

·综述·

不确定性理论在激光雷达数据地物分类方面的应用研究进展

冯裴裴¹, 杨风暴¹, 卫红², 梁若飞¹, 刘丹¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051; 2. 雷丁大学系统工程学院 计算机视觉组, Reading RG6 6AU)

摘要:激光扫描与测距(LIDAR)数据地物分类是近年来测绘及相关领域内的研究热点。由于数据获取、传输以及激光本身特性的影响,使得LIDAR数据与地物信息的对应关系存在不确定性,而不确定性理论在处理数据不确定方面扮演着十分重要的角色。综合论述了近年来常用的LIDAR数据地物分类的特征及其特性、地物分类的应用领域以及国内外利用不确定性理论进行LIDAR数据地物分类的方法,并分析其优缺点,最后给出了总结与展望。

关键词:图像处理;地物分类;激光雷达;不确定性理论

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-05-0001-05

Research Progress on Uncertain Theory for Feature Classification with LIDAR Data

FENG Pei-pei¹, YANG Feng-bao¹, WEI Hong², LIANG Ruo-fei¹, LIU Dan¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Systems Engineering, University of Reading, Reading RG6 6AU, UK)

Abstract: Feature classification of light detection and ranging (LIDAR) data is a research focus in the field of surveying and mapping in recent years. The corresponding relationship between LIDAR data and feature information is uncertain for the influence of data acquisition, transmission and laser characteristics. The uncertain theory plays a very important role in dealing with uncertain data. The features, characteristics, application fields of common used LIDAR data feature classification in recent years and the method of LIDAR data feature classification using uncertain theory in China and foreign countries are summarized. The advantages and disadvantages of the method are analyzed. Finally, the summary and prospect are presented.

Key words: image processing; feature classification; light detection and ranging (LIDAR); uncertain theory

机载激光扫描与测距(light detection and ranging, LIDAR)系统可以快速、准确地获取地物表面的三维信息,并且其利用激光的回波进行测距和定向,不受天气影响,成为资源勘查、森林调查、地形测绘等应用领域内重要的数据来源^[1]。地物类别的划分是对LIDAR数据进行信息提取及后续应用的前提。

随着LIDAR技术的发展,系统所配备的传感器

以及获取到的信息更加多元化,对LIDAR数据的分类也从根据单一距离信息进行分类发展为将多波段信息、强度信息等与距离信息相结合的分类方法。但由于这些异源信息的获取是不同步的,使用时需要对其进行配准和内插的处理,这必然会引入不确定性的误差。另外,数据获取过程中掺入的噪声、扫描方式的局限性等因素都会增加数据的不确定性,这直接导致了LIDAR数据和地物信息对关联

收稿日期:2015-08-26

基金项目:国家自然科学基金(61171057);山西省研究生教育创新项目(2015SY61)

作者简介:冯裴裴(1991-),男,硕士研究生,主要从事LIDAR数据处理方面的研究;导师简介:杨风暴(1967-),男,教授,主要从事红外图像处理方面的研究。

系的不确定性。利用不确定性方法进行LIDAR数据地物分类,可以有效地解决所存在的问题。

文中介绍了LIDAR数据地物分类几种常用的数据及其特性、地物分类的应用领域,以及几种最常用的不确定性理论在地物分类方面的研究现状,指出了存在的问题,并对其发展前景进行了展望。

1 LIDAR数据及其特性

机载LIDAR系统可获取的源数据包括回波数据(首次回波图像、末次回波图像)、强度数据以及由高分辨率数码相机获取的光谱图像(可见光图像、近红外图像)^[2]。为了便于进行地物类别的划分,学者们又根据地物的特性以及LIDAR数据的特性,提出了几种衍生图像,如首末次回波高程差图像和归一化植被差异指数图像。以 DSM_{FE} 、IN、HD、NDVI四种特征图像为例,若将目标区域分类为树木(T)、草地(G)、建筑(C)、道路(R)四种类别,则每种特征图像可以区分的类别如表1所示。

表1 每种特征图像可区分的地物类别

图像特征	分类	
	A	B
DSM_{FE}	CUT	GUR
HD	T	CUGUR
IN	CUGUR	T
NDVI	TUG	CUR

1.1 首次回波高程

首次回波(first echo, DSM_{FE})指LIDAR系统接收到的某点的第一个脉冲回波,机载LIDAR系统通过计算发射和接收激光脉冲的时间差来确定地物点的高程。由于地物表面的凹凸不平或是缝隙较多,使得除平坦光滑的表面外的其他地物点都会产生多次回波,尤其是在植被区域以及建筑边缘区域,而首次回波可以准确地表征地物点距离地面的高程信息,因此常用 DSM_{FE} 来区分高度差异明显的地物。

1.2 首末次回波高程差

首末次回波高程差(geight difference, HD)由首末次回波高程通过式(1)衍生得到。由于激光可以穿透树林区域,能够在不同高度的树叶、树干与地面形成多次回波,因此首末次回波高程差可以表征树

木点的高度信息,而对于不可穿透的地物(建筑、道路与草地等),HD则没有能力将其区分。在城市区域中建筑与树木具有复杂不规则分布的前提条件下,HD特征才能发挥其特点。但在此类情况下,HD特征在建筑边缘点处同样产生多次回波,使得该类区域与树冠区域有相似的特征值;激光无法穿透茂密的树冠中心位置到达地面,在茂密的树冠区域与稀疏的树冠边缘区域特征值差异较大。此类现象导致HD特征的分类能力下降,分类结果出现错误。尽管HD特征诸如此类的缺陷,但该特征在提高分类精度上仍然具有不可替代的作用。

$$HD = DSM_{FE} - DSM_{LE} \quad (1)$$

1.3 强度

强度(intensity, IN)指被激光束照射目标经过反向散射的尖峰脉冲幅值,能够反映地物的反射特性,并且与地物的材质、表面光滑度以及形状等因素有密切的关系。赖东旭^[3]对常见地物的强度值做了总结如表2所示。强度信息有助于将树木与其他类别进行区分,但是强度特征中通常包含大量的噪声,噪声在很大程度上影响了强度图像的分类能力,且目前已知的具有反射强度的地物数量有限,有些地物的反射强度还会随着季节和环境变化,所以强度信息具有不稳定性,仅使用这一特征无法进行分类。尽管如此,强度信息仍然是LIDAR数据地物分类所需特征的一种重要因子。

表2 不同介质对激光的反射率值

介质	反射率/%
白纸	100
石灰石、黏土	75
落叶树	60
海岸沙滩、沙漠裸地	50
松类、针类常青树	30
带小卵石的沥青	17

1.4 光谱图像

机载LIDAR系统可获取的光谱的数据包括可见光图像(RGB)和近红外图像(NIR)。由于此类数据纹理特征突出,因此常用于面向对象的分类方法。另外,一种最常用的衍生特征获取公式如下

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

归一化植被差异指数(normalized difference vegetation index, NDVI)利用植物叶绿素对红光的吸收特性来进行植被的识别,常被用于基于遥感图像的植被研究以及植物物候研究中,它是植物生长状态以及植被空间分布密度的最佳指示因子,与植被分布密度呈线性相关。NDVI值的大小与覆盖物种类关系如式(3)所示

$$NDVI = \begin{cases} -1 \leq NDVI < 0 & \text{云、水、雪} \\ 0 & \text{岩石或裸土} \\ 0 \leq NDVI < 1 & \text{植被} \end{cases} \quad (3)$$

2 地物分类应用

随着LIDAR系统和分类技术的发展,地物分类结果已被广泛应用于目标识别、提取以及分析等相关应用,本节选取以下应用为例进行说明。

2.1 城市三维建模

城市三维建模主要是对建筑物和道路的提取。传统方法仅利用遥感影像进行检测,但对于结构复杂、目标类型繁多的城市区域,难以得到较好的效果。机载LIDAR数据可同时提供坐标信息、强度信息和回波信息,实现城市的快速建模,为城市规划及监测提供依据。因此利用LIDAR数据进行建筑物提取的方法应运而生^[4-5],而后LIDAR数据与遥感影像相结合进行建筑物提取的方法也得到了较好的效果^[6-8]。Ehinney^[9]等利用LIDAR与航海数据相结合进行道路边缘的提取,而Kumar^[10]等提出了利用移动LIDAR数据进行的道路边缘提取方法,Riveiro^[11]等人提出了一种利用LIDAR数据自动识别斑马线的方法。

2.2 林业相关应用

LIDAR数据在林业方面可用于估测树高、估测郁闭度、估测林分密度以及估测林分生物量和储蓄量等。通过对植被覆盖率的监测可以为森林采伐、野生动物栖息地保护、二氧化碳排放量控制等提供参考依据。对植被覆盖率监测主要是对树木进行提取,利用LIDAR数据可以对树冠的密度和体积、树的高度以及森林的其他生物参量进行估计,以此得到一个给定森林区域的整体结构及发展趋势等关键信息。Marek^[12]等融合高分辨率卫星影像和LI-

DAR数据进行单株树木的识别,用于高精度的森林管理;张齐勇^[13]等针对LIDAR数据在地物复杂的城区进行树木提取做了研究;Michael^[14]等针对LIDAR数据在森林资源调查中的应用进行了总结,并对LIDAR数据在生态学方面的研究做出了展望。

2.3 电力线勘探

利用LIDAR数据可快速获得高精度三维线路走廊地形、线路设备,以及走廊地物的精确三维空间信息,从而精确、快速地量测线路走廊地物如树木、房屋等交叉跨越到电线的距离、导线线间距离等,为电网设计和管理的精细化、科学化、高效化提供快速有效的空间数据支持^[15]。

3 不确定性理论进行地物分类

对不确定性信息的处理是提高LIDAR数据地物分类精度的有效手段。本节对DS(dempster-schafer)证据理论、模糊集理论、粗糙集理论在LIDAR数据地物分类上的应用现状作介绍。

3.1 DS证据理论

DS证据理论又称为信任函数理论,是一种处理不确定性问题的基本方法。该方法通过信任分配函数对来自不同传感器的证据进行概率分配,并利用决策规则进行证据的合成,可以很好地解决LIDAR数据地物分类时产生的不确定性问题。并且该方法不需要训练样本,运行速度快,因此在该领域得到广泛的应用。

F Rottensteiner^[16]等人使用DS证据理论处理LIDAR数据与多光谱图像融合的建筑物检测问题,首次提出了将信任分配函数设定为三次抛物线,得到了很好的分类结果;Wei Hong^[17]等首先提出了利用马尔科夫随机场对DS证据理论的分类结果进行二次分类,得到了较好的分类结果。Y cao^[18]等人在此基础上提出了基于EBP(efficient belief propagation)的马尔科夫随机场方法,有效地提高了分类结果的精度;宁亚辉^[19]等通过DS证据理论对形状特征进行了融合处理,从而降低了形状特征阈值选取的难度,证实利用DS理论进行道路提取具有一定的可行性和优越性;冯裴裴^[20]等提出的模糊DS证据合成方法,实现四种地物的类别划分,在精度和速度方面

都得到了令人满意的效果。

3.2 模糊集理论

模糊集理论又称模糊数学理论,是指由于事物类别属性划分的不明确而引起的判断上的不确定性。该方法通过对不确定性条件分配隶属度,从而将不确定性的事物转化为形式上的确定性。与证据理论相同,建立合适的隶属度函数是正确使用该方法的关键,Lai Zulong^[21]等对三种地物类别分别构建了隶属度函数,再根据LIDAR点云的高程信息进行模糊决策融合,重点改善了建筑物与其他地物之间的混分现象。另外,模糊数学理论中的模糊聚类方法在LIDAR地物分类中得到了广泛的应用。Li Huiying^[22]等应用模糊聚类的方法对离散机载激光点云数据进行建筑物和植被的分类,实现了建筑物和植被的快速分类。Ramu Narayanan^[23]等使用模糊聚类构建了一种软分类方法,结合LIDAR数据实现了海床多种地物的分类。章勇^[24]等提出了一种模糊阈值的分割方法,实现了建筑物的快速提取。

3.3 粗糙集理论

粗糙集是一种处理不精确、不确定与不完全数据的新的数学理论。粗糙集在数据分析中善于发现属性间的依赖关系,无需先验知识,提供了一套比较完备的从小样本数据中寻找规律的系统方法。汪承义^[25]根据LIDAR数据提供的高程信息,将地物点与地面点分离,再利用粗糙集理论把建筑物与非建筑物对象区分开。余斌^[26]采用灰度共生矩阵作为分类特征,利用粗糙集理论进行城区建筑物边界提取,结果证实,该方法适用于建筑分布结构简单的高层建筑。张毅^[27]等利用粗糙集算法从海量点云中挖掘出聚类规则,为后续的LIDAR数据分类及障碍物识别提供了依据。

4 结论

本节总结了几种利用不确定性理论进行LIDAR数据地物分类的方法。表3中列出了各方法所使用的特征数、地物种类、分类结果精度等信息。

表3 几种基于不确定性理论的地物分类方法

文献	分类方法	特征空间	类别	平均准确率/%
(2005)F.Rottensteiner	DS	5,NDVI,HD,强度,斜率,DSM	1,建筑	94
(2009)赖祖龙	模糊c-均值	2,高分辨率图像, LIDAR点云中的高程	4,建筑,植被,道路,裸地	未知
(2010)卫红	DS-MRF	5,NIR,RGB,IN, DSM_{FE} , DSM_{LE}	2,Building,Tree	89.9/84.5
(2011)Ramu Narayanan	模糊c-均值	1,机载LIDAR海洋数据	16,细沙,甲壳纲动物,海胆纲动物,腹足纲动物,等等	53
(2012)Y.cao	EBP-MRF	3,HD,NDVI, DSM_{FE}	4,建筑,植被,道路,裸地	92.72
(2014)李慧英	模糊c-均值	1,LIDAR点云	3,裸地,植被,建筑	未知
(2014)余斌	粗糙集	1,LIDAR点云	1,建筑	85.1
(2014)张毅	粗糙聚类	2,LIDAR点云,IN	5,凹、凸障碍,上、下坡路,平路	57.3~93
(2014)冯裴裴	模糊-DS	4, DSM_{FE} ,HD,NDVI,IN	4,建筑,植被,道路,裸地	88.78

从表3中可看出,近年来利用不确定性理论进行LIDAR数据地物分类的整体趋势是数据源更加丰富,可识别的地物类型越来越多,分类结果的准确率逐步提升。存在问题及展望可总结为以下几点。

(1)强度是一个很重要的信息,但各地物类型与强度值的对应关系尚未明确,因此强度特征未能很好地在地物分类中发挥其优势;

(2)将不确定性理论方法用于地物分类时,分类结果的精度并不能满足实用需求,虽然LIDAR数据本身具有不确定性,但算法原理及与数据的兼容性还有待继续研究;

(3)D-S证据理论用于地物分类时能够得到较好的分类精度,而且该算法运行速度快,因此得到了相对比较广泛的应用,但概率分配函数的构造、以及

证据合成规则的选择等如何与地物分类相结合,还可以进行深入研究;

(4)不确定性理论方法众多,如可能性理论、贝叶斯理论、灰色理论等尚未在LIDAR数据处理领域得到应用,这也将成为学者们研究的热点问题之一。

参考文献

- [1] WAI Yeung Yan, Ahmed Shaker, Nagwa El-Ashmawy. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015(158):295-310.
- [2] Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support vector machines in remote sensing: A review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66:247-259.
- [3] 赖旭东. 机载激光雷达数据处理中若干关键技术的研究[D]. 武汉:武汉大学.
- [4] SHEN W, ZHANG J, YUAN F. A new algorithm of building boundary extraction based on LiDAR data[C]. *Proceedings of the 19th International Conference on Geoinformatics*, Shanghai, 2011:1-4.
- [5] LIU C, SHI B, YANG X, et al. Automatic buildings extraction from LiDAR data in urban area by neural oscillator network of visual cortex[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(4):2008-2019.
- [6] Awra Ngjeb M, Ra V Anbak Hs H M, raser C S. Automatic detection of residential buildings using LiDAR data and multispectral imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(5):457-467.
- [7] WANG R. 3D building modeling using images and LiDAR: A review[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2013, 4:273-292.
- [8] 谢瑞,程效军,管海燕. 机载激光扫描与航空影像的融合分类与精度分析[J]. *同济大学学报*, 2013, 41(4):607-613.
- [9] Elhinney C Mc, Kumar P, Kumar C, et al. Initial results from the European road safety inspections (EURSI) mobile mapping project[C]. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2010:440-5.
- [10] Kumar P, McElhinney CP, Lewis P, et al. An automated algorithm for extracting road edges from terrestrial mobile LiDAR data[J]. *Remote Sense*, 2013, 85:44-55.
- [11] Riveiro B, González-Jorge H, Martínez-Sánchez J, et al. Automatic detection of zebra crossings from mobile LiDAR data[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 70:63-70.
- [12] Marek Z B, Gougeon F A. Fusion of high-resolution satellite and LiDAR data for individual tree recognition[C]. *Electrical and Computer Engineering CCECE' 06 Canadian Conference on 2006*:1112-1115.
- [13] 张齐勇,岑敏仪,周国清,等. 城区LiDAR点云数据的树木提取[J]. *测绘学报*, 2009, 38(4):330-335.
- [14] Michael A Wulder, Joanne C White, Ross F Nelson, et al. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012(121):196-209.
- [15] 贾俊红,梁静,吕水生,等. 从机载激光雷达数据中提取电力线研究进展[J]. *河南科学*, 2013, 31(10):1671-1674.
- [16] Roteensteiner F, Trinder J, Clode S, et al. Using the dempster-shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection[J]. *Information Fusion*, 2005, 6:283-300.
- [17] WEI Hong, XU Wei. A progressive approach for building extraction by fusing LIDAR data and co-registered bands [C]. *Proceedings of the SICE Annual Conference*, Tai Bei, 2010, 18:756-762.
- [18] Cao Y, Wei H, Zhao H. An effective approach for land-cover classification from airborne lidar fused with co-registered data[J]. *International Journal of Rremote Sensing*, 2012, 33(18):5927-5953.
- [19] 宁亚辉,雷小奇,王功孝. Dempster-Shafer证据融合形状特征的高分辨率遥感图像道路信息提取[J]. *中国图像图形学报*, 2011, 16(12): 2183-2190.
- [20] 冯裴裴,杨风暴,卫红,等. 一种用于LIDAR数据地物分类的模糊DS合成方法[J]. *信息融合学报*, 2014, 1(3): 316-320.
- [21] LAI Zu-long, SHEN Shao-hong, CHEN Xing-yi. Using LiDAR data and airborne spectral images for urban landcover classification based on fuzzy set method[C]. *Proceedings of SPIE, International Symposium on Spatial Analysis, Spatial-Temporal Data Modeling, and Data Mining*, 2009, 10:7492.
- [22] LI Hui-ying, WANG Xue-zhi, ZHU Jin-long. A method of airborne LiDAR data classification based on curved surface approximation[J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2014, 11(6):2011-2018.
- [23] Ramu Narayanan, Gunho Sohn, Heungsik B Kim. Soft classification of mixed seabed objects based on fuzzy clustering analysis using airborne LIDAR bathymetry data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, (5):1-25.
- [24] 章勇,杨英宝,孔令婷. 基于阈值分割的LIDAR建筑物

- [4] 钟立俊,曹益平,喻睿智.一种适合在线三维检测的改进算法[J].中国激光,2009,36(6):1503-1507.
- [5] 徐永祥,张乾方,刘松松,等.基于空间频域算法的三维微观形貌的测量[J].光电工程,2014,41(8):16-21.
- [6] 刘严严,徐世伟.基于比值法图像拼接算法研究[J].电子测量技术,2008,31(7):56-58.
- [7] 魏川,张功国,吕晓萌.图像拼接技术在双摄像机监控中的应用[J].激光与红外,2014,44(4):447-450.
- [8] 杜京义,胡益民,刘宇程.基于区域分块的SIFT图像匹配技术研究及实现[J].光电工程,2013,40(8):52-57.
- [9] 杨锋涛,罗江龙,刘志强,等.相位展开的6种算法比较[J].激光技术,2008,32(3):323-326.
- [10] 郭文静,石兵华,金永.关于提高傅里叶变换轮廓术测量精度的研究[J].应用光学,2013,34(5):845-848.
- [11] 黄航,李金龙.基于傅里叶轮廓变换术的钢轨三维面形复原[J].自动化技术与应用,2014,(8):56-59.

(上接第5页)

- 提取[J].测绘与空间地理信息,2015,34(2):27-29.
- [25] 汪承义.基于航空激光雷达数据的建筑物重建技术研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2007.
- [26] 余斌.基于航空LiDAR数据提取建筑物边界的方法研究[J].北京测绘,2014(2):17-20.
- [27] 张毅,付梦印,王美玲.基于粗集的激光雷达数据聚类与识别方法[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, China, 2014, 28-30:8402-8407.

(上接第25页)

构,并最终确定选用离轴三镜反射式光学系统。该系统在保证成像质量的情况下,将其离轴方向的视场角达到了 0.95° ,通过扫描系统可以做到对地面 $900 \times 540 \text{ km}^2$ 成像。充分发挥了反射式光学系统的优势。由于该系统是属于长焦距、大口径的系统,使用了非球面,且是离轴使用,同时对于公差限制的比较紧。因此需要重点考虑轻量化以大口径非球面的制造技术。随着大口径非球面制造技术及计算机辅助装校水平的提高,该系统将会得以广泛应用。

参考文献

- [1] 丁学专,刘银年,王欣,等.航天遥感反射式光学系统设计[J].红外技术,2007,29(5):253-254.
- [2] 巩盾.温度对遥感器光学系统成像质量的影响[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.
- [3] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军.离轴三反射镜光学系统研究[J].红外与激光工程,2008,37(4):707-709.
- [4] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1988:111-112.
- [5] 李士贤,李林.光学设计手册[M].北京:北京理工大学,1996:338-339.
- [6] 史黎丽.航天遥感相机光学系统设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:19-21.
- [7] 叶虎勇,陈桂林.地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑[J].红外技术,2003(11):6-8.
- [8] 萧泽新.工程光学设计[M].北京:电子工业出版社,2002:84-85.
- [9] 刘剑锋,龙夫年,张伟.大视场航天遥感器的光学系统设计[J].光学技术,2004,30(2):187-189.
- [10] 巩盾.温度对遥感器光学系统成像质量的影响[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.
- [11] 薛鸣球,安保青.大视场三反射非共轴系统研究[J].光子学报,1997(3):35-37.
- [12] 史黎丽.航天遥感相机光学系统设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:37-41.

声明

近期发现有假冒《光电技术应用》期刊的投稿代理机构非法进行投稿代理,对此,《光电技术应用》编辑部正式声明,本刊自成立以来没有设立任何投稿代理机构且尚未开通在线投稿,一直使用的、唯一的投稿邮箱为nloe@vip.163.com,编辑部电话:0416-2835782。请作者按此邮箱投稿,如有疑问请直接通过电话或邮件与编辑部联系咨询。

特此声明。

《光电技术应用》编辑部