

适用汽车智能驾驶的多光谱激光雷达波长选择可行性研究

宋绍京^{1*}, 陈育伟², 胡海江¹, 胡金艳¹, 龚玉梅¹, 邵慧^{2,3}

(1. 上海第二工业大学 通信与信息工程系, 上海 201209;

2. Department of Remote Sensing and Photogrammetry, Finnish Geospatial Research Institute, National Land Survey of Finland, 02431 Masala, Finland;

3. 安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:在汽车智能驾驶系统中,激光雷达由于其独特的三维成像能力,成为场景探测感知传感器群组中不可或缺的重要组成部分。为提升单一波长激光雷达在物性探测分类和状态上的性能,借鉴多光谱探测具有物性探测能力的原理,论文对适用于汽车智能驾驶的多光谱激光雷达的波段选择进行了可行性研究,利用主成分分析法对智能驾驶中典型目标进行光谱计算及分析,结合激光光源特性以及光电探测器的特性,综合多光谱激光雷达波段选择方法和智能驾驶应用场景中典型目标地物光谱特性,以及商用激光雷达的可获得性,得出了适用汽车智能驾驶的多光谱激光雷达的波长可以选择 808 nm、905 nm、1 064 nm、1 310 nm,并通过测试验证了多光谱激光雷达所选波长的有效性。

关键词:场景感知; 主成分分析; 智能驾驶; 激光雷达; 波长选择

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

The feasibility study of wavelength selection of multi-spectral LIDAR for autonomous driving

SONG Shao-Jing^{1*}, CHEN Yu-Wei², HU Hai-Jiang¹, HU Jin-Yan¹, GONG Yu-Mei¹, SHAO Hui^{2,3}

(1. Department of Communication and Information Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. Department of Remote Sensing and Photogrammetry, Finnish Geospatial Research Institute, National Land Survey of Finland, 02431 Masala, Finland;

3. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In the autonomous driving system of automobile, in order to improve the performance of single-wavelength LIDAR in physical property detection classification and state, and draw lessons from the principle that multi-spectral detection has physical property detection ability, this paper studies the band selection of multi-spectral LIDAR, calculates and analyses the spectrum of typical targets in autonomous driving by using principal component analysis method. The characteristics of laser source and detector, the band selection method of multi-spectral LIDAR, the spectral characteristic analysis of typical targets for autonomous driving application scenarios and the availability of commercial LIDAR are synthesized. The central wavelength of the multi-spectral LIDAR suitable for autonomous driving of automobiles is 808 nm, 905 nm, 1 064 nm and 1 310 nm. The validity of the selected wavelength of the multi-spectral LIDAR is verified by testing.

收稿日期: 2019-08-22, 修回日期: 2019-11-21

Received date: 2019-08-22, Revised date: 2019-11-21

基金项目: 上海第二工业大学校重点学科建设项目(XXKZD1605); 校企合作汽车电子联合实验中心建设项目资助(A11NH190704)

Foundation items: Supported by Discipline Construction Project of Shanghai Polytechnic University(XXKZD1605), and Construction Project of University Enterprise Joint Automobile Electronic Experiment Center (A11NH190704).

作者简介(Biography): 宋绍京(1974—), 男, 山东泰安人, 副教授, 主要从事图像处理与分析、实时信号与信息处理、智能驾驶等方面研究, E-mail: sjsong@sspu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: sjsong@sspu.edu.cn

Key words: band selection, principal component analysis, autonomous driving, LIDAR

PACS:42. 62. Cf, 06. 30. -k

引言

智能驾驶起源于20世纪80年代的美国国防高级研究计划局(DARPA)开展的自主陆地车辆ALV(Autonomous Land Vehicle)项目。DARPA从2004年开始,连续举办了多届智能车挑战赛(Grand Challenge),大大促进了美国智能驾驶的发展,在美国著名的麻省理工大学、卡耐基梅隆大学等著名大学中均开始研究智能车辆的自动驾驶技术。智能驾驶系统中通过激光雷达、摄像头、毫米波雷达、车轮编码器、微波雷达、GPS、IMU等多种传感器对车辆周围环境进行感知,并结合地图和街景,实时分析道路、车辆状态和障碍物等信息,精确控制车辆的转向和速度,实现智能驾驶车辆在道路上可靠、安全地行驶。智能驾驶环境感知技术是指通过安装在智能驾驶车辆上的多种主动式和被动式传感器对车辆周围环境及车辆自身状态信息进行感知。车辆环境信息既包括车辆周围状态信息(道路坐标、道路方向、障碍物速度、障碍物位置、交通标志标线等),亦包括车辆自身状态信息(车辆速度、车辆转向角度、车辆位置、车辆倾斜角度、车辆加速度等)。基于被动型传感器的场景感知易受环境影响且实时性差,不适合对安全要求极高的智能驾驶,因此在智能驾驶中往往对车辆周围环境的感知会使用主动型传感器,比如使用激光雷达、微波雷达、超声波雷达进行探测车辆周围各种精度的距离信息,辅助使用摄像头,热红外探测器等被动型传感器探测交通标志和行人等。

自二十世纪六十年代激光雷达出现以来,激光雷达经过了由简单到复杂、由低级到高级的发展过程。由于激光雷达可获得更高的角度、空间、距离和速度分辨率,且具有直线传播、指向性好以及光束非常窄等优点,成为未来智能驾驶系统中重要的环境感知设备。通过密集的点云数据,激光雷达能快速的生成高精度的数字环境模型,逐渐成为汽车智能驾驶中高精度三维数字环境模型鲁棒获取的一种重要方法。为了更好地利用激光雷达技术的环境观测能力,国内外学者针对融合单波长激光回波信号的强度信息和三维信息对数据进行分类开展了大量研究和探索^[1-2],当前智能驾驶中使用的激光雷达在技术上的研究主要集中于单一波长方式

工作,为提升激光回波信号的强度信息和三维信息对数据进行分类的支持,不断地提高激光雷达点云密度,但这些研究并不能从根本上解决车载激光雷达单一波长所造成的物性探测能力上的不足,点云密度的增加虽可提高基于点云几何特征的物体识别能力,但也存在递减效应,且带来诸多额外的系统要求:1)用于场景识别的算法日益复杂化,导致计算硬件需求剧烈增加;2)激光雷达的功耗、复杂性、体积和成本大大增加,阻碍其大规模商用;3)仅依靠三维特征,不足以有效识别复杂场景。因此,虽然激光雷达在三维空间信息获取方面具有突出优点,但由于激光雷达单一波长探测能力的限制,对环境信息中的物性分类、状态等方面的探测能力仍旧有待提高。

光谱成像技术不仅具有图像分辨能力,还具有光谱分辨能力,利用光谱成像技术不仅可以对待检测目标进行定性和定量分析,而且还能对其进行定位分析。针对目前智能驾驶环境观测中激光雷达的应用及其技术特点,为了更好的挖掘出激光雷达对环境感知应用的潜力,使激光雷达技术在保留空间高分辨探测能力的同时,兼具对环境物体物性感知的能力,因此,借鉴多、高光谱测量具有物性探测能力的原理,开展多光谱激光雷达对环境物体进行探测的技术研究将具有重要的研究价值和应用前景。

1 激光雷达波长选择方法

激光波长的选择原则为:在波长数尽可能少的情况下,实现对不同目标分类或同种目标不同状态的判别,为多光谱激光雷达的激光器设置提供依据^[3]。

特征波长的选择算法经过长时间的发展,目前广泛使用的主要有主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)、偏最小二乘算法(Partial Least Squares, PLS)、岭回归(Ridge Regression, RR)、逐步回归(Step Rise Regression, SRA)、多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)等算法。其中主成分分析法和偏最小二乘法是将分析波段内的光谱数据通过正交变换的方法将原来的多个参数转换为少数主成分的多元统计方法,对经转换得到的主成分再建立回归方程,与多元线性回归、

逐步回归和岭回归相比,分析准确度有所提高,偏最小二乘法在确定最佳主成分数目上存在不足,而主成分分析算法是将原始波段数据的各变量进行正交变换,把原始波段数据映射到一个新的空间,在新空间中,原始波段数据各变量的大部分信息经过变化后被压缩在较少的几个波段中,这几个波段称之为主成分,实际上,这些主成分是原始波段数据各变量经过线性组合后形成的新变量,这些新变量尽可能多地表征了原始变量所包含的特征信息,且新变量之间互不相关,即正交。因此,在新变量即主成分数目的确定上存在着优势。即便变换后的各主成分的物理意义不明确,但主成分分析法却很好的实现了波段降维^[3]。如果所探测目标成分的吸收谱线相互之间没有交叉与重叠,利用主成分分析方法可以取得较理想的结果^[4]。基于智能驾驶应用场景中典型目标光谱反射曲线的分析,基本上不存在峰值谱线相互交叉与重叠的情况,因此主成分分析法可以用于确定激光雷达波长的分析。

设对 m 个波长下的反射光谱重复进行 p 次测量,记为 $X = [x_{ij}]$, $x_{ij} = \ln(I(\lambda_j)/I_0(\lambda_j))_i$ 表示对第 j 个波长下的反射光谱进行第 i 次测量, $i = 1, 2, 3, \dots, p$, $j = 1, 2, 3, \dots, m$, $N = p \cdot m$ 为样本总数,即样本集有 m 类构成, $X = \bigcup_{c=1}^m X^{(c)}$, $X^{(c)} = [X_1^{(c)}, X_2^{(c)}, \dots, X_p^{(c)}]$, 则 X 的均值向量 n 和协方差矩阵 Σ_X

$$n = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p X_i^{(c)} \quad , \quad (1)$$

$$\Sigma_X = E \{(X - n)(X - n)^T\} \quad , \quad (2)$$

令 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_p$ 为 Σ_X 的特征根且 $\zeta_1 \geq \zeta_2 \geq \zeta_3 \geq \dots \geq \zeta_p \geq 0$, $T_1, T_2, T_3, \dots, T_p$ 为相应的单位特征向量,由 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_p$ 组成特征矩阵。

$$A = T^T = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_p) \quad , \quad (3)$$

由 A 作为主成分变换矩阵,变换得到一个新的空间 Y , 由 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_p$ 组成,且 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_p$ 之间互不相关且正交,因此,原始光谱数据各变量的大部分信息被压缩到较少的几个波段之中,即 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_p$ 为 X 的第一主分、第二主分、 \dots 、第 p 主分,那么这些主成分是原始光谱数据各变量经线性组合得到的新变量,尽可能多地表征了原始变量所包含的特征信息。

$$Y = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_p)^T = AX \quad , \quad (4)$$

在主成分分析中,主成分 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ 的累计贡献率为

$$V_n = \frac{\sum_{i=1}^n \zeta_i}{\sum_{i=1}^p \zeta_i} \quad , \quad (5)$$

主成分累计贡献率越大,主成分解释原变量数据变化的能力越强,因此该贡献率是数据降维处理的重要指标。如果所选成分太多,会包含过多的测量噪声;如果所选成分过少,必然会丢失原始光谱数据中的部分特征信息。该指标的选取根据不同的应用,选用的标准亦有所不同,因此选择累计贡献率 V_n 大于某一值(经验值93%)的前 n 个主成分代替原来的光谱,以减小数据量,同时又可以很好的实现有效的波段降维,但是该方法变换后的主成分的物理意义不明确。

设主成分 Y_i 与第 j 个波长下的测量值 $X_j^{(c)}$ 的相关系数为:

$$\rho(Y_i, X_j^{(c)}) = \frac{\sqrt{\zeta_i}}{\sqrt{\delta_{ij}}} t_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, m) \quad , \quad (6)$$

δ_{ij} 是 Σ_X 对角线上的值,由此可以得出,能代表原始数据 n 个主成分对于第 j 个波长的贡献率, σ_j 是 $X_j^{(c)}$ 分别与 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ 相关系数的平方和,即

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^n \zeta_i t_{ij}^2 / \delta_{ij} \quad , \quad (7)$$

σ 的大小反应了该波长下有多少信息被映射到了前 n 个主成分中,而在主成分信息中,本身就包含了原始光谱数据中的大部分特征信息,也就是说 σ 本身也反映了该波长所包含的信息量,因此,通过结合累计贡献率和因子载荷 σ 可以确定主成分及相应的物理意义。

2 智能驾驶应用场景中典型目标光谱特性测试及分析

智能驾驶应用场景随着用途的不同而有所不同,特定场景的智能驾驶项目主要集中在固定路线、封闭园区方向上,典型应用场景包括园区通勤、码头、矿山、仓储和物流等方面,这些应用场景中的目标相对比较简单,类别也比较固定。目前,相比较特定场景下的智能驾驶,通用场景对于L4级别的智能驾驶仍然具有很大的挑战,在城市公开道路应用场景中的目标各种各样,类别也比较复杂,但总体而言,针对智能驾驶应用场景中的目标可以大致分为人类、植物、道路、建筑、车辆等目标。

研究行人光谱特性,主要研究穿着在人体上的衣服的光谱特性,常见人类所穿衣物多为棉织物和涤纶织物,根据图1(a)所示光谱反射特性曲线可以

看出,棉织物在可见光光谱区间根据棉织物的颜色不同,会有着比较明显不同的光谱曲线,但在光谱超过 800 nm 后的近红外波段里,棉织物的光谱反射特性基本一致的稳定在 60% 左右,和棉织物的颜色基本上没有关系。从图 1. b) 中所示光谱反射特性曲线可以看出,未染色和染色的光谱特性曲线差异性特别明显,但染色后的光谱特性曲线在光谱超过 800 nm 的近红外波段中的其反射率也基本上稳定在 60% 左右。

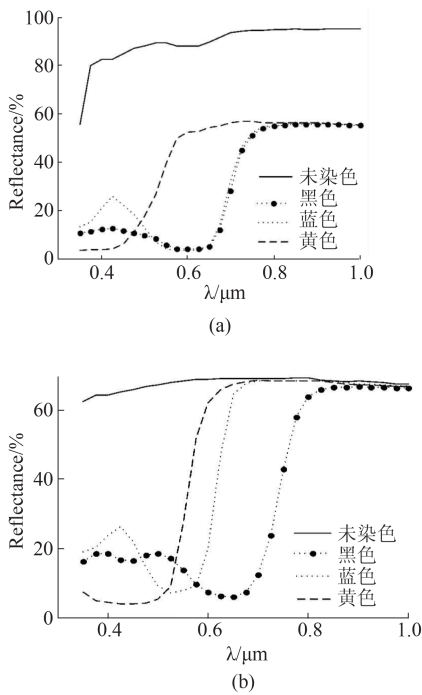


图 1 常所穿衣服的光谱反射特性曲线^[5], (a) 平纹棉织物光谱反射特性曲线, (b) 涤纶织物光谱反射特性曲线
Fig.1 Spectral Reflection Characteristic Curves of Commonly Worn Clothes (a) Characteristic Curve of Plain Cotton Fabric, (b) Characteristic Curve of Polyester Fabric

图 2 中所示为上海典型植物光谱反射特性曲线,其中在可见光的 550 nm 左右有一个反射波峰,在 680 nm 附近有一个吸收波峰,在 680 ~740 nm 之间,红边效应明显,各种植物的反射率急速增加。在近红外区域,道路两旁和道路中间作为绿化隔离带的植物,其反射率基本上处在 35% 至 60% 之间。

图 3 中部分曲线为上海本地采集的杂草光谱反射特性曲线,与图 2 所示上海植物的光谱特性一样,在 680 nm 处均有一个典型的吸收波峰,红边效应明显,一旦进入近红外区域,草类的光谱反射率急速增加,超过 800 nm 后基本上稳定在 40%~50% 的反射率范围内,图 4 中所示的草地光谱反射特性曲线

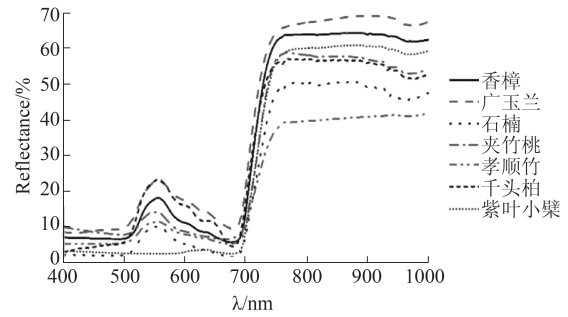


图 2 上海典型植物光谱反射特性曲线^[6]
Fig. 2 Spectral Reflection Characteristic Curves of Typical Plants in Shanghai

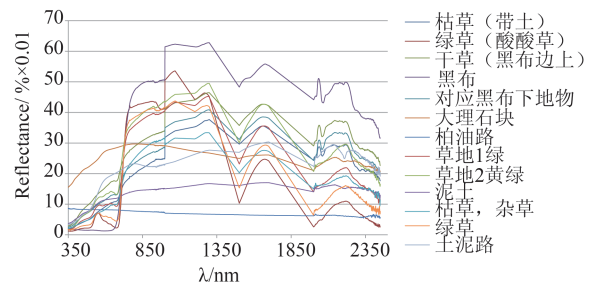


图 3 上海地物光谱反射特性曲线
Fig. 3 Spectral Reflection Characteristic Curves of typical ground surface in Shanghai

和图 3 中的数据基本一致。

根据图 4 和图 5 所示的沥青混凝土道路的光谱特性曲线可知,沥青路面在近红外区域内光谱反射率基本上维持在 15% 左右。水泥路面在近红外区域内的光谱反射率基本上维持在 45% 左右。而裸土土路地面由于各个区域中的土地成分差异性比较大,因此其光谱反射率也会存在着比较大的差异,从图 4 和图 5 中也能看出来光谱的反射率存在着较为明显的差异。

道路上行驶的机动车和非机动车,在外表面基

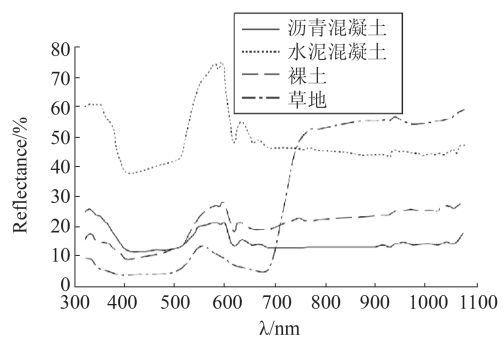


图 4 4 种地物原始光谱反射特性曲线^[7]
Fig. 4 Primary Spectral Reflection Characteristic Curves of Four Ground Objects

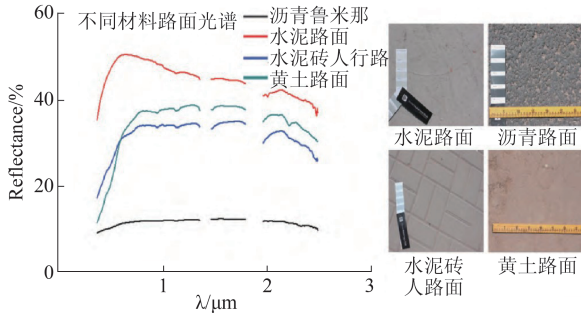


图5 通常路面光谱反射特性曲线^[8]
Fig. 5 Spectral Reflection Characteristic Curve of Pavement

本上都覆盖着油漆,不同厂家,不同品牌,它们采用的油漆工艺和成分并不完全一样,即便是同一厂家同一品牌,不同批次采用的油漆工艺和成分也有可能不一样。因此,道路上行驶的车辆的车身油漆的光谱具有不同的特征,但根据图6所示,车辆在近红外波段里,其反射率超过60%。

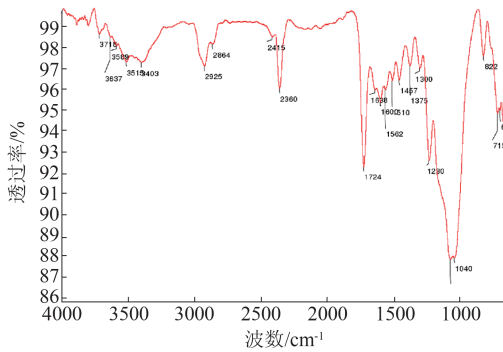


图6 汽车油漆的红外光谱图^[9]
Fig. 6 Infrared Spectrogram of Automotive Paint^[9]

3 激光雷达波长及光源的确定

通过对上述智能驾驶应用场景中各个目标物体的光谱特性分析,根据主成分分析法,针对2 151个波长,进行了13次测量,根据公式(1)~(4)计算进行波段的选取,再根据公式(7)计算各自的相对贡献率,得出前4个主成分相对贡献率如表1所示,从表1可以看出,采用光谱能量空间变换形式进行主成分分析,前4个主成分解释了几乎93%以上的

表1 PCA方法波长选择

Table 1 PCA wavelength selection

PCA 主成分	Band (nm) with first 10 highest factor loadings				Percentage variability explained				
	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4	前4个主成分
绿草	780-850	880-950	1025-1095	1285-1405	69	18	6	2	95
柏油路	780-850	880-950	1025-1095	1285-1405	57	27	8	1	93

光谱能量空间变换信息,从而得出适合智能驾驶激光雷达的敏感波段范围为780~850 nm, 880~950 nm, 1 025~1 095 nm, 1 285~1 405 nm。

然而多光谱激光雷达波长选择的最终确定还需要全面考虑以下几个方面:

(1)从地物探测和识别能力来说主要考虑两个方面,一方面所选择的波段组合要保持尽可能多的目标信息量;另外一方面需要进行判别的目标在所选择的波段组合上类别可分性最强。

(2)对于激光雷达传感器的光谱波段选择,需要考虑以下四个因素:a)激光雷达传感器的光谱敏感性;b)研究目标的信息尽可能多地包含在所选光谱波段范围内,c)在选择波段范围内是否存在大气窗口;d)在选择波段范围对人眼是否有安全影响。

(3)多光谱激光雷达传感器在考虑所研究目标光谱辐射特性对传感器光谱波段选择的影响时,既要考虑研究目标在该波段的光谱特征及该波段对研究目标识别的能力,又要尽可能减小各波段间的相关性,增加信息量。

在满足以上3方面的基础上,多光谱激光雷达的波长设置还需要考虑激光光源特性以及光电探测器的特性,综合多光谱激光雷达波段选择方法和智能驾驶应用场景中典型目标地物光谱特性分析,根据激光光源和大气影响因素两个方面的分析,采用Class I激光器安全级别,排除掉不适合的波段范围和波长,最终确定多光谱激光雷达的激光光源可选波长为808 nm、905 nm、1 064 nm、1 310 nm。其中808 nm的激光二极管为舞台激光灯中所常用,905 nm为当前智能驾驶激光雷达(速腾聚创, Velodyne)中所用,1 064 nm为激光切割与焊接中所常用的波长,1 310 nm为光通信常用波长。

4 结论

通过主成分分析法对面向汽车智能驾驶在公开道路复杂应用场景中人类、植物、道路、建筑,车辆等目标的光谱数据进行计算与分析,考虑面向汽

车智能驾驶的激光雷达光源特性及光电特性,综合目标地物光谱特性和产业现状,确定出面向汽车智能驾驶多光谱激光雷达的激光光源可选波长为 808 nm、905 nm、1 064 nm、1 310 nm。该波长组合选择,在保证对智能驾驶应用场景中各类目标物性有效探测进行分类的前提下,光谱通道数少,提高了光谱识别的效率,在实际系统设计中具有很大的指导意义,不仅能够满足物性分类探测,又能减少系统设计空间;不仅能节约系统搭建成本,又能保证数据处理和反演的效率。

References

- [1] A. N. Catapang and M. Ramos. Obstacle detection using a 2D LIDAR system for an Autonomous Vehicle [C]. 2016 6th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), Batu Ferringhi, 2016, pp. 25-27. doi: 10.1109/ICCSCE.2016.7893614.
- [2] T. Kim and T. Park. Placement Optimization of Multiple LIDAR Sensors for Autonomous Vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. doi: 10.1109/TITS.2019.2915087, 2019, **99**:1-7.
- [3] SONG Sha-lei. Principles and Key Techniques of Multi-spectral LIDAR for Earth Observation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [4] ZHAO An-xin, TANG Xiao-jun, ZHANG Zhong-hua, et al. The Spectral Characteristic Wave Length Selection and Parameter Optimization Based on Tikhonov Regularization [J]. *Spectroscopy and spectral Analysis* (赵安新, 汤晓君, 张钟华, 等. 利用 Tikhonov 正则化算法进行光谱特征波长的选择及其参数优化. *光谱学与光谱分析*), 2014, **34** (07):1836-1839.
- [5] ZHANG Jun-ju, YANG Wen-bin, XU Hui, et al. Influence of Human Body Target's Spectral Characteristics on Visual Range of Low Light Level Image Intensifiers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (张俊举, 杨文彬, 许辉, 等. 人体目标光谱特性对微光像增强器视距的影响. *光谱学与光谱分析*), 2013, **33** (11):3066-3070.
- [6] XIANG Qiao-qiao, SHEN Guang-rong, WU Yu, et al. Spectral Characteristics of Typical Vegetation in Shanghai in Both Summer and Winter [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)* (项巧巧, 申广荣, 吴裕, 等. 上海典型植被夏季与冬季的光谱特征分析. *上海交通大学学报(农业科学版)*), 2018, **36** (05):14-21.
- [7] ZHANG Ying-xue, XU Wei, WANG Yong, et al. Discrimination Spectral Analysis of Pavement Materials Based on Spectral Characteristics [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)* (张映雪, 徐威, 王勇, 等. 基于光谱特征的路面材料区分度分析. *长沙理工大学学报(自然科学版)*), 2017, **14** (04):1-9.
- [8] JIN Xu, ZHANG Xian-feng, LUO Lun, et al. Spectral analysis of road pavements and monitoring of the aging conditions of asphalt pavement from Worldview-2 Imagery [J]. *Journal of Geo-information science* (金续, 张显峰, 罗伦, 等. 公路路面光谱特征分析与沥青路面老花遥感监测方法初探. *地球信息科学学报*), 2017, **17** (5):672-681.
- [9] LONG Xian-jun. The Comparison Technology Research of Vehicle Body Paint Based on Infrared Spectrum [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [10] A. Samman et al., Potential use of near, mid and far infrared laser diodes in automotive LIDAR applications [C]. Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No. 00CH37152), Boston, MA, USA, 2000, pp. 2084-2089.
- [11] TANG Hong, ZHENG Wen-bin, LI Xiao-xia. Wavelength Selection Algorithm Based on the PCA from Light Extinction Measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering* (唐红, 郑文斌, 李宪霞. 基于主成分分析的消光法波长选择算法. *光电工程*), 2010, **37** (05):56-62.
- [12] LIU Zhi-shen, DING Ning, ZHAO Chao-fang, et al. Application of the PCA Method to Band Selection for Oil Fluorescence Spectrums [J]. *Geospatial Information* (刘智深, 丁宁, 赵朝方, 等. 主成分分析法在油荧光光谱波段选择中的应用. *地理空间信息*), 2009, **7** (3):12-15.