

基于空间特性的立交桥自动检测方法

李 卉¹ 钟 成² 黄先锋³ 李德仁³

(1 中国地质大学(武汉)行星科学研究所,武汉市鲁磨路 388 号,430074)

(2 中国地质大学(武汉)教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,武汉市鲁磨路 388 号,430074)

(3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:针对城市复杂立交桥的空间特性,提出了集成激光雷达数据和遥感影像实施立交桥的快速自动检测的技术流程和关键技术,突破了利用传统遥感影像难以实现立交桥自动检测难题。实际数据验证了整个流程和关键技术的可行性和有效性。

关键词:立交桥;激光雷达数据;自动检测;三维建模

中图分类号:P208

立交桥是城市道路的重要内容之一,立交桥的检测是道路检测中的关键技术。同时,立交桥作为公路设施中一个不可或缺的部分,使得研究立交桥不仅仅停留在设施管理,同时在交通控制、紧急救援等相关城市基础设施课题中都有着非常重要的现实意义。国内外对于立交桥的自动检测方法研究较少,而对立交桥三维建模作了大量的研究^[1-3],文献[4]对早期的研究作了较全面的总结。总地来说,利用遥感影像实施立交桥自动检测尚存在较大的问题^[5],而在三维建模和系统开发方面则取得了较多的成果。

LiDAR 数据可以直接获得目标的三维空间点云,已经在建筑物检测和重建方面得到了应用^[6]。本文利用 LiDAR 数据特点,综合分析立交桥的空间特征和影像特征,提出了立体交叉区域的自动检测与提取方法;在立交桥的重建过程中重点研究了立体交会的遮挡部分恢复的方法,从而准确地构建立立交桥的三维模型。

多层立体交会的点云视图,可见立交桥是多条道路的交汇之地,结构盘旋复杂,自动识别对算法的要求很高;图 1(b)为立交桥地区的遥感影像全貌。可见,同属于一个桥面的点云分布在连续曲面,不同的交叉路面存在高程上的突变。LiDAR 扫描的立交桥点云也存在较高桥面对较低处的遮挡现象,表现为点云数据中存在连续空间曲面的断裂带现象,而不同交叉道路的识别可通过高程突变加以区别,这是利用 LiDAR 数据自动检测立交桥的基本原理。

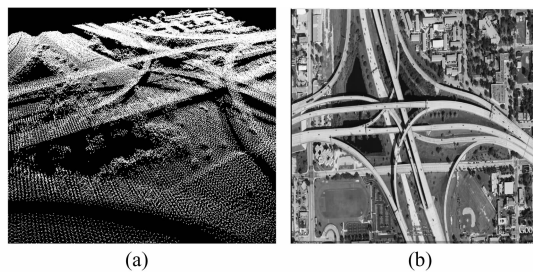


图 1 立交桥的空间特性

Fig. 1 Spatial Character of the Viaduct

1 立交桥的空间特性

立交桥的空间特性如图 1。其中,图 1(a)为

2 立交桥自动检测

根据立交桥的特性,将其分为道路部分和立

收稿日期:2011-09-20。

项目来源:国家 973 计划资助项目(2011CB707001);国家自然科学基金资助项目(41001308,41102209,41102210);中国博士后科学基金资助项目(20110491232);湖北省自然科学基金资助项目(2010CDB04105);武汉市科技攻关计划资助项目(201110821237);武汉市青年科技晨光计划资助项目(201150431074);中国地质大学(武汉)中央高校基本科研经费资助项目(CUG100705,CUG100313),武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目((10)重 02)。

体交叉部分,下文中立交桥道路部分简称道路,立交桥交叉部分简称交叉部分。

2.1 LiDAR 数据预处理

激光扫描仪从原始的观测值(机载 LiDAR 为 GPS、IMU 和测距值)计算出每个点的三维坐标(三维点云),同时附带有强度信号和多次回波信息。这些数据的处理方式与传统图像处理的算法有很大不同,本文主要利用立交桥的空间特性进行自动识别,采用含有 LiDAR 数据空间坐标信息的 LiDAR 点云三角网和距离图像进行处理。

文献[7]提出了基于不规则三角网(TIN)的滤波算法。本文结合区域增长法的思想,将植被覆盖下属于地形的斜坡点添加进初始的地形中,从而得到更为接近真实地形的点云数据^[8],为后续的处理提供更为准确的数据基础。

2.2 道路部分的自动分割

利用激光雷达数据进行道路提取已成为研究热点^[9],基本方法包括利用 LiDAR 距离和强度图像的检测,以及利用 LiDAR 点云分割等方法。

2.2.1 道路边缘检测

集成 LiDAR 数据和遥感影像精确道路边缘检测的步骤如下。

- 1) LiDAR 点云投影到遥感影像;
- 2) 利用 LiDAR 点云提取道路中心线;
- 3) 以边缘检测算子提取影像边缘;
- 4) 以 LiDAR 中心线计算概略道路边界,在边界附近建立缓冲区,搜索影像边缘;
- 5) 通过上下文边缘拟合挑选可信道路边缘;
- 6) 内插道路边缘。

假设道路 R 利用 LiDAR 数据检测的中心曲线为 cL ,其一阶导数为 dL ,以 LiDAR 获取的近似道路宽度 w 获得道路的概略边界 L 。在其缓冲区 $B(L)$ 内存在一个影像边缘检测的集合 $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, E 近似平行于局部边界 ΔL ,且 $\min(\text{length}(E)) > T$,此处 T 为减弱偶然误差影响设置的边缘长度门槛。由于道路边界整体较易识别,取 $S = \max(E)$ 认为是正确道路边界。

若边缘数 $n = 0$,无法识别得到影像道路边缘,以 L 替代之;若 $n = 1$,则认为识别得到影像道路边缘;若 $n > 1$,当与已确定为边界的边缘重复时判定为非边界,否则,连接上下文最近可信边界端点 $[a, b]$,根据 dL 积分获得模拟曲线 $\int_a^b dL$,计算各个可疑边缘到 $\int_a^b dL$ 的距离,取最近的为道

路边缘。

2.2.2 道路点云分割

得到道路精确边缘以后,需要进一步对通过滤波分类方法提取出的道路点云进行区域约束,得到精确的道路范围内的点云,以便准确地计算道路曲面。依据道路边缘得到各路段多边形,并得到精确道路边缘的宽度统计直方图,以道路中心线上的点作为搜索道路点的“种子点”,以这些种子点作为圆心、二分之一路宽值为半径开始进行圆形区域搜索,提取位于道路边缘约束的邻域内以及半径误差允许阈值内的激光点。已经记录为路面点的点,不再参与后面的邻域搜索;而被列为非路面点的点,继续参与后续邻域搜索,避免点的漏选。

设 E 表示边缘约束的内部范围,对搜索区域内的任意像素 p_i ,得到像素的置信度:

$$C(p_i) = \begin{cases} 1, \forall p_i \in E \\ 0, \forall p_i \notin E \end{cases} \quad (1)$$

设 p_c 表示道路中心线 L 上的点, O_c 为 p_c 的缓冲圆,其半径为 $r + r_\theta$, r 表示搜索半径, r_θ 表示半径阈值。则得到像素 p_i 的归属度参数:

$$O(p_i) = \begin{cases} 1, \forall p_i \in \int_s^e O_c dL \\ 0, \forall p_i \notin \int_s^e O_c dL \end{cases} \quad (2)$$

式中, s, e 分别为中心线 L 的起点和终点。则判断像素 p_i 是否道路像素的判定式为:

$$R(p_i) = C(p_i)O(p_i) \quad (3)$$

式中, p_c 表示道路中心线上的点; r 表示搜索半径; r_θ 表示半径阈值; p_i 表示搜索区域内任意点; $d_{p_i} - d_{p_j}$ 表示任意点到中心点的距离; $E(x, y)$ 表示边缘约束的范围。

2.3 交叉部分的自动识别

立交桥检测的难点在于道路交叉遮挡部分的正确识别。遮挡检测在传统摄影测量中多采用基于投影射线反算的方法^[10-11]。在 LiDAR 点云中,立体交会部分具有明显的高程突变。预先统计研究区域的高程变化情况,设定高程差阈值 h_θ ,并采用移动搜索窗口,对数据区域进行搜索。对于在窗口内的 n 个点,进行如下判断:

$$\begin{cases} 0(\text{表示不存在空间交叉}), |h_{p_i} - h_{p_j}| < h_\theta \\ 1(\text{表示存在空间交叉}), |h_{p_i} - h_{p_j}| > h_\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, $p_i, p_j (i, j = 0, 1, \dots, n)$ 表示窗口内的任意两个点。

根据任意两点间的高程差值与阈值之间的判

断,得到经过分割以后的道路区域点云中存在的立体交叉部分,从而达到立体交叉区域的自动检测和提取。

2.4 立交桥三维建模

立交桥三维建模需要对遮挡部分插值,以及对整个道路曲面的平滑处理。利用前后路段邻域点集,代入曲面方程中求解未知参数,获得遮挡区域近似曲面。由于遮挡部分的面积有限,因此,该部分的曲面变化不复杂,应满足平滑且简单的特点,只需利用已经准确获取的周边邻域内点云高程信息,以及根据道路中心线和统计得出的周围的道路宽度对该区域的范围进行约束。综合上述考虑,本文采用以下三阶曲面方程:

$$Z = a_3 + b_3X + c_3Y + d_3XY + e_3X^2 + f_3Y^2 + g_3X^2Y + h_3XY^2 + k_3X^3 + l_3Y^3 \quad (5)$$

曲面平滑处理是为了保持整个路段过渡的连贯性和平滑性。本文采用了加权最小二乘曲面拟合方法。加权最小二乘法是根据一系列离散的已知数据点,采用按距离加权的最小二乘法,为局部内插拟合一个曲面。这个曲面一般根据拟合后的曲面在采样点处的值和实际值之差的平方和达到最小来得到。在权值的确定上考虑距离的因素。根据各点数据在拟合中影响拟合结果正确性的权重,引进了权系数 $d_i > 0 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。这里权系数的大小和距离成反比,因为离目标点的距离越远,其相似性就越低,对目标点的影响就越低。所以,对于距离越近的点,权系数 d_i 就越大。

3 实验与讨论

图 1 所示数据为美国佛罗里达州戴德市郊立交桥的遥感影像和 LiDAR 数据。其中, LiDAR 数据于 2002~2004 年采用 Optech ALTM 1233 系统获取,地面控制点采用 Ashtech Z-12 设备获取,数据平面间隔 1.5 m,中误差 12 cm,垂直间隔 24 cm。遥感影像采用 Google Earth 2009 年提供的高分辨率卫星影像,分辨率 0.5 m。

图 2(a)是利用图 1(a)中遥感影像实施 Canny 边缘检测的结果;图 2(b)是利用图 1(b)中 LiDAR 距离影像实施 Canny 边缘检测的结果;图 2(c)是预先对 LiDAR 数据滤波、分类之后,再实施 Canny 边缘检测的结果。总的来说,城区中存在着大量与道路特征类似的目标。地面上的线状地物多种多样,除了道路,还可能为房屋,或者操场、停车场在边缘提取结果中不难发现。房屋

的边缘也很明显,并且细碎繁多,混在道路边缘的结果中,需要一一进行判别剔除。而道路上行驶的车辆、路面上的各种交通标志也会破坏立交桥在影像中的灰度一致性。遥感影像由于信息量丰富,精度较好。因此,提取结果中各类目标边缘互相影响,较难有效提取道路信息。LiDAR 数据的灰度是高程信息的反映,边缘检测过程将消除高差不明显的目标,因此,检测结果中各类地面细小碎部消除了,突出了立交桥、建筑物等大型目标。采用滤波和分类算法以后,由于不再受到其他目标的影响,立交桥边缘可以很完整地检测出来。

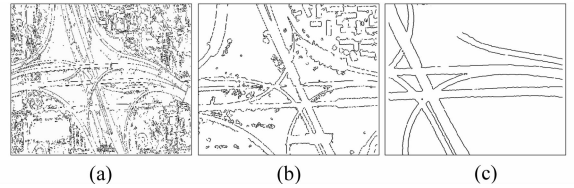


图 2 立交桥边缘检测

Fig. 2 Edge Detection of Viaduct

图 3(a)是直接利用扫描法提取道路中心线的结果,可见,在不顾及道路点云密度的情况下,提取结果不连续,线段碎片很多,特别是在点分布稀疏的地方,所有的独立点都被选为中心线,反而得不到正确、唯一的中心线。此时,需要考虑点云分布密度的影响,根据一定区域的统计信息来搜索中心线信息,本文采用顾及点云密度的扫描带法,根据一定区域的统计性质提取中心线。从图 3(b)可见,提取结果的连贯性明显提高,特别是点分布稀疏的地方也能较好地得到具有较高精度的中心线。考虑到扫描结果中在道路交叉、图形边界的地方容易出现噪声,对于中心线矢量化工作造成不利。本文采用道格拉斯-普克算法进行去噪处理,通过平滑作用可以消除中心点振荡现象以及各种误差。图 3(c)展示了图 3(b)的局部,可见,最后的中心线矢量化结果已经有效地克服了道路交叉等特殊情况,且线条平滑。在此基础上,可实施 LiDAR 数据中心线诱导遥感图像边界检测的步骤。

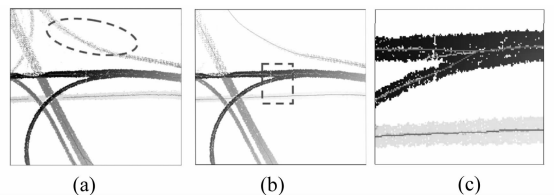


图 3 立交桥精确边缘提取

Fig. 3 Precise Edge Detection of the Viaduct

图 4(a)是采用三阶曲面方程内插立交桥曲

面的局部过程;图 4(b)是遮挡恢复后立交桥各层结构网图;图 4(c)是重建之后的立交桥三维模型。可以看到,利用立交桥断裂前后的点云采用三维曲面方法内插断裂区域,可以很好地拟合立交桥曲面连续情况。通过距离加权的曲面平滑,可以有效地消除立交桥凹凸表面,更符合立交桥实际,同时,利用离散数据的统计性质提高了曲面拟合的精度。

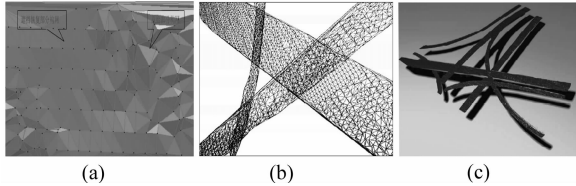


图 4 立交桥三维建模

Fig. 4 3D Modeling of the Viaduct

参 考 文 献

[1] 胡碧松,龚建华. 大型立交桥三维建模方法研究[J]. 测绘科学,2008,33(1): 100-102

[2] 左建章,关艳玲,朱强. 大范围三维城市立体景观建模系统的研究[J]. 测绘科学,2005,30(2): 22-24

[3] Tang Luliang, Li Qingquan. Transect-Based Three-Dimensional Road Modeling [J]. Geo-Spatial Information and Visualization Science, 2004, 7(1): 14-17

[4] 邵振峰. 基于航空立体影像对的人工目标三维提取与重建[D]. 武汉: 武汉大学, 2004

[5] 黄建军,唐亮,谢维信. 航空影像中立交桥的自动检

测[J]. 中国体视学与图像分析,2004,9(1): 41-46

[6] 黄先锋, Sohn G, 王潇, 等. 基于带权点法向量的 LiDAR 数据屋顶检测方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(1): 24-27

[7] Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B4/1): 110-117

[8] 李卉,李德仁,黄先锋,等. 一种渐进加密三角网 LiDAR 点云滤波的改进算法[J]. 测绘科学,2009,38(3): 39-40

[9] 李卉,钟成,黄先锋,等. 基于 LiDAR 和 RS 影像的道路三维模型重建研究进展[J]. 测绘信息与工程,2010,35(1): 30-32

[10] Zhong Cheng, Li Hui, Li Zonghua, et al. A Vector-Based Backward Projection Method for Robust Detection of Occlusions when Generating True Ortho Photos[J]. GIS Science and Remote Sensing, 2010, 47(3): 412-424

[11] 钟成,黄先锋,李德仁,等. 真正射影像生成的多边形反演成像遮蔽检测算法[J]. 测绘学报,2010,39(1): 59-64

[12] 钟成,李卉,李德仁,等. 利用 6 元组松弛法自动配准 LiDAR 与航空影像[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(12): 1426-1430

[13] 钟成,李卉,李宗华,等. 几何条件与变换模型对坐标变换质量的影响[J]. 测绘学报,2010,39(6): 642-648

第一作者简介:李卉,博士,讲师,主要从事遥感图像处理 and LiDAR 数据处理相关的研究和教学工作。
E-mail: rslhui@gmail.com.

Automatic Viaduct Detection Based on the Spatial Characters

LI Hui¹ ZHONG Cheng² HUANG Xianfeng³ LI Deren³

(1 Planetary Science Institute, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430074, China)

(2 Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430074, China)

(3 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: An automatic method for viaduct detection with LiDAR data and remote sensing image is presented in the paper, according to spatial characters of urban complex viaduct. The flowchart and key technologies of the method are discussed in detail. The feasibility and performance of the suggested techniques are verified through experimental results with real data.

Key words: viaduct; LiDAR; automatic detection; 3D reconstruction