

基于面特征和 SIFT 特征的 LiDAR 点云与航空影像配准

赵中阳, 程英蕾[✉], 何曼芸

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对 LiDAR 数据与航空影像融合中的配准问题,提出一种将面特征与点特征相结合的配准方法,首先由 LiDAR 点云生成深度影像,对深度影像和航空影像提取面特征,在此基础上采用 SIFT 算子提取点特征,完成 LiDAR 点云与航空影像的配准。文中方法采取了由面特征到 SIFT 特征的配准策略,减少了面特征配准的数据量和 SIFT 算法的计算量。从 ISPRS 提供的数据集中选取了 3 组数据进行实验,实验结果表明该方法能有效减少 SIFT 算子的特征描述符的数量,减少寻找正确匹配点的时间,在保证配准精度的情况下提高配准的效率,适用于城市地区等包含大量面特征地区的 LiDAR 点云与航空影像配准。

关键词 LiDAR; 图像配准; 面特征提取; SIFT 特征

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.012

中图分类号 P237 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0065-06

Registration of LiDAR Point Cloud and Aerial Image Based on Surface Feature and SIFT Feature

ZHAO Zhongyang, CHENG Yinglei[✉], HE Manyun

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077)

Abstract: In view of the registration between LiDAR data and aerial image fusion, this paper presents a registration method combining surface feature and point feature. Firstly, the depth image is generated by LiDAR point cloud, and the surface feature is extracted from the depth image and aerial image. On the basis of this, the SIFT operator is used to extract the point features for the registration of LiDAR point cloud and the aerial image. This method adopts a registration strategy from the surface features to the SIFT features, reducing the amount of data for registration of features and the computational complexity of SIFT algorithm. In this paper, three sets of data are selected from the data set provided by ISPRS. The experimental results show that this method can effectively reduce the number of feature descriptors of SIFT operator and the time of finding the correct matching point, and improve the registration efficiency under condition of ensuring the registration accuracy. This is applicable to LiDAR point cloud and aerial image registration including large area of feature area in urban area.

Key words: LiDAR; image registration; surface feature extraction; SIFT feature

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(41601436)

作者简介: 赵中阳(1994—),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事机载 LiDAR 点云处理研究。E-mail: zzyang027@163.com

通信作者: 程英蕾(1964—),女,河南南阳人,教授,主要从事图像处理、模式识别研究。E-mail: Ylcheng718@163.com

引用格式: 赵中阳,程英蕾,何曼芸.基于面特征和 SIFT 特征的 LiDAR 点云与航空影像配准[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(5):65-70. ZHAO Zhongyang, CHENG Yinglei, HE Manyun. Registration of LiDAR Point Cloud and Aerial Image Based on Surface Feature and SIFT Feature[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 65-70.

LiDAR 获取的数据主要是离散激光点云,具有高精度的空间几何结构信息,却缺乏光谱信息。而航空影像能够提供丰富的光谱、纹理等信息,2种数据的融合可以同时获取地物的空间信息和语义信息,有效弥补了单一数据源的不足^[1],能够提高目标描述的精度。

2种数据融合的前提和关键是 LiDAR 点云与影响的配准。目前两者配准的方法主要有3种^[2],一种是利用重叠影像进行密集匹配生成匹配点云,再与 LiDAR 点云数据进行 3D-3D 模型的配准。Stamos 等^[3]利用 SIFT 特征对影像序列进行匹配,然后用 SFM(Structure From Motion)恢复稀疏的三维点云,最后将影像点云和激光点云配准。Zheng 等^[4]首先用光束法对序列影像进行平差,然后将得到的三维点云与激光点云按照 ICP(Iterative Closest Point)方法进行匹配,最后用匹配出的同名激光点坐标来优化光学影像的内外方位元素。这种方法无法进行 LiDAR 点云与单张影像的配准,同时生成匹配点云的过程也会产生误差和降低精度。第2种是利用 LiDAR 数据的高程信息将点云数据转化成二维影像,再利用图像配准的方法进行配准。王蕾等^[5]利用高斯核函数构成梯度向量,并结合互信息作为相似性测度实现配准。钟成等^[6]等利用6元组松弛法实现 LiDAR 点云与航空影像的自动配准等。Wong 等^[7]先从卫星影像上提取 Harris 角点,再在深度影像中寻找匹配点。徐景中等^[8]通过构建建筑物结构特征来完成配准。第3种是建立遥感影像与 LiDAR 点云之间的直接配准关系,文献^[9]用直线特征建立遥感影像与激光点云的直接映射关系。

本文提出了一种将面特征和 SIFT 特征相结合的算法,在提取面特征的基础上,利用 SIFT 算子^[10]提取点特征完成配准,既减少了计算量,又较好地保留了面特征信息。

1 算法描述

本文通过规则网格来组织 LiDAR 点云数据,利用点云的高程信息生成深度影像,采用顶帽变换^[11]的方法提取地物点,进而利用区域生长提取深度影像中建筑物的面特征,同时通过聚类的方法提取航空影像中的面特征,提出了一种将 SIFT 算子提取的点特征与面特征相结合来完成 LiDAR 点云与航空影像的配准的方法。

1.1 点云面特征提取

本文采用规则网格^[12]组织点云数据,网格的宽度可以根据平均点距确定。规则网格化后生成的深度影像见图1。

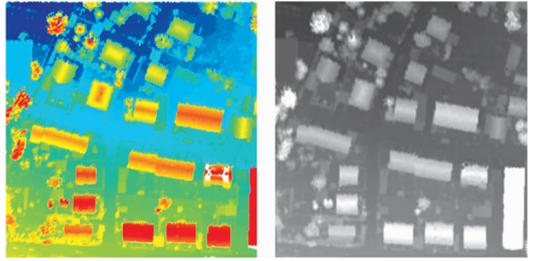


图1 原始点云和深度影像

Fig. 1 Original point cloud and depth image

在生成深度影像的基础上,采用顶帽变换的方法提取地物点。顶帽变换是形态学滤波^[13]中的一种运算,为原图像与“开运算”的结果图之差,将之运用于 LiDAR 数据处理中,顶帽变换定义为高程 H 和高程 H 开运算的差,见式(1),其中 S 为开运算的结构元素。

$$J = H - (HS) \quad (1)$$

结合多尺度滤波的思想^[14],通过变换结构元素尺寸的大小进行多次顶帽变换,最终通过加权得到对地面点和地物点分类的阈值,该算法具有一定的自适应性,能较好地分割地面点和地物点,提取结果见图2。

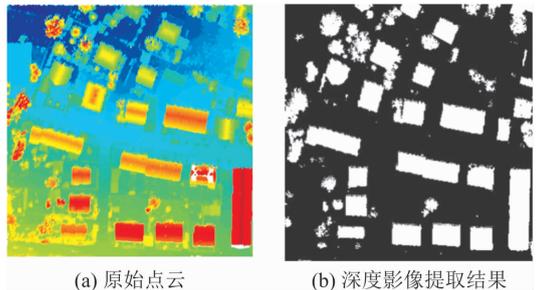


图2 地物点提取结果

Fig. 2 The extraction results of location point

提取地物点后,采用区域生长^[15]的方法进行最后的建筑物面特征提取^[16]。建筑物的屋顶一般连续且变化较小,而植被的点是离散的,高程相差较大,并且植被的面积一般较小,因此可以通过区域生长得到不同的区域,再设置不同的阈值来提取建筑物的面特征。区域生长的基本思想是将具有相似性的点集合起来构成区域。本文中设置生长准则为2点间的距离和高程差均小于一定阈值。

区域生长结束后,得到的结果中既包含建筑物屋顶,也包含植被,根据建筑物屋顶和植被的特点,计算每个区域高程的最大值和最小值并做差,将高程差大于给定阈值的区域认定为植被并删除,同时计算每个区域的面积,将面积小于给定阈值的也认定为非建筑物点同样删除,见式(2)。

$$\mathbf{H}(x, y) = \begin{cases} 0, & h_{i\max} - h_{i\min} > T_1 \\ 0, & S_i < T_2 \\ \mathbf{H}(x, y), & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}(x, y)$ 为深度影像中点 (x, y) 处的高程值; $h_{i\max}$ 、 $h_{i\min}$ 分别为第 i 个区域的高程的最大值和最小

值; S_i 是第 i 个区域的面积或点数; T_1, T_2 为给定的阈值。提取结果见图 3。

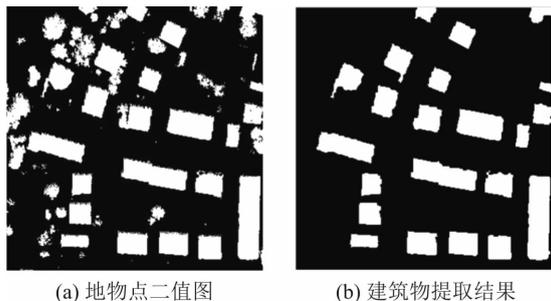


图 3 建筑物提取结果

Fig. 3 The extraction results of building

1.2 航空影像面特征提取

本文依据建筑物的形态、纹理、面积等特点进行航空影像中建筑物的粗略提取。本文提取航空影像中建筑物的方法如下:①航空影像中的每个点自成一类,去除红色点(本文使用的航空影像数据为彩色红外影像,植被呈现为红色);②计算相邻点之间的 R、G、B 三者的差值,当三者的差值均小于给定阈值时,判定 2 点所在的类的所有点为一类;③生成灰度图像,设定灰度值下限和上限,删除灰度值在阈值之外的点;④设定阈值将面积较小的类去除,进行形态学处理。

航空影像中建筑物粗略提取的过程和效果见图 4。从提取结果可以看出,上述方法可以去掉大部分非建筑物点,但也残留一部分和建筑物灰度值比较相似的非建筑物部分见图 5。

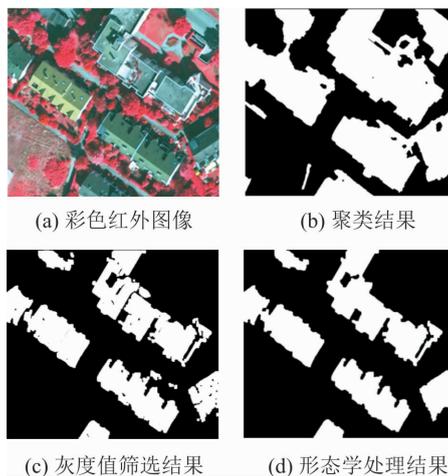


图 4 彩色红外图像建筑物提取结果

Fig. 4 The extraction results of building in color infrared image



图 5 非建筑物点残留

Fig. 5 The residual of non-building points

1.3 深度影像与航空影像配准

本文进行配准时提出了一种将面特征与 SIFT 特征相结合的配准方法。相对于点特征和线特征, LiDAR 数据中平面特征更易提取且更加稳定,但是其不足也十分明显。为了能有效利用面特征的优点完成配准并克服面特征配准的缺点,将面特征与 SIFT 特征结合。既解决面特征数据量大的问题,又无须提取角点或重心,能有效地利用面特征,同时也减少了 SIFT 算法的计算量。

尺度不变特征转换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 是一种计算机视觉的算法用来侦测与描述影像中的局部性特征。它在空间尺度中寻找极值点,并提取出其位置、尺度、旋转不变量,此算法由 David · Lowe 在 1999 年发表^[17], 2004 年完善总结^[10]。SIFT 特征是图像的局部特征,其对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性,能较好地解决图像配准问题,因此本文将 SIFT 特征与面特征相结合来解决 LiDAR 点云与影像的配准问题。

配准的基本原理就是将不同数据通过数学模型变换,实现空间坐标的统一和同名像点坐标的统一^[18]。对于同名的像点与物方点的对应关系的求解过程可归结为像点在不同坐标系下的转换与变换参数的求解过程。将 LiDAR 点云看作物方点,本文采用共线方程描述影像与物方点的对应关系,见式(3)。

$$\begin{cases} x = x - c \frac{r(X-X_0) + r(Y-Y_0) + r(Z-Z_0)}{r(X-X_0) + r(Y-Y_0) + r(Z-Z_0)} \\ y = y - c \frac{r(X-X_0) + r(Y-Y_0) + r(Z-Z_0)}{r(X-X_0) + r(Y-Y_0) + r(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x, y) 对应地面 (x, y, z) 的影像坐标; (x, y, z) 为物方坐标; x_p, y_p, c 为内方位元素即像主点的坐标和像主距; X_0, Y_0, Z_0 为外方位元素定位信息; r_{11}, r_{22}, r_{33} 是地面和影像坐标旋转矩阵。

在以 Y 轴为主轴的旋转系统下,旋转矩阵可表示为:

$$R = R \cdot R \cdot R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r & r & r \\ r & r & r \\ r & r & r \end{bmatrix} \quad (4)$$

配准的结果就是对外方位元素的求解。外方位元素包括方位元素定位信息 X_0, Y_0, Z_0 以及旋转角 φ, ω, κ 。

利用提取得到的 SIFT 特征进行配准时,首先寻找 SIFT 特征的匹配点对,深度影像中的关键点描述子为 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i128})$, 航空影像中的关键点描述

子为 $\mathbf{S}_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{i128})$, 计算两描述子之间的欧氏距离作为相似性度量, 见式(5), 当深度影像中的关键点描述子 \mathbf{R}_i 与航空影像中最近的关键点描述子之间的距离和次近的关键点描述子之间的距离之比小于给定阈值时, 认为两者是匹配点, 见式(6)。

$$d(\mathbf{R}_i, \mathbf{S}_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{128} (r_{ij} - s_{ij})^2} \quad (5)$$

$$\frac{\text{距离 } \mathbf{R}_i \text{ 最近的点 } \mathbf{S}_j}{\text{距离 } \mathbf{R}_i \text{ 的次最近点 } \mathbf{S}_j} < \text{Threshold} \quad (6)$$

1.4 基于粒子群算法(PSO)的搜索策略

寻找到匹配点对后, 采取粒子群优化算法作为搜索策略实现配准参数的寻优。粒子群优化算法的基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解^[19]。本文使用的是标准的 PSO 算法, 即具有惯性权重的粒子群算法。

下面是利用粒子群优化算法的配准步骤:

Step 1 输入待配准图像, 包括深度影像和航空影像, 选择空间变换模型。本文采用的空间变换模型为二维的刚体变换^[20], 如式(4), 即变换参数为旋转参数和平移参数。对配准影像进行预处理, 使 2 幅图像的尺寸一致。

$$\begin{cases} x' = (x \cos \theta + y \sin \theta) - T_x \\ y' = (y \cos \theta - x \sin \theta) - T_y \end{cases} \quad (7)$$

式中: (x', y') , (x, y) 为深度影像和航空影像中点的坐标; θ 为旋转角; T_x, T_y 为平移参数。

Step 2 以深度影像为参考图像, 根据初始化的随机解, 计算 2 幅图像的相似性测度 Q 作为优化函数。见式(6), 其中 n 为匹配点对数:

$$Q = \sum_{i=1}^n d(\mathbf{R}_i, \mathbf{AS}_i + \mathbf{T}) \quad (8)$$

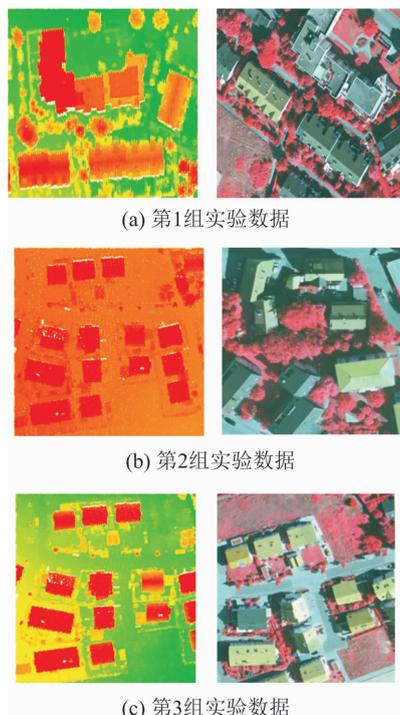
Step 3 通过粒子群优化算法, 不断改变空间变换参数的值, 搜索使相似性测度 Q 达到最大值对应的空间变换参数;

Step 4 利用搜索到最优空间变换参数, 得到航空影像与深度影像的对应点, 利用式(3)解算出外方位元素, 输出结果。

2 实验仿真

本文实验数据采用的是由 ISPRS-Commission III Working Group III/4 官方提供的 Vaihingen 地区测试数据, 该数据集的介绍见文献^[21]。点云数据的点云密度为 6.7 pts/m^2 , 单条航带点云密度为 4 pts/m^2 , 飞行高度 500 m。影像数据的类型为彩色红外图像, 影像分辨率为 0.08 m, 飞行高度 900 m。点云和影像分别在不同时间获取, 数据所包含的区域包括河流和城市地区, 包含各种建筑物类型,

具有一定的典型性。本文截取了 3 组城市地区的数据进行仿真, 验证本文算法的配准效果。



(a) 第1组实验数据

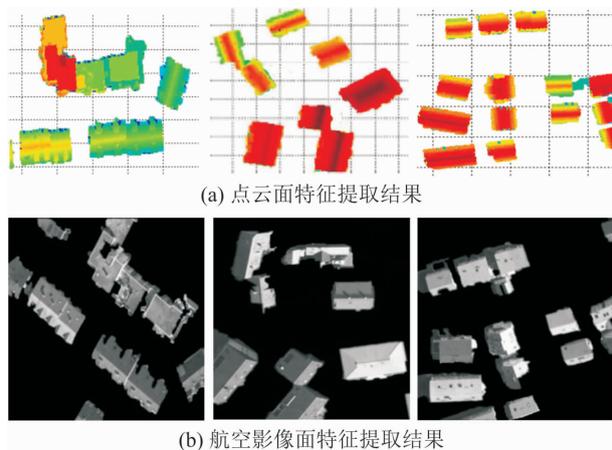
(b) 第2组实验数据

(c) 第3组实验数据

图6 实验数据

Fig. 6 Experimental data

点云生成的深度影像和航空影像提取的面特征结果见图 7。



(a) 点云面特征提取结果

(b) 航空影像面特征提取结果

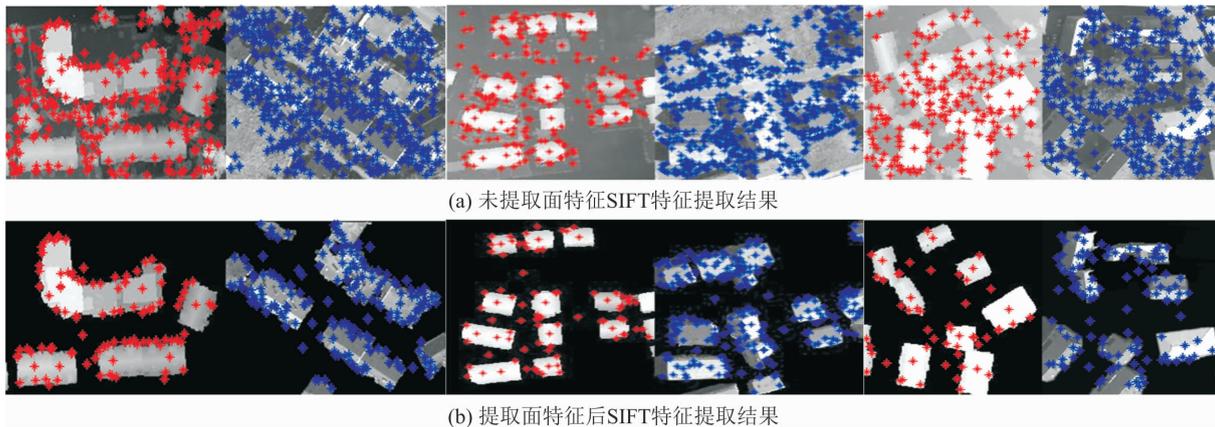
图7 面特征提取结果

Fig. 7 The extraction results of surface feature

面特征提取后, 在此基础上提取 SIFT 特征, 提取结果见图 8。图 8(a) 未提取面特征点云深度影像和航空影像灰度图提取 SIFT 特征的结果, 图 8(b) 为提取面特征后点云深度影像和航空影像灰度图提取 SIFT 特征的结果, 两者对比可以看出提取面特征之前的 SIFT 特征点较多, 提取面特征之后的 SIFT 特征点大大减少, 而且提取出的 SIFT 特征点基本位于建筑物的边缘或者面特征的几何重心上, 因此比较完好地保留了面特征, 可以保证配准准确

度的前提下有效地减少计算量。为寻找到的正确匹配关键点描述子,由图中可以看出结合了面特征的

SIFT 特征点基本不存在误匹配的现象。利用粒子群优化算法得到的配准结果见图 9。



(a) 未提取面特征SIFT特征提取结果

(b) 提取面特征后SIFT特征提取结果

图 8 SIFT 特征提取结果

Fig. 8 The extraction results of SIFT feature

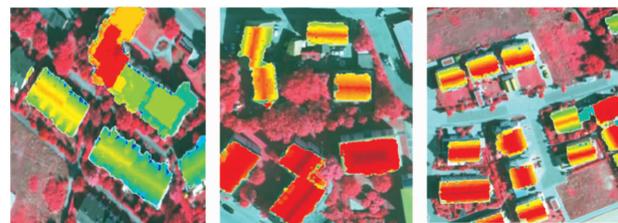


图 9 配准结果

Fig. 9 The result of registration

3 实验结果及分析

本文利用配准点位像素误差 C_p ^[22] 来计算配准精度,深度影像中的某点 P ,其在航空影像上的对应点的坐标为 $P(x, y)$,通过配准变换模型将 P 转换到影像坐标系得到 $P'(x', y')$,计算两点间的距离可以得到 P 和 P' 在影像坐标系的偏移,计算所有匹配点对的偏移距离再求平均得到配准点位像素误差 C_p ,见式(9)。

$$C_p = \sum_{i=1}^m |P_i(x, y) - P'_i(x', y')| \quad (9)$$

通过计算本文算法的误差见表 1,考虑到本文所用的点云数据平均密度为 4 pts/m^2 ,平均点距计算得到为 0.5 m ,影像的分辨率为 0.08 m 。因此认为误差是在合理的范围内,满足一个像素的配准精度,本文提出的配准算法可行,并且通过将面特征与 SIFT 特征相结合,减少了计算量,提高了配准的效率。

表 1 算法误差

Tab.1 The error of algorithm

第 1 组数据	第 2 组数据	第 3 组数据
0.47	0.45	0.53

4 结语

本文提出了一种将面特征与 SIFT 特征相结合的配准算法,首先利用规则格网处理点云数据生成深度影像,通过顶帽变换和区域生长来提取面特征,同时对彩色红外图像进行颜色聚类和灰度值筛选提取建筑物。再提取面特征的基础上,对两者采用 SIFT 算法提取点特征,这解决了面特征数据量大、重心和角点提取较难的问题,也减少了 SIFT 算法的计算量。最后用粒子群优化算法完成配准,实验结果显示误差在合理的范围内,配准结果是准确的。本算法在保证配准精度的基础上提高了配准的效率,实现了城区有大量建筑物条件下的点云与影像配准,但此算法仍然存在 SIFT 关键点描述子计算量大,面特征提取有待优化等问题。下一步将继续改进并扩展配准算法的适应区域。

参考文献(References):

[1] BALTSAVIAS E. A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54 (2-3): 83-94.

[2] 张良,马洪超,高广,等. 点、线相似不变性的城区航空影像与机载激光雷达点云自动配准[J]. 测绘学报, 2014, 43(4):372-379.

ZHANG L, MA H C, GAO G, et al. Automatic Registration of Urban Aerial Images with Airborne LiDAR Pointsbased on Line-Point Similarity Invariants [J]. Acta Geodaetica & Cartographica Sinica, 2014, 43 (4):372-379. (in Chinese)

[3] STAMOS I, LIU L Y, CHEN C, et al. Integrating Automated Range Registration with Multiview Geome-

- try for the Photorealistic Modeling of Large-Scale Scenes[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008,78:237-260.
- [4] ZHENG S, HUANG R, ZHOU Y. Registration of Optical Images with LiDAR Data and Its Accuracy Assessment[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2013,79(8):731-741.
- [5] 王蕾,林立文. 基于梯度互信息的光学影像和 LiDAR 强度图配准[J]. *地理空间信息*, 2010,8(3):56-58.
WANG L, LIN L W. Registration of Optical Image and LiDAR Intensity Map by Mutual Information Based on the Gradient [J]. *Geospatial Information*, 2010,8(3):56-58. (in Chinese)
- [6] 钟成,李卉,黄先锋,等. 利用 6 元组松弛法自动配准 LiDAR 数据与航空影像[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009,34(12):1426-1430.
ZHONG C, LI H, HUANG X F, et al. Automatic Registration of LiDAR Data and Aerial Imagery Using the 6-Tuple Relaxation Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(12):1426-1430. (in Chinese)
- [7] WONG A, ORCHARD J. Efficient FFT-Accelerated Approach to Invariant Optical-LiDAR Registration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008,46(11):3917-3925.
- [8] 徐景中,寇媛,袁芳,等. 基于结构特征的机载 LiDAR 数据与航空影像自动配准[J]. *红外与激光工程*, 2013, 43(12):3502-3508.
XU J Z, KOU Y, YUAN F, et al. Auto-Registration of Aerial Imagery and Airborne LiDAR Data Based on Structure Feature[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 43(12):3502-3508. (in Chinese)
- [9] HABIB A, GHANMA M, MORGAN, et al. Photogrammetric and LiDAR Data Registration Using Linear Features[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005,71(6):699-707.
- [10] LOWE D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [11] MASTERS B R. Digital Image Processing[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, 14(2):029901.
- [12] HOVAD J, KOMARKOVA J, SEDLAK P. Slope Based Grid Creation using Interpolation of LiDAR Data Sets[C]//ICSOFT. Iceland, 2013: 227-232.
- [13] 隋立春,张熠斌,柳艳,等. 基于改进的数学形态学算法的 LiDAR 点云数据滤波[J]. *测绘学报*, 2010, 39(4):390-396.
SUI L C, ZHANG Y B, LIU Y, et al. Filtering of Airborn LiDAR Point Cloud Data Based on the Adaptive Mathematical Morphology[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2010, 39(4):390-396. (in Chinese)
- [14] 何曼芸,程英蕾,聂玉泽,等. 综合不规则三角网和区域生长的建筑物提取方法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 18(3):54-59.
HE M Y, CHENG Y L, NIE Y Z, et al. A Building Extraction Method on Comprehensive Delaunay TIN Models and Region Growing [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2017, 18(3):54-59. (in Chinese)
- [15] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. Digital Image Processing Using Matlab[J]. *Digital Image Processing Using Matlab*, 2010, 21(84):197-199.
- [16] 黄先锋,李卉,王潇,等. 机载 LiDAR 数据滤波方法评述[J]. *测绘学报*, 2009, 38(5):466-469.
HUANG X F, LI H, WANG X, et al. A Review of Airborne LiDAR Data Filtering Methods [J]. *Acta Geodaetica & Cartographica Sinica*, 2009, 38(5):466-469. (in Chinese)
- [17] LOWE D. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features[C]// *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkyra, Greece: IEEE, 1999:1150.
- [18] 王明山. 机载 LiDAR DSM 深度影像与航空影像配准方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
WANG M S. Research on Airborne LiDAR DSM Depth and Aerial Image Registration Methods [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [19] 王芳. 粒子群算法的研究[D]. 重庆:西南大学, 2006.
WANG F. Research on Particle Swarm Optimization [D]. Chongqing: Southwest University, 2006. (in Chinese)
- [20] 姚春静. 机载 LiDAR 点云数据与遥感影像配准的方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2010.
YAO C J. Research on Airborne LiDAR Point Cloud Data and Remote Sensing Image Registration Methods [D], Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese)
- [21] ROTTENSTEINER F, SONG G, GERKE M, et al. ISPRS Test Project on Urban Classification and 3D Building Reconstruction[EB/OL]. (2013-12-12)[2017-9-27]. <http://www2.isprs.org/commissions/comm3/wg4/tests.html>.
- [22] 马洪超,姚春静,邬建伟. 利用线特征进行高分辨率影像与 LiDAR 点云的配准[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012,37(2):136-140,159.
MA H C, YAO C J, WU J W. Registration of Lidar Point Clouds and High Resolution Images Based on Linear Features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012,37(2):136-140,159. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)