

智慧交通多模态感知镜头的光学融合设计与应用

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：智慧交通体系建设中，多模态感知是做到交通状况准确掌握，管控有效的关键一环。多模态感知镜头通过光学融合方式把不同的感知模态融合起来，从而超越单一模态在复杂交通情形之下对感知所造成的局限。从光学系统设计的角度去探究多模态感知镜头的融合办法，改良光学参数的吻合以及信号的耦合方式，提高感知数据的时空一致性和精确度。联系到实际的交通场景，去检验光学融合设计在交通流量监测、异常情况识别以及恶劣天气适应等各方面的能力表现，从而给智慧交通感知系统的更新换代给予技术支持，促进交通朝着更加智能，更加安全的方向迈进。

关键词：智慧交通；多模态感知镜头；光学融合镜头设计；镜头感知效能

引言

随着城市化速度加快，交通流量变大和交通环境复杂化，对交通感知系统的需求也就越来越高。传统的单一模态感知镜头，像可见光相机，红外相机等等，在碰到强光，暴雨，雾霾等复杂的环境中会出现感知盲区或者数据不准。多模态感知镜头利用光学融合技术，把多种感知模态融合在一起，互有优势。现阶段，智慧交通对于高精度、全天候的感知需求越来越紧迫，光学融合设计是多模态感知镜头的主要技术手段，所以该技术是否合理有效直接影响整个交通感知系统的好坏。开展智慧交通多模态感知镜头的光学融合设计与应用研究，有重要的现实意义和应用价值。

1. 智慧交通多模态感知镜头的光学融合设计与应用的意义

1.1 突破模态局限

在智慧交通的感知场景下，单一种类的感知道路摄像头受制于本身固有的光学特性，无法很好地应对多种多样的交通环境及工况。可见光镜头依靠的是自然光，夜间，隧道等低照度情形下成像质量大幅下滑，车辆轮廓和车牌信息无法清楚捕获，红外镜头虽然能在低照度环境下运作，不过对颜色信息感知较弱，不能辨别交通信号灯状态，车辆类型等细节，激光雷达可以得到三维距离信息，不过受天气影响比较大，大雨，浓雾天气探测精度会明显下降。多模态感知镜头的光学融合，就是把不同模态的光学系统融合起来，在同一感知镜头里做到数据的采集与融合。这样可以充分发挥各种模态的优势，在低照度又有雾的情况下，把红外镜头的

热成像信息和激光雷达的距离信息结合起来，既可以抓取到车辆的热辐射信息来判断目标的位置，也可以利用距离的信息去构建车辆的三维轮廓，从而打破单模态的感知局限，增强镜头对于复杂交通场景的适应能力，给后续的交通数据处理和决策提供更加全面可靠的基础数据^[1]。

1.2 提高感知数据的时空一致性

智慧交通系统运行效率取决于感知数据在时间和空间上的同步性，即不同时空下的感知数据能匹配在一起，从而正确地反映交通事件的真实状态。传统的多模态感知系统中各个模态的镜头往往是各自分开布置，存在安装位置不准，时钟不同步等问题，因此采集到的数据在时空上无法对齐。如可见光相机和激光雷达安装在道路两侧不同的立杆上，当车辆经过时，两种设备采集到的车辆信息，在时间上会有一定的时间差，在空间上也有位置偏移。在做数据融合的时候，就需要对数据进行复杂的校准，不仅增加了计算量，还会因为校准误差导致数据的不准确。多模态感知镜头的光学融合，把多种模态的光学部件放进同一个镜头里面，同用一个光学孔径，或者借助精心安排的光学耦合办法使光路对齐，从而做到各模态在同时刻同空间位置采集数据。这样做的好处就是可以从根本上保证感知到的数据具有时空一致性，使得后期数据的校准工作更加简单、出错率更低。准确的时空一致数据能使得交通决策系统更加准确地去判断交通流量，车辆行驶轨迹，交通事件发生的时间和地点等等这些重要的信息，从而可以制定出更加科学，更加合理的交通管控策略，提高交通的运行效率。

2. 智慧交通多模态感知镜头的光学融合设计与应用的策略

2.1 以光学参数匹配为原则的多模态融合

光学参数匹配是针对多模态感知镜头里不同模态光学系统的协同优化问题，保证不同模态在成像范围，分辨率，景深等参数上互相补充，互相匹配。这种策略通过创建各模态光学参数联系模型，按照具体的交通感知需求去改变焦距，光圈，像元尺寸之类的参数，从而做到各模态数据在空间分辨率和覆盖范围上保持同步，防止因为参数不符而造成的数据多余或者缺失现象出现。比如说在既想做广域的交通流量监测又想对局部区域细部做出辨别的场合时，通过改动长焦和短焦模态的光学参数来完成宽视角与高分辨的有机融合，从而改进摄像头整体的感受能力。交通科技公司联合高校开发的多模态高速公路镜头是高速公路特有长距离及高速公路特性高速度的特殊需求，采用“广角 + 长焦”双模态光学设计。广角模态用焦距为 8mm 的光学系统，视场角达到 120 度，可以覆盖 3 条车道的全幅路面，适合做大的交通流量检测；长焦模态用焦距为 50mm 的光学系统，视场角为 15 度，可以对 200 米距离上的车辆做高分辨率成像，识别车辆车牌，车型以及驾驶员的行为。为了参数匹配，研发团队借助于光学仿真软件，创建了两种模态的成像模型，把广角模态光圈设定为 F2.0，像元尺寸为 3.0um，长焦模态光圈设定为 F1.8，像元尺寸为 3.5um，在相同的距离下，两种模态的成像分辨率达到匹配，也就是广角模态 50 米的分辨率等于长焦模态 200 米的分辨率。此镜头在某高速公路路段经过 3 个月的实际检验，广角镜头可以统计出一小时内的车流量大小和车辆型号分布等宏观的交通情况，统计偏差低于 3%，而长焦镜头可以识别出 126 例驾驶人拨打接听电话，不扣安全带之类的违规行为，并且可以达成 95% 以上的识别准确率。依靠光学参数精确匹配，此镜头做到宏观观测高速公路和微观观察高速公路细节的完美融合，给高速公路交通控制赋予全面的感知数据支撑^[2]。

2.2 自适应光学补偿基础上的多模态融合

自适应光学补偿策略是为解决智慧交通场景中复杂环境干扰（大气湍流、温度变化、振动等等）造成光学成像质量降低的问题而提出的一种融合技术。它是在多模态感知镜头里整合波前传感器和可变形镜等自适应光学元件，实时检测光路里的波前畸变，然后根据畸变信息调节可变形镜的形

状，补偿畸变波前，达到恢复清晰成像的效果。多模态融合里头，在自适应光学补偿这块儿，各模态的光路可被一并处理，不同模态在复杂环境中都能得到稳定又优质的感知信息，这样一来后续的数据融合和分析便得到了可靠的保障。

当地交通管理部门开发了自适应光学补偿多模态感知镜头，解决山区高速公路由于地形复杂，气象条件变化大造成的感知困难。这个镜头把 Shack-Hartmann 波前传感器和 61 个活动镜子融合到一块，波前探测器的速度高达 1kHz，并可以立刻找到大气湍流造成的波前形变。变形反射镜的反应速度少于 5ms，能迅速弥补形变。镜头同时有可见光和激光雷达两种模态，自适应光学组件位于两种模态的共用光路上，可以同时补偿两种模态的波前畸变。在山区高速公路测试的时候，镜头遇到了暴雨，浓雾，强风等各种复杂的天气情况。在暴雨天气下，不开启自适应光学补偿时，可见光图像严重雾化、模糊，激光雷达的探测距离从 200m 降到 80m；开启自适应光学补偿后，波前传感器实时检测到雨滴引起的波前畸变，并用可变形镜补偿，可见光图像清晰度提高 60%，激光雷达的探测距离恢复到 180m。在风力较强使得镜头有所抖动的情况下，自适应光学补偿系统依然起到了很好的作用，使激光雷达采集到的车辆距离数据波动范围缩减到了 ± 0.1 米，保证了车辆定位的准确。利用该镜头，山区高速公路在复杂环境下交通感知能力得到提高，降低了由于感知失效造成的交通事故发生率，给山区智慧交通建设提供技术支持。

3. 结论

智慧交通多模态感知镜头的光学融合设计是提高交通感知系统性能的主要方式。证明了共孔径光学设计、光学参数匹配和自适应光学补偿这三种方案，分别从时空一致、参数协同、环境适应三个方面为多模态感知镜头的优化给出了解决问题的办法。共孔径设计消除了多孔径系统的时间和空间偏差，光学参数匹配可以弥补不同模态的缺点，自适应光学补偿可以在复杂环境中得到较好的成像效果。从实际交通场景中测试可知，本方案提出的各种策略在改善交通流量监测准确性、异常事件发现速度、恶劣天气适应能力等多方面都取得很好的效果。将来，光技和人工智能算法的联系越密切，多模态感受镜头的光技联系会向着更为集合化，更为智能的趋势发展，这会给智慧交通体系彻底更新供应越发强有力的技术保证，从而促使交通系统朝着安全，高效，可连续

生长方向迈进。

参考文献:

- [1] 杨晓芳, 张富龙, 董洁霜, 等. 面向智慧交通应用的《交通工程学》课程体系改革研究 [J]. 物流科技, 2025, 48(17):144-146.
- [2] 陈剑. 智慧交通背景下多式联运协同的关键瓶颈与优化策略 [J]. 中国航务周刊, 2025,(36):87-89.
- [3] 邱月, 任婉萩. 时间感知中的影像传播——1978 年

以来中国现实主义电影的长镜头 [J]. 文艺争鸣, 2024,(10):167-171.

课题项目: 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。