

车载多光谱镜头光学系统设计及其在环境感知中的应用

贺军峰

河南工业职业技术学院自动化工程学院 河南省南阳市 473000

摘 要: 车载环境感知属于智能驾驶技术发展的重要一环,传统的单一光谱视觉系统在复杂气象和光照条件下会出现感知盲区。车载多光谱镜头光学系统融合多个波段的可见光、近红外以及热红外,可以冲破单一光谱的局限,改进环境探测精度以及鲁棒性。以多光谱光学系统设计的技术要为切入点,分析它在智能驾驶环境感知方面的应用价值,提出波段协同优化,像差校正,轻量化集成的设计策略,并通过实例验证每个策略的有效性。通过研究可知道,合理规划好的多光谱光学体系,能明显提高汽车对障碍物,交通标记以及复杂路面状况的辨别水平,给智能驾驶的安全性能改进给予关键的技术支撑。

关键词: 车载多光谱镜头; 光学系统设计; 环境感知; 智能驾驶; 波段融合

引言

智能驾驶技术正在从 L2 级辅助驾驶到 L4 级高度自动驾驶迈进,而环境感知系统是汽车的“眼睛”,它的性能好坏直接决定着驾驶的安全性。传统的车载视觉系统大多使用可见光镜头,在遇到雨、雾、沙尘等恶劣天气或者夜晚低照度的场景时,很容易由于光线反射、散射而导致图像对比度降低,造成行人、障碍物的漏检或者误检。多光谱技术可以利用多波段信息互补的优势,可以发现目标在不同光谱区域的不同之处,对复杂的环境实现全方位的了解。车载多光谱镜头光学系统要于限定的安装区域中,同时顾及各种波段的光学效果和整个系统的稳定状况,它的规划牵涉光学材料的挑选,光路结构的改良,波段间的协同调节等一系列技术难点。对该系统的探究,有利于提升智能驾驶环境感知技术,有很重要的实际价值。

1. 车载多光谱镜头光学系统设计意义

1.1 提高目标的特征提取

车载多光谱镜头光学系统可同时获得多光谱的图像数据来形成目标的多维度光谱特征向量,这样就可以减少在单个光谱下目标和背景的特征相同时造成的误识情况发生。多光谱系统相比单光谱传统的视觉系统能够提取更加本质的目标特征,降低光照变化及阴影等因素的影响。使得汽车能够在复杂的交通场景当中对交通规则,危险进行更加准确的判断和识别。从根源上来提高了汽车对于驾驶的判断^[1]。

1.2 推动物车光学系统技术发展

车载多光谱镜头光学系统研究与应用,促进了车载光学在材料,光学设计,系统集成等方面技术的发展。要实现多波段共口径,就要研发出有宽波段透过率的光学材料以及高精度的光学镀膜技术。而且多光谱感知技术成熟以后,可减少智能驾驶对于高精度地图和激光雷达的重度依靠,改良感知体系的成本结构,为智能驾驶汽车大批量产营造根基,加快智能交通产业发展速度。

2. 车载多光谱镜头光学系统设计策略

2.1 基于波段协同优化的光学参数设计

车载多光谱光学系统需要设计成波段协同的方式进行工作,要按照智能驾驶环境感知的要求来确定每个波段的光学参数以及工作模式。首先要确定各个波段的探测目的和使用场景,可见光波段主要是用来做交通标识识别、颜色判断等,近红外波段主要是用在恶劣天气穿透、行人检测等方面,热红外波段主要是用来做夜间目标探测。在此基础上,改善各个波段的焦距,视场角,分辨率等参数,保证多波段图像在空间尺度上的匹配度。还要对波段之间进行权重分配来完成信息融合,在晴朗的白天可以提高可见光波段的权重从而获得更多的细节。

汽车技术公司针对 L4 级自动驾驶车辆的研发的多光谱光学系统就采用了可见光加近红外加热红外的“三波段”协同方式。在三个不同波段中,可见光波段选用 8 毫米的焦距,六十分视野角的光学镜片,分辨率达到一九二零乘一百零八

零,可以保证道路交通标识以及细节清晰的呈现,近红外波段选用的是零米的焦距,五十分的视野角,分辨率为一百分之零八零七零二十,主要提升的雾天穿透的能力,热红外波段选择的是零二毫米的焦距,四十五度的视野角,分辨率达到了零六四十零五十一十二,主要是用于夜间的目标能够捕捉到温度特点。系统运用自适应波段权重算法,依照环境光照状况以及天气状况来对各个波段的融合比例作出调节。在实际路上测试的时候,这个系统在看得很不清楚的,能见度只有小于五十米的大雾天气里面,它对前方一百米的车子进行识别准确率达到九十二%,比传统的一束光谱识别系统高出百分之四十;在晚上完全看不见灯光的路面上面,它可以发现到人有八十多米,比一束可见光系统的准确性高百分之六十;它完全证实了这个波段协同优化的策略^[2]。

2.2 宽波段像差校正的光学结构设计

多光谱光学系统需要包括很多波段,不同波段的光在不同的光学材料中折射率差别很大,容易造成色差,球差,慧差等各种像差,图像质量就会变差。宽波段像差校正使用特殊光学结构和材料的组合来达到整个波段范围的像差平衡。先选择色散系数相差较大的光学材料来组成消色差透镜组,比如使用氟化钙和普通光学玻璃组合,校正可见光与近红外波段的轴向色差;对于热红外波段,则需要选用低折射率温度系数的材料,减少温度变化带来的像差影响。其次使用非球面透镜和自由曲面透镜设计。非球面透镜可以很好的校正球差和慧差,自由曲面透镜可以让光线传播路线更加自由,可以实现多波段的像差同时校正。

高校光学实验室为车载多光谱系统开发出的宽波段像差校正结构,“双胶合消色差透镜+非球面透镜+自由曲面透镜”的结构就是。双胶合透镜选择氟化镁(MgF₂)和K9玻璃,校正可见光(450–650nm)和近红外(760–900nm)波段的色差;非球面透镜用PMMA材料,校正全波段的球差和慧差;自由曲面透镜使用锗(Ge)材料,专门针对热红外(8–12μm)波段的像差。通过对ZEMAX软件进行仿真分析可知,在整个波段范围450–12000nm下,对于各个不同视场来说,整个波面的波差都是小于 $\lambda/4$ (λ 为中心波长)。对于整个系统的色差校正相比传统结构提高了约50%。将上述光学结构应用到车载系统上之后,在进行多波段图像融合时,在可见光、近红外图像的边缘错位少于一个像素、热红外图像和可见光图像的图像配准误差少于两个像

素的情况下,使得融合后的多波段图像相对于没有校正系统的图像清晰度提高了35%的目标识别算法的识别精度得到了提升^[3]。

2.3 轻量化与抗振性导向的系统集成设计

车载环境对多光谱光学系统的要求是体积小、重量轻、稳定。车在行驶过程中会受到振动冲击,而车上有一定的载物空间,所以系统集成功能上要轻且抗振。材料选择方面,要选择高强度,低密度的光学和结构材料,光学镜片选用蓝宝石玻璃,具有很高的硬度和轻量化特点。结构件采用航空铝合金或者碳纤维复合材料,减轻系统重量的同时提高结构强度。在光路上,使用共口径光学设计,利用分束器或者滤光片转轮来使得多个波段共用同一条光路,减少使用光学元件的数量,减小系统体积。

新能源汽车公司所开发的用于智能驾驶车型的轻量化多光谱光学系统,就使用了共口径集成的方法。系统采用可见光波段作为基准光路,使用dichroic分束器将近红外、热红外波段的光线分开,使三个波段共享前镜组,光学元件比分立光路减少40%。采用碳纤维复合材料的结构件,整个系统的重量不超过300g,是传统的金属结构件的55%减重。抗振设计部分,镜头模组是采用的悬浮式的减振设计,其采用硅胶减震套,通过硅胶减震套与金属支架相连接,可以对10–2000Hz频率段的震动的能量起到很好的衰减效果,振动的传递率小于15%。此系统在车辆耐久性试验当中,经过了10万公里各种复杂的路况行驶之后,光学元件的相对位置偏差量<0.01mm,各个波段的成像质量没有明显的下降。在真实的道路行驶过程中,在颠簸起伏的沙石路面,依然保持稳定流畅的图像显示,并对前方的目标的识别误差也只会波动小于百分之三以内,可以满足对智能驾驶车辆对感知系统的高稳定性要求。

3. 结论

车载多光谱镜头光学系统融合多波段信息之后,就给智能驾驶环境感知供应了更为全面且可靠的手段。从文献可以看出波段协同优化可以提高系统对于复杂环境的适应能力,宽波段像差校正可以保证多光谱图像质量一致,轻量化与抗振性的集成设计满足了车载的应用条件。通过实际案例加以证明,在提升目标探测精准度并改善环境适应能力方面各设计策略可起到积极作用,尤其于恶劣天气条件、夜间等情况出现复杂情形之时能够得到较好的应对效果表现出来。未来

车载多光谱光学系统发展的趋势会朝向更高的波段分辨率、更快的响应速度和更低成本的整合方案发展, 需要加强多光谱信息同激光雷达、毫米波雷达数据融合技术的研究, 完善智能驾驶感知体系。伴随着技术的日渐成熟, 多光谱感知会成为智能驾驶安全保障的重要技术, 助推智能交通不断发展。

参考文献:

[1] 祝战科, 金熙, 柯熙政. Zernike 多项式在光学系统中的应用研究 [J/OL]. 光通信技术, 1-14[2025-09-17].

[2] 梁文娜, 李翰山. 光电成像系统目标探测能力建模与性能评估 [J]. 探测与控制学报, 2025, 47(04): 174-181.

[3] 文瑶, 李民赞, 赵毅, 等. 不同车速车载多光谱成像系统性能分析 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 215-221.

基金项目: 河南省科技攻关, 2025 年河南省教育厅, 课题名称: 基于复杂环境的智慧交通系统光学镜头设计与关键技术研究, 课题编号: 252102220004

作者简介: 贺军峰 (1981.04), 男, 汉, 山东人, 硕士, 自动化工程学院讲师, 主要研究方向为智能光电制造技术。