

基于线特征的城区激光点云与影像自动配准

何培培¹ 万幼川¹ 杨 威¹ 秦家鑫¹

武汉大学遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079

摘要 鉴于激光点云和影像数据成像机理的差异以及现有配准基元的可获取性特点,通常采用基于特征的配准算法修正两者之间的转换关系,其中建筑物的边缘及角点为最常用的特征。针对城区建筑物分布密集、形状相似的问题,提出了一种基于道路线的机载激光雷达数据和高分辨率航空影像自动配准方法。该方法充分利用点云数据提供的高程与强度信息,提取出高精度的规则化道路矢量线;根据初始外方位元素建立点云数据和航空影像的近似变换关系,以道路矢量线在航空影像的投影位置为先验知识,采用改进的道路矩形整体匹配算法得到影像中的道路中心线,获取同名线特征;以同名道路线段的首末端点作为控制信息,利用基于欧拉角的空间后方交会算法解算新的影像外方位元素,实现航空影像和激光雷达数据的配准。实验结果表明,该方法利用道路特征实现航空影像与激光雷达点云的配准,提取特征少且配准精度较高,大大提高了工作效率。

关键词 遥感; 道路线特征; 机载激光雷达; 航空影像; 自动配准

中图分类号 P23 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0528001

Automatic Registration of Urban Laser Point Cloud with Aerial Image Data Based on Straight-Lines

He Peipei¹ Wan Youchuan¹ Yang Wei¹ Qin Jiaxin¹

School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China

Abstract In view of the imaging mechanism differences between the laser point cloud and image data, as well as existing registration primitives accessibility features, the registration based on features is the mainstream algorithm to refine the transformation of the two data sets. The corner points and edges of buildings are frequently used as characteristics. In order to deal with the weakness of building edge detection and reduce matching-related computation, a new automatic registration method based on airborne LiDAR data and high-resolution aerial image of the road information is proposed. Vector road centerlines are extracted from raw LiDAR data and projected onto related aerial images with the use of coarse exterior orientation parameters (EOPs). The corresponding image road features of each LiDAR vector road are determined with the improved total rectangle matching approach. The endpoints of the conjugate road features obtained from the LiDAR data and aerial images are used as ground control points in space resection adjustment to refine the EOPs. Experimental results show that this method characterized by the road features can not only extract fewer features, but also improve the efficiency of data processing in auto-registration of aerial imagery with airborne LiDAR data.

Key words remote sensing; road line feature; airborne LiDAR; aerial image; automatic registration

OCIS codes 280.3640; 280.4750; 280.4788

1 引 言

随着传感器技术与激光技术的快速发展,机载激光探测与测距简称机载 LiDAR,凭借其快速、精确获取

收稿日期: 2014-10-30; 收到修改稿日期: 2014-12-29

基金项目: 国家 863 计划(2013AA122104-3)、博士点科研基金(20130141130003)

作者简介: 何培培(1988—),女,博士研究生,主要从事遥感影像处理与数字摄影测量方面的研究。E-mail: he_pei@whu.edu.cn

导师简介: 万幼川(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事摄影测量与 LiDAR 数据处理、遥感数据处理与应用等方面的研究。E-mail: ychwan@whu.edu.cn(通信联系人)

地形信息的特点,已成为目前获取城市三维信息的重要手段^[1],该系统不仅能够提供高精度高程信息的点云数据,而且与其对应的影像数据特征连续、光谱信息丰富。两种数据对目标的描述有诸多的互补性,二者的融合处理对自动生成数字高程模型^[2]、城市建模^[3]、目标识别^[4]等领域的应用大有裨益。机载激光雷达系统中各传感器间的系统误差,导致数码相机和激光扫描仪并非严格意义上的统一坐标系^[5-6],因此实现两种数据间的配准是二者集成应用前需要解决的首要任务,具有十分重要的意义。

在点云数据与光学影像的配准方面,国内外众多学者已进行了大量的研究,例如直接或间接在点云数据和光学影像之间寻找同名特征实现配准,或者利用传统摄影测量方法将光学影像密集匹配为测量点云,按照某种原则计算两点集之间的坐标转换函数,实现激光点云与影像的配准^[7]。目前,基于特征的配准研究是主流算法,例如,张永军等^[8]在分析对比现有配准方法的基础上提出一种直接从机载激光雷达点云中提取建筑物轮廓线,以建筑物角特征为配准基元的自动化配准方案,经实验证明能够取得较好的配准效果;Kwak等^[9-10]分别采用了建筑物屋顶平面的重心、建筑物边缘以及角点作为配准基元,实现两种数据源间的配准;Mastin等^[11]将激光点云内插成强度图像利用互信息作为相似性测度实现两种数据间灰度层次上的配准;Abedini等^[12]则是采用基于尺度不变的方法实现了强度影像和光学影像间的配准;徐景中等^[13]将机载激光点云内插成距离图像,分别在距离图像和航空影像上提取直线特征,并利用直线特征的距离、角度等关系构建建筑物结构特征,以此实现两种数据间的配准。综上所述,目前基于特征的特征点云数据与影像配准算法中,大多学者选择建筑物(角点、边缘线以及结构特征)为配准基元,由于线特征具有良好的稳定性,本文依然采取直线特征作为配准基元,但是城区建筑物分布密集,形状结构多样,会加大匹配过程的加大工作量,而且容易产生误匹配。道路中心线是一种线状地物,具有方向性,且在不同分辨率影像上都比较明显,因此选择城区内道路中心线代替建筑物边缘,并设计了一种基于道路信息的激光点云与航空影像自动化配准方案。主要工作为:1)提取点云道路中心线。相对于道路边缘,点云数据中道路中间区域因较少遮挡且分布稳定,直接提取可靠性高的道路中心线,减少因内插产生的误差。2)匹配中搜索策略的选择。针对高分辨率遥感影像道路提取中的非道路噪声影响以及算法自动化需求,本文以点云提取的道路矢量线作为先验知识,利用外方位元素(EOP)初值对矢量数据进行反投影后,矢量线在影像上的初始投影提示着道路的大致位置,根据道路的方向性,只需在矢量线段法线方向的一定范围内(缓冲区)进行搜索,便可获得对应的道路中心线。不但可以缩短搜索范围,而且可以提高算法自动化程度。3)配准函数基元选择。由匹配提取的同名道路中心线段同时具备了线特征以及道路特征的属性(结构、距离和方向),因此具有很强的约束,可选择同名端点作为控制信息,减少计算量,实现航片外方位元素修正。

2 特征提取与匹配

激光点云和影像数据成像机理不同,对于两类数据的配准不能完全使用普通图像配准方法,但仍可以分解为配准基元、相似性测度、变换函数和匹配策略4个基本问题^[14],而特征提取与匹配则是激光点云与影像数据配准的关键。通过点云预处理、强度信息与面积约束、曲线拟合等步骤直接从激光雷达点云中提取道路中心线(称为点云矢量线),结合初始外方位元素将其投影到航空影像上,采用一定的相似性测度在影像上自动提取与矢量线对应的道路特征。

2.1 激光雷达点云中道路特征的提取

道路信息是基础地理信息的重要组成部分,机载激光雷达技术的快发展为快速提取道路信息提供了新的途径。通过分析道路的属性特征以及基本形态特征,利用文献[15]的机载激光雷达点云数据城区道路提取方法,运用机载激光雷达点云数据的三维坐标信息和激光强度信息,并结合道路点所呈现的激光强度特征和几何形状特征,辅以边界提取和数学形态学细化方法,提取出道路中心线,从而得到激光雷达数据的道路矢量线特征,主要步骤如下:

1)点云预处理。由于激光雷达点云数据量较大且呈离散不规则排列,必须对数据建立规则的虚拟格网索引,结合点密度选择合适的格网大小,根据每个离散激光脚点的平面坐标,计算其所属的格网子块,获得该点在整个虚拟格网中进行索引时的行列号。

2) 地形坡度滤波。在激光雷达点云中,道路点高程一般与地面接近,通过基于虚拟格网的地形坡度滤波方法可以滤除建筑物、树木等高程较高的点,而将道路等地面点保留下来。遍历所有格网,得到每个格网的高程最低点 E_{\min} ,并分别计算当前格网 E_{\min} 与其他 8 邻域格网内高程最低点的坡度,若坡度值大于给定阈值(阈值经验值取 0.3),则将该格网内所有点作为非地面点删除,否则,对当前格网中的每个点,再次计算它与 8 个邻域格网的高程最低点的坡度,若坡度值小于给定阈值,则将该点可作为地面点保留。

3) 强度、面积信息约束。滤波后所保留的地面点中既包含道路点,也包含草地、裸地等其他地面点,根据道路激光点所呈现的强度信息,可剔除大部分非道路地面点,而对于一些与道路具有相似强度特征点,采用基于边长和面积约束的 CD-TIN 方法^[15]精化道路点云。

4) 中心线提取。通过以上步骤,得到了呈现条带状的道路点集,引入 α -Shapes 方法提取出该离散点集的边界线,将边界包含的区域栅格化,并采用数学形态学对道路区域进行细化与直线分段拟合,从而得到道路的中心线,以矢量形式存储。

2.2 基于点云矢量线影像道路信息的自动提取

与中、低分辨率遥感影像相比,高分辨率遥感影像能够表示更多的地面目标和细节特征,特别是道路特征,在城市区域,道路是具有一定的宽度、形状规则、长度大于或等于一个街区的较窄矩形或带状线^[16];但另一方面,在高分辨率影像上也存在一些由斑马线、汽车、行人等造成的非道路噪声^[17]。目前,针对高分辨率城区影像的道路提取,通常以图像分割为基础来简化处理,因此本文在此理论基础上,结合点云矢量线,改进 Zhu 等^[18]提出的矩形整体匹配方法自动提取影像道路信息,实现点云矢量线和影像道路中心线的匹配工作。

2.2.1 影像道路特征分析

图像分割的关键在于分割阈值的选择,为了提高影像道路提取过程的自动性,对比不同阈值的分割效果,发现由日本大津提出的最大类间方差法(OTSU,OTSU 是一种自适应阈值分割方法)^[19],计算简单、稳定有效。图 1(a)是测区数据中某段道路影像,采用 OTSU 算法得到的分割图像可以提取初始道路信息图,如 1(b)所示,然而对于依然存在的非道路噪声,采用数学形态学中膨胀和腐蚀原理对分割影像进行优化处理,其中关于膨胀 $D_c(A, B)$ 和腐蚀 $E_c(A, B)$ 的定义为

$$\begin{cases} D_c(A, B) = \max\{a[m-j, n-k] + b[j, k]\} \\ E_c(A, B) = \min\{a[m+j, n+k] - b[j, k]\} \end{cases} \quad (1)$$

式中 A 为目标影像, B 为形态学中的结构元素, $a[x, y]$ 、 $b[x, y]$ 分别是 A 与 B 中像素 (x, y) 的像素值, (m, n) 、 (j, k) 均为 A, B 中正在处理的像素坐标。由于结构元素的尺寸和形状在数学形态学的应用中起着至关重要的作用,本文采用文献[20]中的方法构造一个自适应结构元素,该结构元素是依据图像本身的特征信息构造的,不局限于现有的矩形、圆形等固定形状,对于一些噪声像素,可以进行有效的剔除,最终得到的二值化影像,如图 1(c)所示。



图 1 阈值分割后的道路影像。(a) 原始影像上的道路; (b) OTSU 自动阈值分割; (c) 影像形态分割结果
Fig.1 Road image with threshold segmentation. (a) Road in the original image; (b) segmentation with OTSU; (c) segmentation with morphology

2.2.2 设计矩形函数

经 OTSU 自动阈值分割和数学形态学处理后的二值化影像分割效果较好,道路整体上可以做成是具有一定宽度的矩形,而整体矩形匹配方法的基本思想是设计一个最佳矩形,使得矩形内部道路成分尽量多,矩形的外部非道路成分尽量多。假定二值化图像 $g(x, y)$ 中的道路为白色即 $g(x, y)=1$,背景为黑色即 $g(x, y)=0$,道路矩形窗为 R_1 ,宽度为 W_1 ,长度为 L_1 ,背景矩形窗为 R_2 ,宽度为 W_2 ,长度为 L_2 ,道路 $s_1(x, y)$ 与背景 $s_2(x, y)$ 的属性值定义为

$$s_1 = \begin{cases} 0 & [g(x, y) = 1, (x, y) \in R_1 \quad \text{or} \\ & g(x, y) = 0, (x, y) \notin R_1] \\ 1 & [g(x, y) = 0, (x, y) \in R_1 \quad \text{or} \\ & g(x, y) = 1, (x, y) \notin R_1] \end{cases} \quad (2)$$

$$s_2 = \begin{cases} 0 & [g(x,y) = 0, (x,y) \in R_2 \text{ or} \\ & g(x,y) = 1, (x,y) \notin R_2] \\ 1 & [g(x,y) = 1, (x,y) \in R_2 \text{ or} \\ & g(x,y) = 0, (x,y) \notin R_2] \end{cases} \quad (3)$$

2.2.3 道路特征提取

对于高分辨率航空影像中,Zhu等^[18]提出的矩形整体匹配方法能够得到较好的结果,但需要事先在道路中心线附近给定种子点,以及矩形窗口的宽度、方向,约束了算法的自动化程度。而本文提出的激光点云与影像自动配准方案,便是以点云中提取的道路矢量线为先验知识,依据文献[18]中矩形整体匹配方法的原理提取影像中道路特征,获取两种数据源的同名特征,具体技术路线可表述如下:

1) 利用初始外方位元素,按照共线条件方程可将点云矢量线反射到航空影像上,矢量线在影像上的投影位置提示着道路的大致位置。

2) 由于道路具有方向性,因此在投影矢量线段局部法线方向的一定范围内(缓冲区)进行搜索,如图2所示,按照(4)式计算此范围内的道路矩形 R_1 与背景矩形 R_2 属性值和 $\sum S$,对比所有 $\sum S$,求得一最小值,记为 $\sum S_{\min}$,则 $\sum S_{\min}$ 对应的道路矩形 R_1 为最佳匹配矩形。

$$\sum S = \sum_{L,W,\theta} [s_1(x,y) + 2 \times s_2(x,y)], \quad (4)$$

式中 L 是投影矢量线段的长度, W 是矩形窗口宽度, θ 是平行于投影矢量线。

3) 一般情况下,基于点云矢量线投影的初始方向(见图3中蓝色线段)得到 $\sum S_{\min}$ 对应的矩形 R_1 便可视为道路特征(如图3中绿色矩形窗),但为了优化匹配结果,需小幅度改变初始方向 K 值(根据实验,取矢量线段末端点在 K 垂直方向变化 ± 10 pixel为方向的变化范围),重新计算矩形 R_1 、 R_2 的属性值和,并取 $\sum S$ 的最小值,得到最佳道路矩形(见图3中红色矩形窗)。

4) 匹配结束后,便可将提前的最佳矩形窗的中心线作为影像道路特征(如图3中直线 ab 所示)。

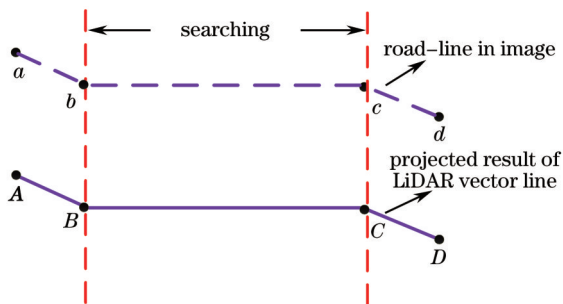


图2 道路特征搜索示意图

Fig.2 Road feature search sketch

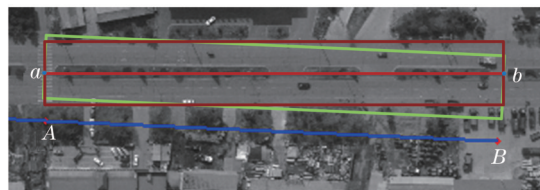


图3 基于本文算法的部分影像道路特征提取结果

Fig.3 Part of road feature extraction with the proposed method

3 点云与影像数据整体配准流程

采用改进的基于道路直线的矩形整体匹配算法可得到与点云矢量线同名的道路中心线。矢量数据是一系列点连成线段所组成,因此可以采用同名线段的端点作为计算激光点云与影像数据投影关系的控制点。以激光雷达点云矢量线段的端点作为地面控制点,以其同名影像道路中心直线段的首末端点为该控制点的像点,利用摄影测量学中基于欧拉角的传统空间后方交会算法获得新的影像外方位元素,转换函数形式如下^[21]:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases}, \quad (5)$$

式中需要求解影像的6个外方位元素 $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$, x_0, y_0, f 为已知的影像内方位元素,角元素 φ, ω, κ 和9个方向余弦 a_i, b_i, c_i ($i=1,2,3$)之间的数学关系可参考文献[21]。根据影像新旧外方位元素计算迭代过程中角元素的改正数,并判断此姿态参数改正数是否小于限差(此限差一般规定为 10^{-6} rad),或者迭代次数是否达到极限(一般6~10次),若满足条件则迭代完成;否则便在前一次平差结果的基础上重新进行影像与道路矢量线的匹配,如此多次重复,直至改正数单位权中误差小于给定的阈值或迭代次数大于某阈值时结束。

基于道路信息的城区激光点云与影像自动配准的技术方案可用图4描述,相关内容可分三步概括:1) 直接在激光雷达点云中提取道路特征,通过曲线拟合得到规则化的道路矢量线;2) 利用定位定向系统(POS)数据或控制点信息求解外方位元素初值,并进行矢量线到航空影像的投影,根据一定的相似性测度寻找与其同名的影像道路特征;3) 依据摄影测量空间后方交会原理,以共线条件方程为基准,将同名道路线特征中的首末端点作为控制信息重新解算影像外方位元素,实现两种数据间的配准。

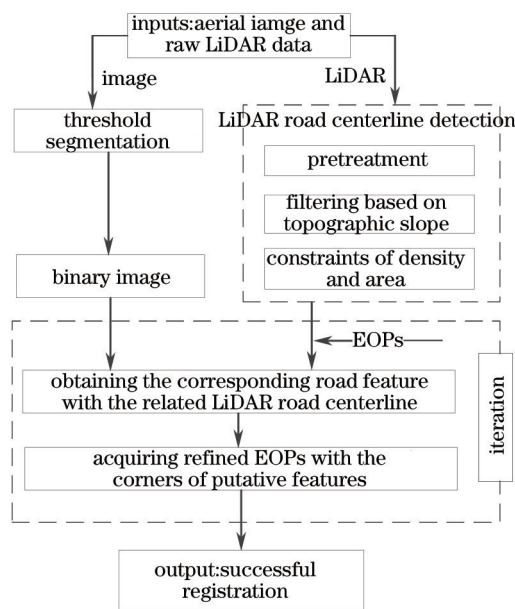


图4 本文自动配准算法流程图
Fig.4 Flowchart of the proposed approach

4 实验结果与分析

采用不同类型的机载激光扫描系统对不同测区的部分航空影像以及对应的点云数据进行配准试验,验证基于道路信息的机载激光点云与航空影像自动配准方法的有效性。两个测区均是城市区域某一部分,主、次干道分布清晰,图5分别列出了两个测区内航空影像与对应激光点云的分布情况,表1描述了两测区内影像与点云数据的具体技术参数。

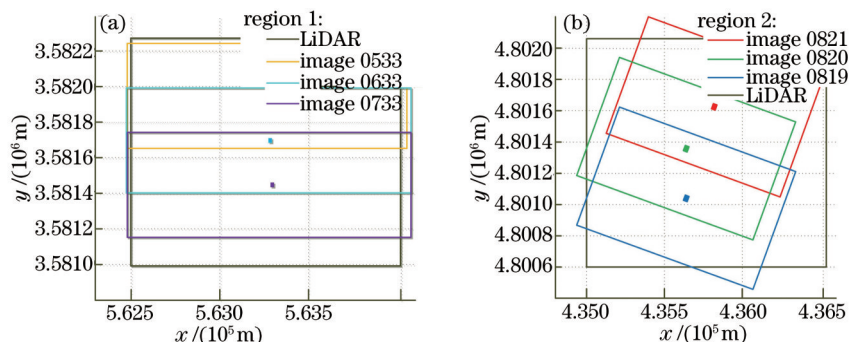


图5 测区内机载激光雷达点云和航空影像数据分布图

Fig.5 Distribution of airborne LiDAR point clouds and aerial image data in coverage

表1 航空影像与激光雷达点云技术参数

Table 1 Aerial image and LiDAR point cloud technical specifications

Item	Aerial image		LiDAR point cloud		
	Region 1	Region 2	Item	Region 1	Region 2
Camera	TOPDC-5	DMC II-140	LiDAR system	ALTM 3070	LMS-Q160
Image size /pixel	7212×5408	12096×11200	Number of points	1 872 668	2 639 589
Pixel size /mm	0.0068	0.0072	Point density /(point /m ²)	1.2	2.1
Focal length /mm	35	92	Average elevation /m	1200	630
Resolution /m	0.1	0.05	Coverage /km	1.3×1.2	1.3×0.93

图6是采用本文提出基于道路信息的航空影像与点云矢量线匹配算法实现的测区1编号0533航空影像道路提取结果。由于直接从激光雷达点云中提取的道路矢量线是一系列点连成的线段,为了方便选择同名点对作为空间后方交会方法的控制点,选择沿道路方向发生改变的点作为矢量线段的端点,其分布情况如图6(c)、(d)中红色端点所示。根据点云矢量线在影像中的初始投影位置,采用改进的整体矩形匹配算法,采用迭代循环策略,提取对应的航空影像道路中心线,由图6(d)的单幅影像整体以及局部匹配结果可知,本文的算法能够自动且有效地实现二者间的匹配。

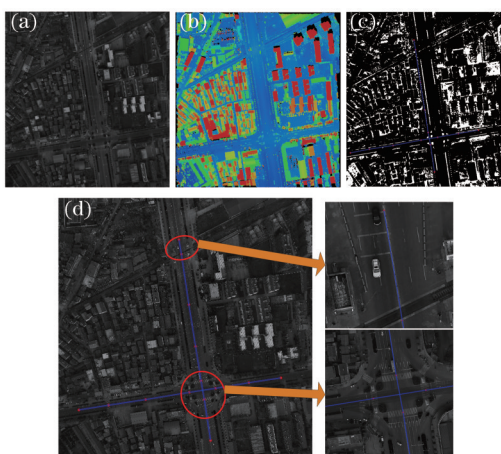


图6 测区1编号0533航空影像与点云矢量线匹配结果。(a)编号0533航空影像;(b)激光雷达点云数据;(c)初始投影结果;(d)最终匹配结果

Fig.6 Matching results of ID 0533 aerial image with LiDAR vector line of Region 1. (a) ID 0533 aerial image;(b) LiDAR point cloud data; (c) initial projected result; (d) final matching results

图7是利用本文提出的基于道路信息的激光点云与影像配准方案实现的测区2编号0821航空影像道路提取及参数解算结果,图7(a)是航空影像灰度图,图7(b)是与航空影像对应的点云数据(按高程显示),图7(c)则表示点云道路矢量线端点在点云数据中的分布(按强度显示)。利用初始外方位元素可以将点云矢量线投影到二值化影像上,由图7(d)可以看出反投影的矢量线就在影像道路特征附近,因此采用改进的基于直线道路矩形整体匹配算法时,可以缩小在矢量线法线方向的搜索范围,减少计算量,提高算法效率。通过匹配得到同名道路特征线段,利用同名线段的首末端点作为解算外方位元素的控制点,若角元素改正数小于规定的限差阈值,则迭代收敛,输出当前影像外方位元素作为配准结果;否则,以此作为初值重新计算,直到迭代收敛或达到最大迭代次数为止。实验结果表明这种循环定位方法可以得到比较满意的结果,图7(e)是输出的最终匹配结果,可以看出影像道路中心线和矢量线能够很好地叠加。由图7(f)可知,编号0821的航空影像平差解算过程在迭代6次后达到收敛,其外方位元素精度得到了10倍左右的提高。

参数解算的精度决定了配准的精度,为了评价解算参数的精度,人工在三幅影像上分别选取多条检查线,其选择原则是人工在影像上选择和点云矢量直线段对应的线段,将平差得到的航片外方位元素值代入矢量线段的坐标(物方坐标)中,使物方坐标反投影到像方;在像方空间中,计算物方反投影来的线段与人工在像方选取的线段首末端点间的残差,以此作为衡量配准结果好坏的标准。由于航空影像分辨率远

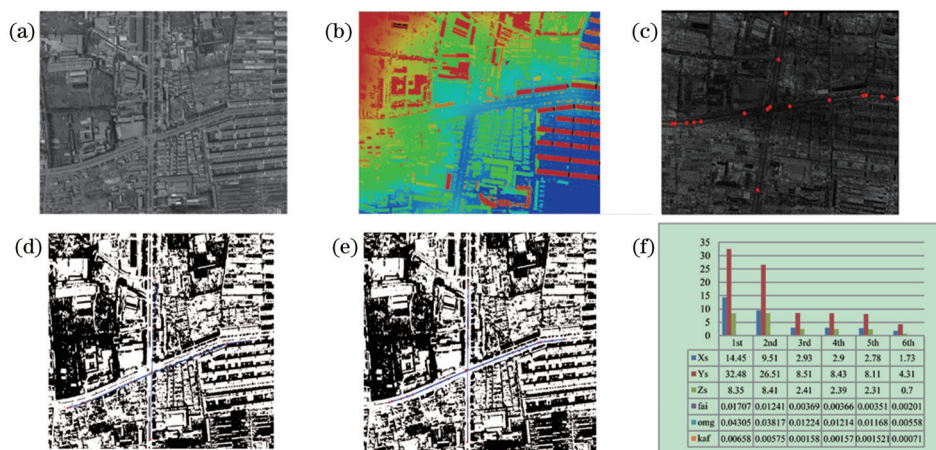


图7 测区1编号0821航空影像道路线提取及匹配结果。(a)编号0821航空影像;(b)激光雷达点云;(c)点云矢量线分布;(d)初始投影结果;(e)最后一次平差结果;(f)外方位元素计算精度

Fig.7 Matching and extraction results of ID 0821 aerial image of Region 1. (a) ID 0821 aerial image; (b) LiDAR point cloud; (c) distribution of LiDAR vector line; (d) initial projected result; (e) final adjustment result; (f) computational accuracy of the EOPs
远高于激光雷达点云的等效分辨率,因此选择激光雷达点云所生成的距离图像最高分辨率为单位进行误差统计,结果见表2和表3,表3中, RMSE为均方根。

表2 检查点的残差(单位: LiDAR 等效像素)

Table 2 Residual errors of check points (unit: LiDAR equivalent pixel)

ID	Starting point		End point		ID	Starting point		End point	
	Δx	Δy	Δx	Δy		Δx	Δy	Δx	Δy
0819-1	0.78	0.77	-0.36	-1.20	0820-4	0.09	0.62	0.14	0.27
0819-2	0.20	-0.41	0.31	0.22	0820-5	1.38	-1.44	1.15	1.08
0819-3	0.88	0.62	1.27	0.68	0820-6	-1.21	-1.64	-0.59	-2.03
0819-4	1.52	1.06	0.17	0.57	0821-1	-1.05	0.43	-0.26	-0.39
0819-5	-0.91	0.84	-1.68	0.75	0821-2	0.30	-0.72	0.32	-1.31
0819-6	0.66	-0.05	-1.19	0.38	0821-3	-0.87	0.2	-0.54	0.98
0820-1	-1.28	1.15	-0.76	1.18	0821-4	-0.31	0.02	-0.30	0.03
0820-2	-1.17	0.53	1.0	1.76	0821-5	1.04	-0.2	0.42	-0.31
0820-3	-0.08	0.47	-1.37	-1.79	0821-6	0.8	0.1	-0.24	0.51

表3 两测区内检查线误差统计(单位: LiDAR 等效像素)

Table 3 Error statistics of check lines of the two test data sets (unit: LiDAR equivalent pixel)

ID	Mean		RMSE	
	Δx	Δy	Δx	Δy
0533	0.01	0.04	0.71	0.77
0633	0.25	-0.77	1.49	1.57
0733	0.07	0.37	0.93	0.76
0819	0.14	0.35	0.98	0.63
0820	-0.23	0.01	0.99	1.34
0821	-0.06	-0.06	0.64	0.59

表2列出了测区2中三幅影像不同检查线首末端点(简称为检查点)配准前后的残差结果,表3统计了两测区内每幅影像检查线误差,其中 Δx 、 Δy 分别表示点云矢量线反投到影像后与检查线在行列方向上的残差。此外,为验证求解的转换参数能否适用于测试数据中房屋区域的配准,特选择原始激光点云中几处房屋区域进行实验,得到房屋点云与航空影像的配准前后结果,如图8所示。由表2、3可知,配准后检查点在行向、列向最大残差分别为1.68、2.03,并且大部分检查点残差都在1 pixel之内;测区中房屋点云配准前后效果如图8所示,

配准后的房屋点云能够很好地叠加在对应的航空影像上,由此可见,利用道路信息实现机载激光雷达数据与航空影像间投影参数解算的方法,其参数精度完全能够满足航空影像与激光点云数据融合处理的需求。

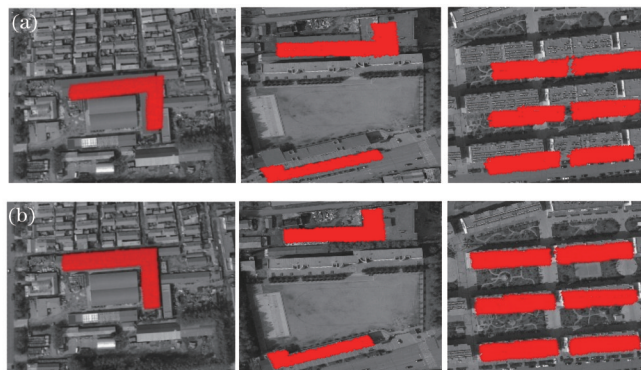


图8 测区中房屋点云配准前后效果图。(a) 配准前叠加效果;(b) 配准后叠加效果

Fig.8 Comparison of the fitness of the roof points of the images before and after registration. (a) Superposition effect before registration; (b) superposition effect after registration

5 结 论

为实现城市区域机载激光雷达点云与高分影像数据的自动配准,在分析对比现有配准方法的基础上,提出了一种基于道路信息的航空影像与激光点云高效率的自动配准方法。该方法直接在激光雷达点云中提取道路矢量线,利用初始外方位元素进行矢量线到航空影像的初始投影,采用基于直线道路的矩形整体匹配法完成影像道路特征提取,将同名道路特征中的首末端点作为控制点,经多次平差可以得到较好的配准结果。经过实验分析,得出如下结论:1) 相对于城市区域中建筑物特征的提取,主干道等道路特征更容易被辨别,减少了工作量,并且不需要将激光雷达点云内插成灰度图像,避免因此造成的精度损失;2) 利用初始外方为元素进行点云矢量线到影像的反投影,既可以减少影像道路特征提取时的搜索范围,又无需人工设置种子点,保证了整个算法的自动性;3) 采用同名道路直线段的首末端点作为控制点,利用共线条件方程经多次循环迭代求解影像外方为元素,逐次逼近最优的定位结果,进一步提高了配准精度。

参 考 文 献

- 1 Habib A F, Cheng R W T, Kim E M, *et al.*. Automatic surface matching for the registration of LiDAR data and MR imagery[J]. ETRI J, 2006, 28(2): 162-174.
- 2 Shao Jie, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Research on fusion of 3D laser point clouds and CCD image[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0514001.
邵 杰, 张爱武, 王书民, 等. 三维激光点云与 CCD 影像融合的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0514001.
- 3 Hartfield K A, Landau K I, Van Leeuwen W J. Fusion of high resolution aerial multispectral and LiDAR data: Land cover in the context of urban mosquito habitat[J]. Remote Sensing, 2011, 3(11): 2364-2383.
- 4 Liang Xiaowei, Yang Fengbao, Wei Hong, *et al.*. Land-cover classification based on dealing with shadows and fusing lidar data[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041006.
梁小伟, 杨风暴, 卫 红, 等. 基于激光雷达数据阴影处理和图像融合的地物分类方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041006.
- 5 Cui Hongxia, Su Guozhong, Zhao Xuhui. Self-calibration of exterior orientation parameters of aerial digital images based on airborne LiDAR point clouds[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 445-448.
崔红霞, 苏国中, 赵绪辉. 基于机载激光点云数码影像外方位元素自检校[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 445-448.
- 6 Wang Zhihua, Zhang Aiwu, Wang Shumin, *et al.*. Airborne radar calibration system based on the overlap strip[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0214003.
王致华, 张爱武, 王书民, 等. 基于重叠航带的机载激光雷达系统检校[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0214003.
- 7 Zuo Chao, Lu Min, Tan Zhiguo, *et al.*. A novel algorithm for registration of point clouds[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214004.
左 超, 鲁 敏, 谭志国, 等. 一种新的点云拼接算法[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214004.

- 8 Zhang Yongjun, Xiong Xiaodong, Shen Xiang. Automatic registration of urban aerial imagery with airborne LiDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(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,2012,16(3):579–595.
- 9 Kwak T S, Kim Y I, Yu K Y, *et al.*. Registration of aerial imagery and aerial LiDAR data using centroids of plane roof surfaces as control information[J]. KSCE J Civil Eng, 2006, 10(5): 365–370.
- 10 Choi K, Hong K, Lee I. Precise geometric registration of aerial imagery and LIDAR data[J]. ETRI J 2011, 33(4): 506–516.
- 11 Mastin A, Kepner J, Fisher J. Automatic registration of LIDAR and optical images of urban scenes[C]. IEEE, 2009: 2639–2646.
- 12 Abedini A, Hahn M, Samadzadegan F. An investigation into the registration of LIDAR intensity data and aerial images using the SIFT approach[J]. Int Arch Photogramm, Remote Sens Spatial Inform Sci, 2008, XXXVII(B1): 169–176.
- 13 Xu Jingzhong, Kou Yuan, Yuan Fang, *et al.*. Auto-registration of aerial imagery and airborne LiDAR data based on structure feature[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3501–3506.
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,2013,42(12):3501–3506.
- 14 Zhang Fan, Huang Xianfeng, Li Deren. 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.
- 15 Peng Jiangui, Ma Hongchao, Gao Guang, *et al.*. Road extraction from airborne LiDAR point clouds data in urban area[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012, (9): 16–19.
彭检贵,马洪超,高广,等.利用机载LiDAR点云数据提取城区道路[J].测绘通报,2012,(9):16–19.
- 16 Wang Wenfeng, Zhu Shuhua, Feng Yihao, *et al.*. Parallel edges detection from remote sensing image using local orientation coding[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315001.
王文锋,朱书华,冯以浩,等.基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别[J].光学学报,2012,32(3):0315001.
- 17 Hu Xiangyun, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. An approach of semiautomated road extraction from aerial images based on template matching and neural network[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3/3): 994–999.
- 18 Zhu C Q, Yang Y, Wang Q S, *et al.*. Total rectangle matching approach for road extraction from high-resolution remote sensing images[C]. International Society for Optics and Photonics, 2006: 641925.
- 19 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. Automatica, 1975, 11(285–296): 23–27.
- 20 Zhe Lv, Fuli Wang, Yuqing Chang, *et al.*. Edge detection based on adaptive structure element morphology[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, IEEE, 2007: 254–257.
- 21 Zhang Jianqing, Pan Li, Wang Shugen. Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003: 36–42.
张剑清,潘励,王树根.摄影测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2003:36–42.

栏目编辑:史敏