Ren Guoyin, Zhang Ming 69
- Inter-slice interpolation for medical images by using the wavelet-lagrange method
Wu Shixiang, Shang Peng, Wang Ligong 78

Remote Sensing Image Processing

- Combining the expectation maximization and genetic algorithms for SAR image segmentation within a MAS framework
Zhang Jinjing, Li Yu, Zhao Quanhua 86

Column of IGIA' 2015

- Automatic registration of aerial stereo imagery to LiDAR data through iterative parallax mutual information computation
Wu Jun, Hu Yanjun, Rao Yun, Peng Zhiyong 95
- MRI denoising based on dual-tree complex wavelet transform
Huang Xueyou, Zhang Changjiang 104
- Three dimensional tracking with fast locating of image scale and area
Zhao Qike, Sun Yankui 114
- Extraction precision of local invariant feature points
Teng Ri, Zhou Jin, Jiang Ping, Cui Xiongwen 122

中图法分类号: P237 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)01-0095-09

论文引用格式: Wu J, Hu Y J, Rao Y, Peng Z Y. Automatic registration of aerial stereo imagery to LiDAR data through iterative parallax mutual information computation[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(1): 0095-0103. [吴军, 胡彦君, 饶云, 彭智勇. 视差互信息引导下的立体航空影像与LiDAR点云自动配准[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(1): 0095-0103.][DOI: 10. 11834/jig. 20160112]

视差互信息引导下的立体航空影像与LiDAR点云自动配准

吴军¹, 胡彦君¹, 饶云¹, 彭智勇^{1,2,3}

1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 桂林 541004;

2. 广西信息科学实验中心, 桂林 541004;

3. 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 桂林电子科技大学, 桂林 541004

摘要: 目的 从视差图反映影像景物深度变化并与LiDAR系统距离量测信息“同源”这一认识出发, 提出一种基于视差互信息的立体航空影像与LiDAR点云自动配准方法。方法 本文方法分为3个阶段: 第一、通过半全局匹配SGM(semi-global matching)生成立体航空影像密集视差图; 第二、利用航空影像内参数及初始配准参数(外方位元素)对LiDAR点云进行“针孔”透视成像, 生成与待配准的立体航空影像空间分辨率、几何形变相接近且具有相同幅面大小的模拟灰度影像—LiDAR深度影像, 以互信息作为相似性测度依据估计航空影像视差图与LiDAR深度影像的几何映射关系, 进而以之为基础实现LiDAR点云影像概略相关; 第三、以LiDAR点云影像概略相关获得的近似同名像点为观测值, 以视差互信息为权重, 实施摄影测量空间后方交会计算获得优化的影像外方位元素, 生成新的LiDAR深度影像并重复上述过程, 直至满足给定的迭代计算条件。结果 选取重叠度约60%、幅面大小7 216 × 5 428像素、空间分辨率约0.5 m的立体航空像对与平均点间距约1.5 m、水平精度约25 cm的LiDAR“点云”进行空间配准实验, 配准精度接近1个像素。结论 实验结果表明, 本文方法自动化程度高且配准精度适中, 理论上适用于不同场景类型、相机内参数已知立体航空影像, 具有良好的应用价值。

关键词: 影像地理配准; LiDAR; 视差互信息; 迭代配准

Automatic registration of aerial stereo imagery to LiDAR data through iterative parallax mutual information computation

Wu Jun¹, Hu Yanjun¹, Rao Yun¹, Peng Zhiyong^{1,2,3}

1. School of Electrical Engineering and Automation Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract: **Objective** This paper presents our approach on registering aerial stereo imagery to LiDAR point cloud through it-

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271362, 60962003); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFDA139030); 广西研究生创新项目(YCSZ2014138); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金项目(YQ15108); 广西高校科学技术研究项目(KY2015YB111); 桂林电子科技大学创新团队资助

第一作者简介: 吴军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 2003年于武汉大学获摄影测量与遥感专业博士学位, 现从事倾斜摄影测量、计算机视觉、低空遥感理论和应用研究, 已发表论文40余篇。E-mail: wujun93161@hotmail.com

Supported by: National Natural Science Foundation of China (41271362, 60962003); Natural Science Foundation of Guangxi Province, China (2015GXNSFDA139030)

erative parallax mutual information computation. **Method** Proposed approach takes photogrammetry collinear equation as strict mathematic mode and three stages are involved: First, dense disparity map is generated from aerial stereo imagery using SGM algorithm; Second, LiDAR depth image with same size and approximate spatial resolution, geometrical distortion to the unregistered aerial image is generated, based on the perspective projection of LiDAR point cloud using initial image orientation parameters. In this step, supposed 2D rigid transformation between LiDAR depth image and the disparity map from aerial stereo imagery to be registered is estimated through maximizing their Mutual Information. As a result, by taking LiDAR depth image as a “bridge”, visible LiDAR points are roughly mapped to aerial image pixels based on the estimated geometry transform parameters and the known projection relations between Lidar point clouds and its depth image. Third, with all mapped aerial image pixels as observed values and their parallax mutual information as weight, photogrammetry space resection algorithm is implemented to obtain improved image orientation parameters. Keeping repeating above two stages until the given iteration calculation condition is met and the registration of LiDAR point clouds with aerial stereo image is realized. **Result** Selected aerial stereo imagery with size $7\,216 \times 5\,428$ pixel, 60% overlap and spatial resolution 0.5 m are automatically geo-registered to LIDAR point cloud (averaged point distance 1.5 m, horizontal accuracy 25 cm) and approximate to 1 pixel registration precision is obtained. **Conclusion** The experimental results show that proposed algorithm has moderate registration precision and is in high degree of automation. Theoretically, with known interior of parameters (IOP) and initial exterior of parameters (EOP), proposed algorithm is suitable for various aerial stereo imagery taken for different types of scene and thus, has good value in application.

Key words: image geo-registration; LiDAR; parallax mutual information; iterative registration

0 引言

随着对地观测技术的不断发展与进步,人们获取空间信息的手段逐渐多样化,单一手段获取的空间数据质量、精度难免存在缺陷、不足,融合多源空间数据以满足特定应用目标成为当前研究的热点、难点。作为主动获取空间信息的高新技术手段之一,机载激光雷达系统具有主动性、快速性、穿透性强、高密度、高精度等特点^[1],但获取的空间数据(离散点云)缺乏地物纹理、边界信息。传统遥感影像虽有丰富的光谱信息,但不能直接获得3维空间信息且影像获取受光照影响较大,存在地物遮挡、透视几何畸变等问题。LiDAR点云与遥感影像具有明显的优势互补特性,普遍认为二者联合有利于获得更为精确、全面的空间信息^[2],前提在于通过空间配准以解决两者间的坐标参考框架差异。

广泛吸收来自图像处理、计算机视觉、摄影测量等相关领域的优秀成果,国内外众多学者对LiDAR点云与光学影像间的配准问题进行了广泛研究。邓非等人^[3]利用互信息作为灰度区域的相似性测度对LiDAR强度数据与遥感影像数据进行配准,沿梯度下降最陡的方向进行迭代搜索,当互信息最大时

得到最优参数解,但该方法面临空间参数的全局搜索、优化效率问题。点集配准的基本思路是首先从重叠影像中匹配生成3维点集,将LiDAR数据和光学影像间的配准转化为两个3维点云间的配准^[4],其代表方法是由Besl和McKey提出的最近邻迭代算法(ICP)^[5]及其派生的优化算法,该类方法主要通过点间距离测度实现配准,困难在于两种点云在分辨率、尺度以及空间分布特性上存在显著差异且没有真正意义上的同名点,如LiDAR点云不能准确记录易于影像匹配成功的、集中在灰度突变处的地物边界位置信息,易收敛到局部最小,必须提供较好的初值且应避免引入影像特征提取、匹配误差。相对于点集配准,基于特征提取的配准更具灵活性,Habib等人利用线特征作为配准基元^[2,6],分别从立体匹配点云和LiDAR点云中提取共轭的直线特征,利用3D相似变换模型建立二者的对应关系,最后根据新的对应关系重新纠正影像方位元素从而实现配准;Mitishita等人^[7]利用LiDAR点云中矩形屋顶的质心作为控制点进行外方位元素解算;张永军等人^[8]基于垂直直线段相交得到的建筑角点作为特征基元进行配准等等,由于在配准基元特征表达、高精度定位,尤其是配准基元相似性测度、自动相关问题方面未得到有效解决,特征配准方法应用效率、精度及鲁棒性受到不同程度制约。

1 配准框架

配准目标是将中心投影的立体航空影像纳入到 LiDAR 点云所在的空间坐标框架,并以摄影测量共线方程^[9]来严格描述两者间的 2D-3D 配准几何模型:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\{a_i, b_i\}$ 为影像旋转矩阵元素,由影像旋转角 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 构成, (X_s, Y_s, Z_s) 为影像摄站中心, f 为

相机有效焦距, (x_0, y_0) 为像主点坐标, (x, y) 、 (X, Y, Z) 为对应的像点、空间点。

从立体影像视差图反映景物深度信息这一事为突破口,设计了一套如图 1 所示的立体航空影像与 LiDAR 点云迭代配准框架,主要包括以下 3 个方面:

1) 基于 SGM (semi-global matching)^[10] 的立体像对视差图密集匹配生成。影像视差反映场景的深度变化,与 LiDAR 系统所记录的点云空间距离“同源”,则以视差图为“媒介”,可更好地描述 LiDAR 点云与光学航空影像间的相似性。利用图像匹配新成果 SGM 方法对立体航空像对进行逐像素匹配以得到高质量的视差图,为后续 LiDAR 点云航空影像自动相关计算奠定基础。

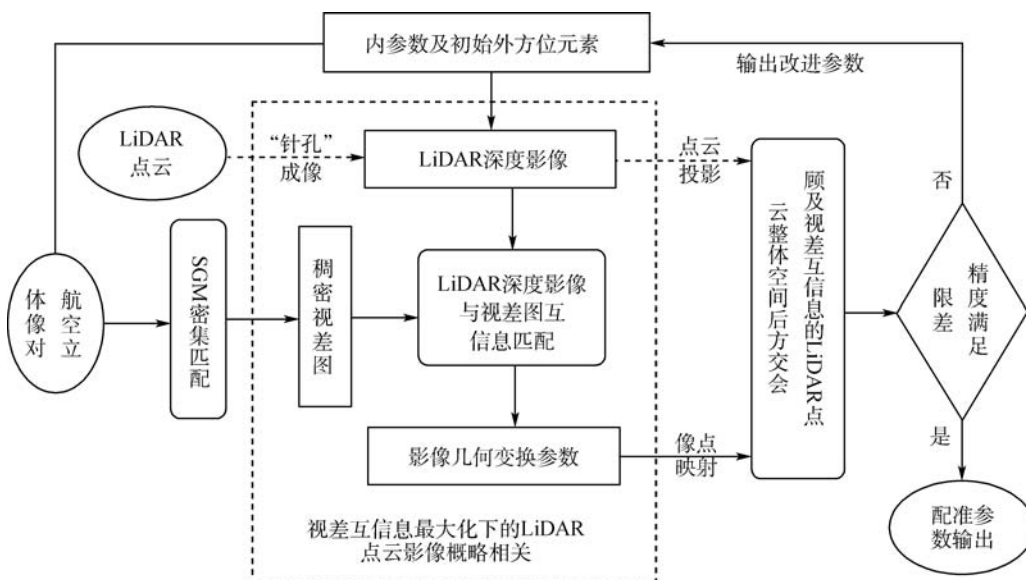


图 1 立体航空影像与 LiDAR 点云迭代配准框架

Fig. 1 Depict of iterative framework of the Geo-registration of Aerial Imagery stereo to LiDAR Data

2) 视差图互信息最大化下的 LiDAR 点云影像概略相关。对 LiDAR 点云进行“针孔”透视成像^[10],生成与航空影像空间分辨率、尺度以及几何形变相接近且具有相同幅面大小的模拟灰度影像-LiDAR 深度影像,并以互信息为相似性度量估计 LiDAR 深度影像和待配准立体航空影像视差图间的几何变换参数。由于 LiDAR “点云”与其透视影像间的投影关系已知,则以视差图为“桥梁”可建立 LiDAR 点云与航空影像间的概略相关关系。

3) 顾及视差图互信息的 LiDAR 点云整体空间后方交会。即以视差互信息为权重,以 LiDAR 激

光脚点影像概略相关得到的近似同名像点为观测值,实施摄影测量空间后方交会计算对初始的影像外方位元素进行优化改进,并以新外方位元素为基础重复上述步骤 2)3),直至交会计算满足精度条件,实现立体航空影像与 LiDAR 点云间的高精度配准。

2 视差图生成

由 Hirschmüller 提出的 SGM^[10] 算法,本质上是一种改进的动态规划匹配方法,该方法以影像互信

息作为匹配相似性测度,并通过引入平滑约束来提高整体匹配的可靠性,总体上分为以下 3 个阶段^[10]:

1) 像素匹配代价计算。基于互信息的像素匹配代价定义为

$$C_{MI}(p, d) = -mi_{I_p, I_m}(I_{bp}, I_{mq}) \quad (2)$$

式中, mi_{I_p, I_m} 为基于信息熵给出的影像互信息, I_{bp} 表示参考影像像素 p 的灰度值, I_{mq} 表示匹配影像中与 p 所对应的像素 $q = e_{bm}(p, d)$ 的灰度值, $e_{bm}(p, d)$ 表示待匹配影像中 p 所对应的核线, d 为视差, 若待匹配影像已沿扫描线方向进行核线, 则 $e_{bm}(p, d) = [p_x + d, p_y]^T$;

2) 视差计算。以上述像素匹配代价为基础, SGM 定义能量函数(代价函数)为

$$E(D) = \sum_p (C_{MI}(p, d_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|d_p - d_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|d_p - d_q| > 1]) \quad (3)$$

式中, $C_{MI}(p, d_p)$ 为上述定义的像素匹配代价, p 为影像任一像素, N_p 为像素 p 的邻域, P_1, P_2 为对像素 p 邻域内视差变化的惩罚系数。为解决 $E(D)$ 全局最小化计算问题, SGM 采用多路径动态规划优化计算, 即

$$\begin{aligned} \min_d S(p, d) : S(p, d) &= \sum_r L_r(p, d) \quad (4) \\ L_r(p, d) &= C_{MI}(p, d) - \min_k L_r(p - r, k) + \\ &\min(L_r(p - r, d), L_r(p - r, d - 1) + \\ &p_1, L_r(p - r, d + 1) + \\ &p_1, \min_i L_r(p - r, i) + p_2) \quad (5) \end{aligned}$$

式中, $L_r(p, d)$ 表示像素 p 沿路径 r 的匹配代价, d 为视差; $L_r(p - r, d)$ 表示当前路径 r 上 p 的前一个点的匹配代价; $S(p, d)$ 为累加路径代价, 在一定视差搜索范围内取最小值对应的视差为像素 p 的最优视差。

3) 视差优化。主要包括左右一致性视差检查、滤波、插值、亚像素精度计算等。

SGM 以其可媲美 LiDAR 点云质量的匹配效果^[11], 在航空、航天影像处理中获得了重视与应用。本文充分利用 SGM 的匹配性能生成与 LiDAR 深度影像“光谱”特性相一致的视差图。为避免引入不必要的误差, 这里不对视差图进行插值处理, 并对视差进行有效性标记, 以确保后续视差互信息计算的可靠性。

3 LiDAR 点云影像概略相关

可以证明, OpenGL 成像过程可用摄影测量方法进行定量控制^[12], 利用计算机图形学程序库 OpenGL 模拟航空影像瞬时摄影姿态对 LiDAR 点云进行“针孔”透视成像, 考虑到点云是离散的且可能存在局部“孔洞”, 其模拟成像过程为:

1) LiDAR 点云构网, 即以点云空间坐标 (X, Y) 为依据生成 2 维 Delaunay 三角网^[13], 建立目标场景的 3 维表面模型 DSM, 以满足 OpenGL 光线跟踪、遮挡判断等透视投影计算需要。

2) 设置 OpenGL 虚拟相机, 即根据待配准影像初始空间参数生成投影矩阵、视口矩阵和模型矩阵, 并调用相应 OpenGL 函数^[14]: $glMatrixMode()$, $glLoadMatrixf()$, $glViewport()$ 等, 导入相应矩阵完成 OpenGL 虚拟相机设置。

3) OpenGL 影像渲染生成, 这里 OpenGL 光源简单设置为位于无穷远处的点光源(平行光)。

假定 LiDAR 深度影像与视差图映射关系可由简单几何变换关系来近似描述, 则二者相关计算可转化为最优几何变换参数的估计过程, 即有

$$\max_T \text{Similarity}(LI(x, y), AI(u, v)) : (u, v) = (G_x^T(x, y), G_y^T(x, y)) \quad (6)$$

式中, LI 为 LiDAR 深度影像, AI 为立体航空影像视差图。Similarity 为影像相关测度函数, 当两者严格配准时取最大值, $G_x^T(x, y), G_y^T(x, y)$ 代表两者间的几何变换关系, T 为几何变换参数。

以互信息作为相关测度依据, 以 2 维刚体变换作为影像几何变换模型, 对于有限的、离散几何变换参数空间 $\{T\}$, 本文 LiDAR 深度影像与航空影像视差图互信息最大化计算过程为:

1) 互信息累加。从 $\{T\}$ 选定某一几何变换参数 T^i , 初始化互信息值 $\text{Similarity}_{MI}(LI, AI) = 0$, 遍历 LiDAR 深度影像 LI 中的任一有效像素 $s(x, y)$, 根据几何变换参数 T^i 计算对应像素 $t(x', y')$, 判断像素 $t(x', y')$ 是否为视差图中有效像素, 若是, 则计算两像素之间的互信息, 并将其进行累加, 这里互信息为^[10]

$$\begin{aligned} \text{Similarity}_{MI}(LI, AI) &= \sum -mi_{LI, AI}(LI_p, AI_q) \\ mi_{LI, AI}(i, k) &= h_{LI}(i) + h_{AI}(k) - h_{LI, AI}(i, k) \end{aligned}$$

$$h_I(i) = -\frac{1}{n} \log_2(P_I(i) \otimes g(i)) \otimes g(i)$$

$$h_{LI, AI}(i, k) = -\frac{1}{n} \log_2(P_{LI, AI}(i, k) \otimes g(i, k)) \otimes g(i, k) \quad (7)$$

式中, $mi_{LI, AI}$ 为基于信息熵给出的影像像素互信息, LI_p 表示 LiDAR 深度影像有效像素 p 的值, AI_q 表示视差图中与 p 所对应的有效像素 q 的值; P_I ,

$P_{LI, AI}$ 分别表示待匹配影像概率分布及联合概率分布, 可通过影像直方图求出; $\otimes$ 表示高斯卷积, n 表示影像总像素。图 2 给出了 LiDAR 深度影像与立体航空影像视差图的联合信息熵计算过程示意, 其中, I_l 和 I_r 为局部的灰度立体航空影像, I_d 为两者密集视差图, I_w 为同区域 LiDAR 深度影像。

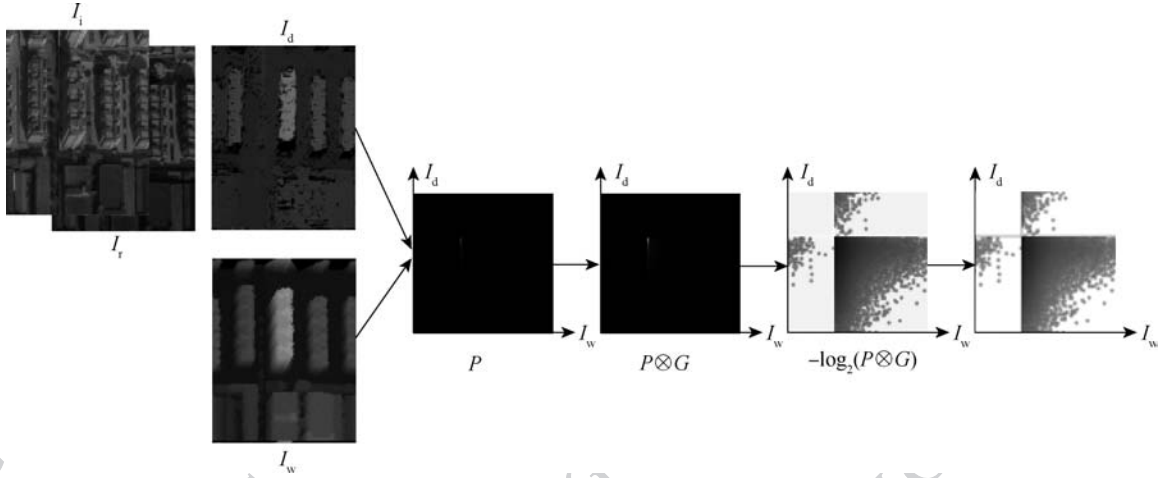


图2 LiDAR 深度影像与航空影像视差图联合信息熵计算过程

Fig. 2 The combined information entropy calculation of LiDAR and aerial images

2) 最大视差互信息搜索。令 $S(i)$ 表示参数 T^i 下的影像互信息均值: $\text{Similarity}_{MI}(LI, AI)$, 遍历参数空间 $\{T\}$ 可得到互信息均值集合 $\{S(i)\}$, 该集合中最大值即为 LiDAR 深度影像与立体航空影像视差图配准时的最大互信息 $S(j)$, 相应的参数 T^j 则给出了两影像配准的几何变换。

4 LiDAR 点云整体空间后方交会

源于 2D 刚体变换与透视变换模型间的误差, LiDAR 深度影像与航空影像互信息配准初步建立的 LiDAR 点云影像相关并不能保证单个激光脚点影像映射的可靠性, 但就点云整体映射关系而言, 优于初始相机外部参数给出的映射关系, 更趋于“理想”摄影条件, 因而可利用 LiDAR 点云影像相关给出的整体几何约束对初始相机参数进行优化。将式(1)按泰勒级数展开并取一次项, 得误差方程^[9]

$$V = AX - WL \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial X_s} & \frac{\partial f}{\partial Y_s} & \frac{\partial f}{\partial Z_s} & \frac{\partial f}{\partial \varphi} & \frac{\partial f}{\partial \omega} & \frac{\partial f}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial f}{\partial X_s} & \frac{\partial f}{\partial Y_s} & \frac{\partial f}{\partial Z_s} & \frac{\partial f}{\partial \varphi} & \frac{\partial f}{\partial \omega} & \frac{\partial f}{\partial \kappa} \end{bmatrix}$$

$$X = [dX_s, dY_s, dZ_s, d\varphi, d\omega, d\kappa]^T$$

$$L = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_0 + f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{bmatrix}$$

式中, A 为误差方程系数; X 为误差方程参数向量, 对应于影像旋转角 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 、摄站中心 (X_s, Y_s, Z_s) 改正数; W 为观测值权重, 由像点互信息大小给出; L 为误差方程常数项。

对落在 LiDAR 深度影像上且未被遮挡的激光脚点, 以其影像概略相关获得的近似同名像点为观测值, 可根据式(8)逐点建立方程, 并以生成 LiDAR 深度影像的相机外部参数为初值进行最小二乘求解, 即

$$X = (A^T A)^{-1} A^T W L, \sigma_0^2 = \frac{V^T W V}{n - t} \quad (9)$$

式中, σ_0^2 为单位权方差, 反映了全体激光脚点的投

影误差,可作为 LiDAR 点云与航空影像空间配准精度评定依据。利用参数改正数 X 对相机初始参数进行修正,进而以修正后的参数重新生成 LiDAR 深度影像,重复第 3、4 节直至满足给定的终止条件,获得航空影像与 LiDAR 点云配准最优空间参数。

5 实验与分析

实验选取立体航空像对如图 3(a)(b)所示,像对重叠度约 60%,影像大小为 $7\,216 \times 5\,428$,像素大

小为 $6.8\ \mu\text{m}$,空间分辨率约为 $0.5\ \text{m}$,影像内部参数已知,外部参数初值由引入误差的飞行平台低精度导航参数提供,并转换到摄影测量坐标系下,见表 1。对应场景的 LiDAR“点云”数据垂直精度约为 $15\ \text{cm}$,水平精度约为 $25\ \text{cm}$,平均点间距约为 $1.5\ \text{m}$,图 3(c)(d)给出了利用待配准影像初始外部参数“针孔”成像生成的 LiDAR 深度影像,图 3(e)(f)为待配准(灰度)航空影像与 LiDAR 深度影像局部区域叠加示意,显示出两者存在明显的、不同程度的几何形变。

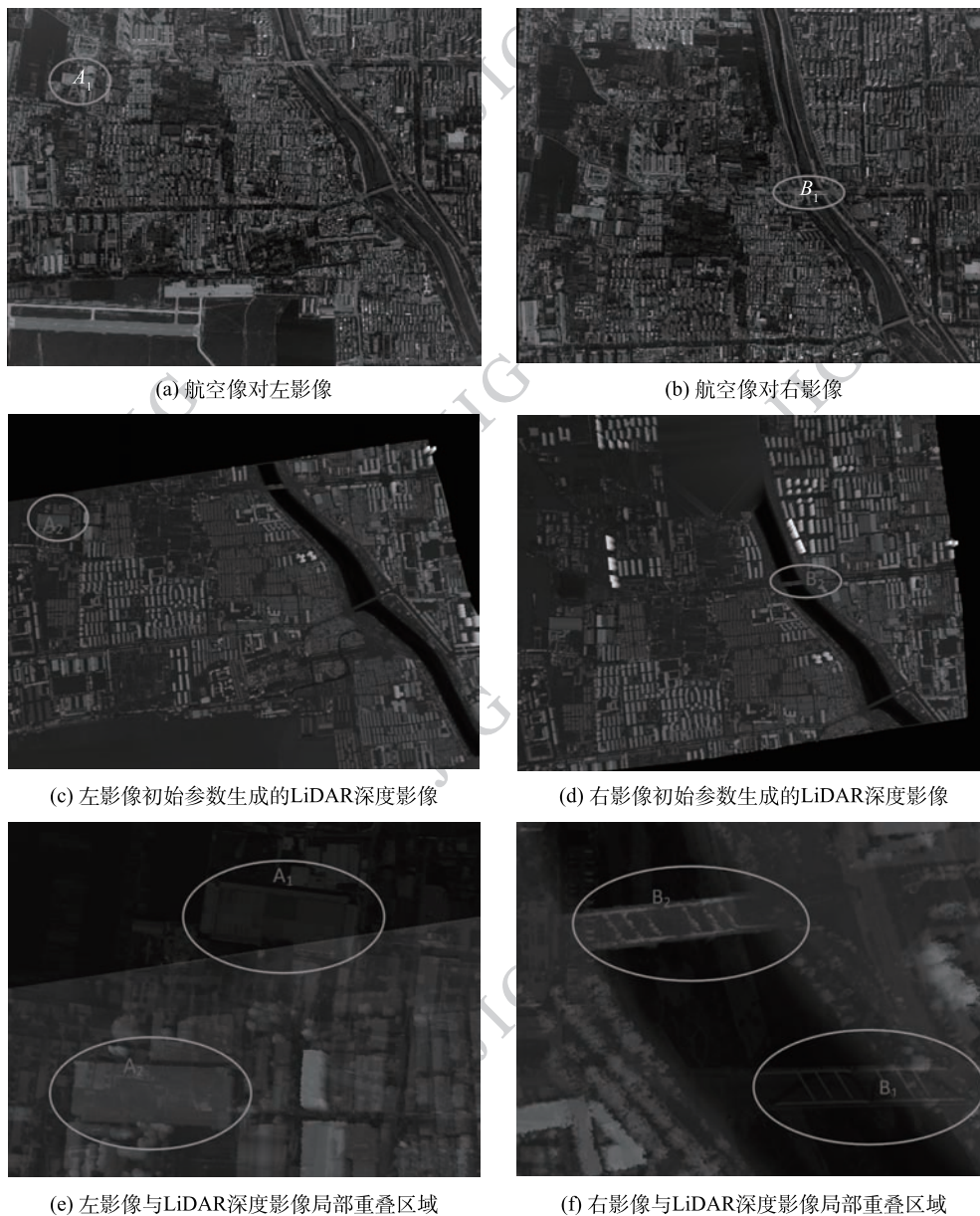


图 3 立体航空像对、LiDAR 深度影像及局部重叠区域示意

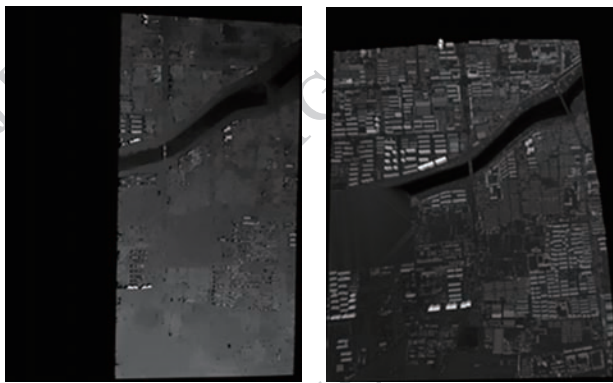
Fig. 3 Depict of aerial stereo, LiDAR Depth Image(LDI) and their overlapped local regions((a) left aerial image; (b) right aerial mage; (c) LDI corresponding to left aerial image; (d) LDI corresponding to right aerial image; (e) local regions within overlapped left aerial image and LDI; (f) local regions within overlapped right aerial image and LDI)

根据第2节给出的迭代配准框架,首先利用SGM对立体航空像对进行密集匹配,图4(a)给出了以图3(a)为基准图像生成的视差图。SGM要求待匹配影像为核线影像,这里根据文献[15]给出的影像几何纠正扩展方法生成待配准航空像对的核线影像,相应地,LiDAR深度影像也按同样方式进行核线重排,见图4(b),以便于后续视差互信息计算。

表1 待配准立体航空影像初始配准参数

Table 1 Initial registration parameters for imagery stereo to be registered

影像标号	初始外方位参数(线元素/m,角元素/(°))
图3(a)	$X_s = 262\ 315.81, Y_s = 4\ 001\ 330.18,$ $Z_s = 1\ 870.69; \varphi = 0.177\ 4,$ $\omega = -3.424\ 6, \kappa = 262.431\ 7$
图3(b)	$X_s = 261\ 644.63, Y_s = 4\ 001\ 373.43,$ $Z_s = 1\ 852.20; \varphi = 4.955\ 6,$ $\omega = -3.728\ 7, \kappa = 262.674\ 0$



(a) 立体像对视差图

(b) 重排的LiDAR深度影像

图4 立体像对视差图及核线重排的LiDAR深度影像

Fig. 4 Depict of parallax image and LDI with EPI-line rearrangement((a) parallax image from SGM;(b) LDI corresponding to parallax image)

以LiDAR深度影像与视差图互信息最大化计算建立的LiDAR点云影像概略相关关系为约束,反复实施摄影测量空间后方交会计算可获得不断改进的配准参数,见表2。由表2可看出,即使仅采用简单的2D刚体几何变换参数 $T(X_0, Y_0, \theta)$,具有全局特性的互信息配准也能建立趋于“理想”摄影光束的LiDAR激光脚点航空影像像素映射关系,进而通过空间后方交会计算获得改进的相机外部参数;反过来,影像空间参数的不断修正使得生成的LiDAR深度影像与立体航空影像趋于“一致”;互信息则不断增大,相对几何畸变不断变小(几何变换旋转角度趋于0,平移距离趋于1个像素);与此相对应的,LiDAR点云空间后方交会精度随迭代不断提高,并趋于稳定,迭代次数为8时精度达到最高,约1个像素。图5给出了连续6次(1~6)迭代过程中,LiDAR深度影像与航空影像局部区域(图3中 A_1/A_2)的叠加效果,其空间位置随LiDAR点云空间后方交会参数精度不断提高而趋于一致,直至完全“套合”。对比文献[16]给出的两相机(Cannon EOS 5D Mark II和Nikon D300)获取影像ICP算法配准误差统计 RMS_i :0.484像素,0.781像素,本文方法配准精度略低,但机载LiDAR点云密度、量测精度远低于该文献中的地面激光测距系统且不要求具备与待配准立体影像的高重叠度,显示出良好的适用性。本文研究结论表明:

1) 基于视差互信息的迭代计算过程对影像外方位参数的持续优化是行之有效的,可逐步建立LiDAR激光脚点和光学航空影像像点映射关系,成功解决了两种异源数据间的自动相关难题;

2) 利用LiDAR数据物方信息密集优势,借助于摄影测量空间后方交会计算可获得投影误差总体最

表2 LiDAR点云空间后方交会计算结果及影像视差互信息统计

Table 2 LiDAR point cloud space resection results and statistics of image parallax mutual information

迭代次数	X_s	Y_s	Z_s	φ	ω	κ	$T(X_0, Y_0, \theta)$	$\sigma_0/\text{像素}$	MI
1	262 369.69	4 001 398.04	1 846.14	0.909 8	-2.276 0	267.755 6	(24, -42, -5)	12.998	0.516 4
2	262 337.45	4 001 378.72	1 850.05	1.945 0	-1.641 7	267.666 6	(-21, 7, -1)	7.70	0.533 5
3	262 316.48	4 001 364.17	1 854.05	2.6016	-1.207 3	267.623 5	(1, 5, 0)	3.52	0.547 2
4	262 309.30	4 001 354.18	1 855.64	2.815 1	-0.936 8	267.583 2	(-2, 3, 0)	2.25	0.554 0
5	262 304.21	4 001 348.99	1 856.78	2.9810	-0.760 4	267.575 3	(-1, 2, 0)	1.50	0.557 7
6	262 299.24	4 001 343.19	1 857.76	3.134 9	-0.586 6	267.562 2	(0, -1, 0)	1.69	0.560 4
7	262 298.73	4 001 341.16	1 858.56	3.157 5	-0.527 4	267.543 2	(0, -1, 0)	1.19	0.561 7
8	262 296.72	4 001 341.48	1 858.78	3.2171	-0.530 4	267.554 9	(0, -1, 0)	1.05	0.562 0

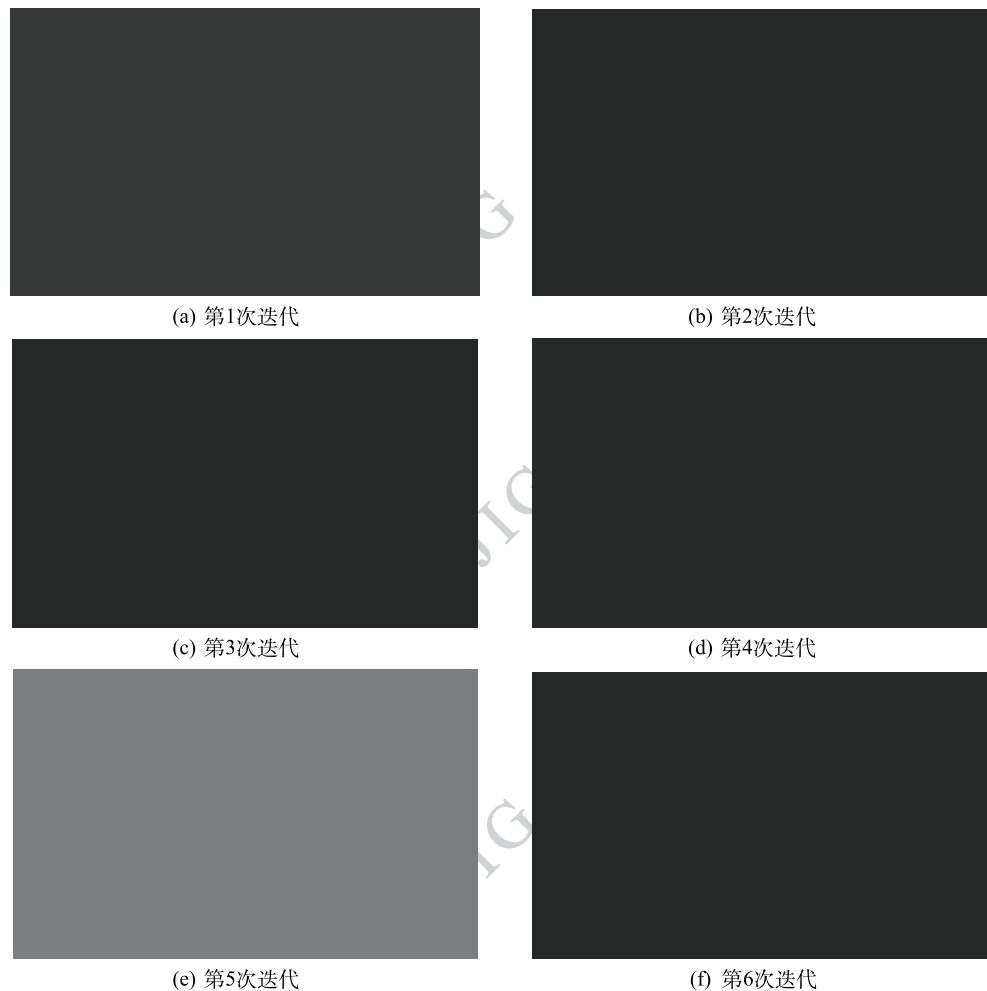


图5 视差图互信息迭代计算下的局部配准效果示意

Fig. 5 Effect of local registration on the iterative computation of parallax mutual information ((a) – (f) the registration result from 1st to 6th iteration, respectively)

小的空间配准参数并给出可靠的精度评定;

3)有效解决了立体航空影像与 LiDAR 数据的空间配准问题,自动化程度高且配准精度适中,理论上适用于不同场景类型的立体航空影像。表3列出了立体像对图3(a)(b)的最终配准参数。

表3 配准立体航空影像最终配准参数

Table 3 Final registration parameters of stereo imagery

影像	最后配准参数(线元素/m,角元素/(°))
图3(a)	$X_s = 262\ 296.72$, $Y_s = 4\ 001\ 341.48$,
	$Z_s = 1\ 858.78$; $\varphi = 3.217\ 1$, $\omega = -0.530\ 4$, $\kappa = 267.554\ 9$
图3(b)	$X_s = 261\ 624.24$, $Y_s = 4\ 001\ 353.99$,
	$Z_s = 1\ 866.05$; $\varphi = 2.211\ 3$, $\omega = -0.5212$, $\kappa = 267.7893$

参考文献(References)

- [1] Axelsson P. Processing of laser scanner data algorithms and applications [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2):138-147.
- [2] Habib A, Ghanma M, Morgan M, et al. Photogrammetric and LiDAR data registration using linear features [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(6): 699-707.
- [3] Deng F. Study on registration and objects feature extraction of LiDAR data and digital images [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. [邓非. LiDAR 数据与数字影像的配准和地物提取研究[D]. 武汉:武汉大学, 2006.]
- [4] Zhang F, Huang X F, Li D R. A review of registration of laser scanner data and optical image [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2008, (2):7-10. [张帆,黄先锋,李德仁. 激光扫描与光学影像数据配准的研究进展[J]. 测绘通报, 2008,

- (2):7-10.]
- [5] Besl P J, MacKay H D. A method for registration of 3-D shapes1 [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [6] Rottensteiner F, Jansa J. Automatic extraction of buildings from LiDAR data and aerial images [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34(4): 569-574.
- [7] Mitishita E, Habib A, Centeno J. Photo-grammetric and LiDAR data integration using the centroid of a rectangular roof as a control point[J]. The Photogrammetric Record, 2008, 23 (121): 19-35.
- [8] Zhang Y J, Xiong X D, Sheng X. Automatic registration of urban airborne LiDAR data and aerial images [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 18(3): 579-595. [张永军,熊小东,沈翔. 城区机载 LiDAR 数据与航空影像的自动配准[J]. 遥感学报, 2012, 18(3): 579-595.]
- [9] Zhang Z X, Zhang J Q. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. [张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.]
- [10] Hirschmüller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 2(30): 328-341.
- [11] Gehrke S, Morin K, Downey M, et al. Semi-global matching: An alternative to LIDAR for DSM generation[C]//The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission. Canada: ISPRS press,2010: 3-11.
- [12] Su G Z, Zheng S Y, Zhang J Q, et al. How to relate the OpenGL imaging process with exterior and interior parameters of photogrammetry [J]. Journal of Image and Graphics, 2006,11(4): 540-544. [苏国中,郑顺义,张剑清,等. OpenGL 模拟摄影测量方法研究[J]. 中国图象图形学报,2006,11(4): 540-544.] [DOI:10.11834/jig.20060489]
- [13] Shewchuk J R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation[J]. Computational Geometry-Theory and Applications,2002,22 (1-3): 21-74.
- [14] Li Y, Xue H B. OpenGL Function and Examples of Analysis Handbook[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2002. [李颖,薛海斌. OpenGL 函数与范例分析手册[M]. 北京:国防工业出版社,2002.]
- [15] Wu J, Yao Z X, Cheng M M. Airborne oblique stereo image dense matching by integrating SIFT and SGM algorithm [J]. Journal of Remote Sensing,2015,19(3):431 - 442. [吴军,姚泽鑫,程门门. 融合 SIFT 与 SGM 的倾斜航空影像密集匹配[J]. 遥感学报,2015,19(3):431-442.]
- [16] Zheng S Y, Huang R Y, Y Z. Registration of optical images with LliDAR data and its accuracy assessment [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2013, 79(8): 731-741.