

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

激光无线电能传输系统对准环节设计

康劲松, 周艳萍, 孙梁榕, 孔凡伟, 吕艳亭

引用本文:

康劲松, 周艳萍, 孙梁榕, 等. 激光无线电能传输系统对准环节设计[J]. *光电工程*, 2023, 50(7): 230109.

Kang J S, Zhou Y P, Sun L R, et al. Design of alignment subsystem for laser wireless power transmission system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230109.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230109>

收稿日期: 2023-05-15; 修改日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-07-27

相关论文

无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展

梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 白勃, 曹明华, 赵黎, 王怡, 邓佳新
光电工程 2022, 49(8): 210439 doi: [10.12086/oe.2022.210439](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210439)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



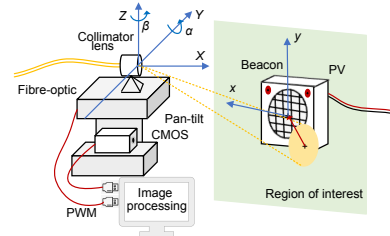
 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230109

激光无线电能传输系统 对准环节设计

康劲松^{1,2}, 周艳萍^{3*}, 孙梁榕³, 孔凡伟⁴, 吕艳亭⁴¹同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804;²同济大学磁浮技术铁路行业重点实验室, 上海 201804;³同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804;⁴上海航天电子有限公司, 上海 201821

摘要: 激光对准是激光无线电能传输系统中接收端获得稳定能源的前提, 激光传能对对准精度、稳定性和实时性提出了较高的要求, 因此, 提出了一种激光对准系统设计方法, 并对感兴趣区域提取以及图像预处理方法进行了优化改进: 一方面, 通过引入 MobileNet、增加空间注意力机制以及融合语义的方式改进 SSD (single shot multi-Box detector) 模型, 使用改进模型训练并预测感兴趣区域, 相较于原始模型, 训练速度提升了 71.67%, 模型大小减小了 52.48%, 实时检测速度提升了 295.30%, 检测偏差显著减小; 另一方面, 对灰度化的权值进行了优化, 并利用直方图实现阈值的自适应选取, 采用椭圆拟合法及形心法检测光斑与信标中心点, 优化图像处理方法能够有效提取光斑, 减小光斑定位的误差。实验结果表明, 改进的激光对准系统精度稳定在 95% 以上, 能够满足实际应用中精度、速度与稳定性的要求。

关键词: 激光对准; SSD 网络; 图像处理; 目标检测**中图分类号:** TN249; TM724.3**文献标志码:** A

康劲松, 周艳萍, 孙梁榕, 等. 激光无线电能传输系统对准环节设计 [J]. 光电工程, 2023, 50(7): 230109

Kang J S, Zhou Y P, Sun L R, et al. Design of alignment subsystem for laser wireless power transmission system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230109

Design of alignment subsystem for laser wireless power transmission system

Kang Jinsong^{1,2}, Zhou Yanping^{3*}, Sun Liangrong³, Kong Fanwei⁴, Lv Yanting⁴¹Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China;²Key Laboratory of Maglev Technology in Railway Industry, Tongji University, Shanghai 201804, China;³College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;⁴Shanghai Aerospace Electronics Co., Ltd., Shanghai 201821, China

Abstract: Laser alignment is a prerequisite for stable energy acquisition at the receiver end in laser wireless power transmission systems. Laser power transfer imposes high requirements on alignment accuracy, stability, and real-time performance. Therefore, a laser alignment system design method is proposed, and optimizations are made to the region of interest extraction and image preprocessing methods. On one hand, the SSD (single shot multi-Box detector) model is improved by introducing MobileNet, incorporating spatial attention mechanism, and fusing

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-07-27

*通信作者: 周艳萍, zhouyanp@tongji.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

semantics. The improved model is used for training and predicting the regions of interest. Compared to the original model, the training speed is improved by 71.67%, the model size is reduced by 52.48%, the real-time detection speed is increased by 295.30%, and the detection error is significantly reduced. On the other hand, the weights of grayscale conversion are optimized, and an adaptive threshold selection using a histogram is implemented. The elliptical fitting method and centroid method are employed to detect the spot and beacon center, reducing the error in spot localization. Experimental results show that the improved laser alignment system achieves a stable accuracy of over 95% and meets the requirements of accuracy, speed, and stability in application.

Keywords: laser alignment; SSD network; image process; object detection

1 引言

在电气与能源行业, 无线电能传输技术凭借其无需物理或电气上的连接、通用便携、操作灵活、用户友好等特点, 已成为研究热点之一^[1-2]。在激光无线电能传输系统中, 激光光斑与光伏阵列的对准是激光传能接收端能够获得稳定能源的前提与保障^[3]。

目前的激光捕获、瞄准与跟踪 (acquisition, pointing and tracking, APT) 系统多应用于激光通信领域, 通过使发射端与接收端光束实时瞄准建立稳定的无线光通信链路, 是无线光通信系统中不可或缺的一部分^[4], 一般分为有信标和无信标两种类型。无信标 APT 捕获环节和通信使用同一光路, 通常采用分束镜将光束分路实现定位, 此方法以增加捕获算法复杂性的代价换取系统硬件结构上的优势, 而有信标 APT 系统中对准与通信独立工作, 算法相对简单^[5]。在传能领域中, 采用分束镜进行定位的方法能够有效实现光斑的定位, 但在光路中引入额外光学环节会对能量传输效率与系统可靠性造成一定的影响。因此, 引入额外信标实现激光 APT 的方法被广泛采用。2014 年, 山东航天电子技术研究所设计了一种激光 APT 系统, 采用相位阵列提升了激光发射端与接收端的瞄准精度^[6], 2019 年, 该研究所针对无人机应用场景下的 APT 系统, 进一步建立自适应感兴趣区域, 通过 Kalman 预测算法实现稳定跟踪^[3]。2017 年, 武汉大学提出了一种面向无人机供能的 APT 系统, 系统整体光电转换效率约为 12%, 跟踪精度优于 400 μrad ^[7]。2021 年, 南京航空航天大学基于二轴扫描振镜的工作原理, 设计了激光对微型无人机实时跟踪瞄准充电的系统, 在一定条件下能够实现准确跟踪^[8]。

现有的研究大多采用图像传感器进行 APT 设计, 图像处理也成为 APT 系统设计中的关键。然而, 目前研究中关于图像处理部分仅仅涉及简单的感兴趣区

域 (region of interest, RoI) 提取、图像预处理流程 (如灰度化、去噪、滤波等), 在实际的应用中, 受到太阳光等气象因素以及遮挡等物理因素的干扰, 容易发生 RoI 丢失、阈值失效等现象导致定位失败。本文提出了一种适用于激光传能领域的激光对准系统设计方法, 引入深度学习卷积神经网络对 RoI 进行自适应提取, 确保能够快速准确识别目标光斑, 进而实现激光光斑与光伏阵列的高速、高精度对准。

目标检测的任务是找出图像中所有感兴趣的目标, 确定类别及位置, 是计算机视觉领域的核心问题之一。基于深度学习的目标检测模型可分为 Two Stage 和 One Stage 两种, 前者先进行区域生成, 再通过卷积神经网络进行样本分类, 常见的算法有 R-CNN^[9], Fast R-CNN^[10] 和 Faster R-CNN^[11] 等; 后者采用直接在网络中提取特征的方式进行目标分类与位置预测, 代表模型主要有 YOLO (you only look once)^[12] 和 SSD (single shot detection)^[13]。其中, SSD 结合了 YOLO 的回归思想和 Faster-RCNN 的 Anchor 机制, 使用多尺度区域进行回归, 兼顾了速度与精度, 尽管如此, SSD 网络仍然难以在嵌入式设备中应用。Howard 等^[14] 提出的轻量化卷积神经网络 MobileNet 在 SSD 中的应用取得了较好的效果。MobileNet 引入了深度可分离卷积 (depthwise separable convolution, DSC), 能够减小模型的参数和计算量, 使得 MobileNet-SSD 模型检测速度得到极大提升。为进一步强化卷积神经网络的特征提取能力, Hu 等人^[15] 提出了压缩激励 (squeeze and excitation, SE) 模块, SE 模块对通道特征进行压缩激励, 得到的权重与输入特征图相乘实现特征强化。SE 模块仅仅关注通道层面上的强化, Woo 等人^[16] 则提出了一种空间和通道融合的注意力模块 (convolutional block attention module, CBAM), CBAM 沿着两个独立的维度依次输出权重, 最后将权重与输入特征图相乘实现特征增强。此外, 在目标检测任务

中,适当地融合不同尺度的特征是提高模型性能的重要手段,如 Lin 等人^[17]提出的特征金字塔网络(feature pyramid network, FPN)融合底层高分辨率信息和高层强语义信息,实现特征的强化。

在确保能够稳定获取 RoI 的基础上,对 RoI 进行图像处理并获取激光光斑与信标光中心点,进而实现激光光斑与光伏阵列的对准。图像处理流程一般包括灰度化、阈值处理、滤波去噪、轮廓检测、光斑拟合定位等,近年来,已有许多学者对此开展了研究。文献[18]使用了传统的图像预处理方法降低噪声干扰,引入重心曲线拟合算法提高激光定位精度。文献[19]设计了一种远近场自适应激光光斑能量中心检测,使用大津法对图像进行阈值分割,预处理的方式也较为简单。当前,大多数针对激光光斑定位的研究所针对的光斑图像前景与背景对比鲜明,常规的阈值分割方式能够十分容易地提取出光斑,然而,在无线电能传输背景下,激光光斑图像背景的干扰较多,全局阈值分割方法往往难以将光斑完整地提取。

本文在激光无线电能传输背景下,首先对有信标激光对准系统进行了设计,根据激光对准平台特性对 RoI 自适应提取以及图像处理方式进行了优化改进:一方面,为实现 RoI 自适应提取,本研究结合卷积神经网络,采取引入 MobileNet 网络替换主干部分、增加空间注意力机制以及融合上下语义特征的方式对 SSD 模型进行适应化改进;另一方面,针对图像处理中灰度化以及阈值分割的环节,根据激光光斑三通道特性重新确定权值,使灰度直方图中波峰与波谷更加明显,更易于基于灰度直方图的阈值选定,提高后续检测激光光斑与信标光斑中心点的精度和稳定性。最后,通过搭建激光对准平台对所设计的系统进行了实验验证。

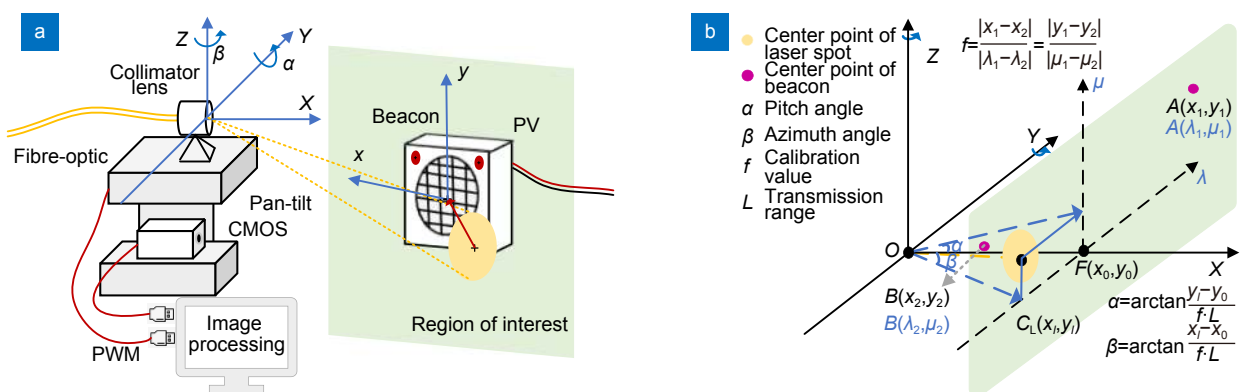


图 1 激光对准系统设计。(a) 对准系统结构; (b) 坐标转换原理图

Fig. 1 Design of the laser alignment system. (a) Alignment system structure; (b) Principle of coordinate transformation

2 激光对准系统设计

2.1 系统总体设计

针对激光无线电能传输平台,设计一种有信标的激光对准系统,系统原理如图 1(a)所示,主要部件包括三维云台、CMOS 图像传感器、两个 LED 信标灯,准直扩束透镜装载在云台上方,LED 信标灯装载于光伏阵列所在平面上。系统主要工作流程如下:1) 摄像头采集光伏阵列所在平面图像,经过串口连接至计算机;2) 计算机基于 Python+OpenCV 工作环境调用摄像头,预测感兴趣区域并对图像进行实时处理,定位中心点,计算云台方位角和俯仰角;3) 将云台控制信号发送给舵机,驱动云台及光学透镜向目标位置转动,最终实现激光光斑与光伏阵列的对准。

坐标转换及云台方位角、俯仰角计算原理如图 1(b)所示,图中 $\lambda-\mu$ 是以光伏阵列所在平面建立的二维坐标系,光伏阵列中心为坐标原点,两信标中心点坐标分别为 $A(\lambda_1, \mu_1)$ 和 $B(\lambda_2, \mu_2)$; $x-y$ 是数字图像对应二维坐标系,其原点为数字图像所对应矩阵的第一行第一列位置,得到两信标坐标点 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$ 以及激光光斑中心 $C_L(x_l, y_l)$, 结合 $\lambda-\mu$ 坐标系中信标位置得到像素差与实际距离的标定值:

$$f = \frac{|x_1 - x_2|}{|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{|y_1 - y_2|}{|\mu_1 - \mu_2|}, \quad (1)$$

在实际使用时,式(1)中等式未必成立,这是因为像素坐标为整数,存在一定取整误差,因此,可以取二者的均值。得到标定值 f 之后,可以计算得到像素坐标中光伏阵列中心点位置:

$$\begin{aligned} F(x_0, y_0) &= F(x_1 - f \cdot \lambda_1, y_1 + f \cdot \mu_1) \\ &= F(x_2 - f \cdot \lambda_2, y_2 + f \cdot \mu_2), \end{aligned} \quad (2)$$

已知透镜所在平面与激光光伏阵列所在平面距离为 L , 则以透镜中心建立三维坐标系 $X-Y-Z$, 俯仰角 α 和方位角 β 为

$$\alpha = \arctan \frac{y_l - y_0}{f \cdot L}, \quad (3)$$

$$\beta = \arctan \frac{x_l - x_0}{f \cdot L}. \quad (4)$$

2.2 基于改进 SSD 的感兴趣区域提取

SSD 检测算法通过对不同尺寸的特征图设置默认框实现对不同大小的目标进行检测, 兼顾了速度与精度, 将其引入至激光对准系统的感兴趣区域检测中, 能够满足精确性的要求。但实际对准场合中, 需要更优的实时性、稳定性、抗干扰性, 因此, 本文针对 SSD 网络对以下三方面进行了改进: 首先, 引入 MobileNet 模型替换 VGG16 主干网络, 实现模型轻量化; 其次, 在 MobileNet-SSD 模型的主干网络中引入空间注意力机制, 强化模型对空间位置的敏感度; 最后, 采用特征融合的方式, 加强辅助卷积层上下文语义的关联度, 进一步提高模型精度。改进的 SSD 模型如图 2 所示。

2.2.1 MobileNet 模型

传统 SSD 算法主干网络采用 VGG16, 在实际应用中仍然存在优化空间, 引入 MobileNet 能够减少模型参数, 进一步提高 SSD 算法速度。MobileNet 模型的核心是采用了深度可分离卷积, 其结构如图 3 所示。假设输入通道为 k , 输出通道为 $2k$, 首先对输入特征图逐通道卷积, 得到 k 个特征图谱, 接着对 k 个特征图谱逐点卷积, 得到 $2k$ 个输出特征图谱, 中间参数为 $k \times 3 \times 3 + 2k \times 1 \times 1$ 。而普通的卷积是采用 $2k$ 个 3×3 的卷积核遍历 k 个通道的每个数据, 参数为 $k \times 2k \times 3 \times 3$ 。显然, 引入 MobileNet 网络能够极大减少计算量。

2.2.2 空间注意力机制

在卷积神经网络中, 引入注意力机制能够进一步强化高价值的特征, 提高模型性能。CBAM 模块是一种轻量级模块, 几乎可以忽略内存消耗集成到网络架构中。CBAM 包含通道加权和空间加权两个子模块, 输入特征层经过通道注意力模块加权得到第一个输出后, 再经过一个空间注意力模块, 最终加权得到输出特征层。

CBAM 模块中的空间注意力模块 (spatial attention module, SAM) 结构如图 4 所示。SAM 首先对输入特

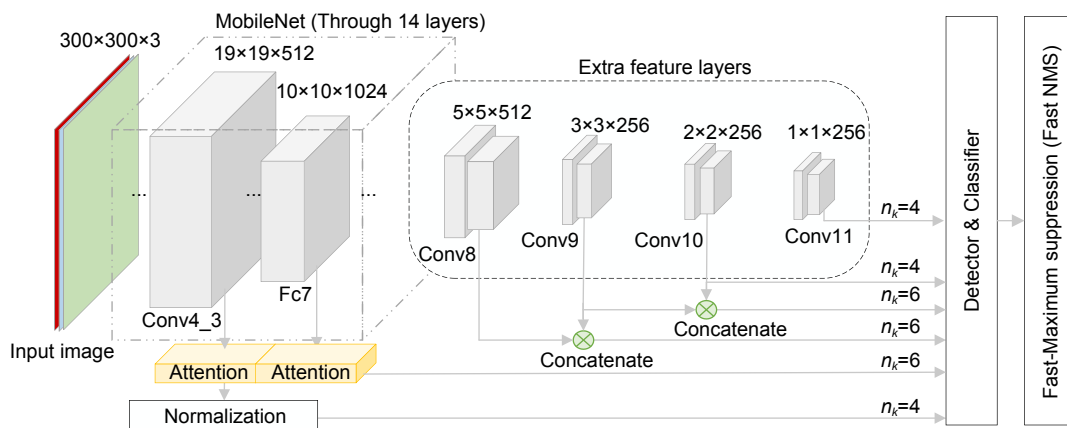


图 2 改进的 SSD 模型
Fig. 2 Improved SSD model

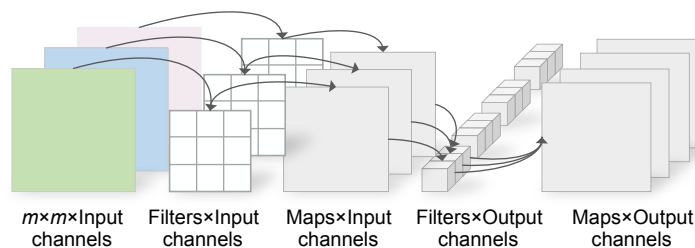


图 3 深度可分离卷积原理
Fig. 3 Diagram of the depthwise separable convolution

征图进行通道维度的最大池化和平均池化, 得到两个通道为 1 的特征图, 将两个特征图融合得到 $H \times W \times 2$ 的特征图, 针对该图进行一次卷积核为 7 的卷积操作将通道数降维为 1, 经过 Sigmoid 函数激活, 生成空间注意力权重, 将该权重与输入特征图相乘, 即得到加权的特征图。在 SSD 模型中引入 SAM 模块, 通过加权处理特征图的不同空间位置, 使网络更关注对准过程中关键的空间区域, 提高感兴趣区域检测的准确性和可靠性。

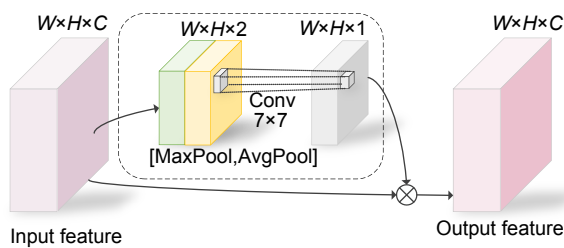


图 4 空间注意力机制
Fig. 4 Spatial attention module

2.2.3 特征层的改进

在 SSD 网络后端的特征提取层经过多次卷积与池化处理后, 特征更加抽象, 也更容易丢失语义特征, 因此, 后端特征提取层主要面向大目标的提取。为模型训练更适应本研究所处理的对象, 在避免计算量过多增加的同时, 尽可能保留更多的特征, 本研究选择将 conv8_2、conv9_2、conv10_2 层交叉融合, 融合方式如图 5 所示。由图中可以看出, 特征层 Conv9_2 经过反卷积后得到特征层与 Conv8_2 经过两次 3×3 卷积后的特征层融合, 再通过 1×1 卷积降维得到新的 Conv8_2 特征层, 同理得到新的 Conv9_2 特征层。通过融合特征层, 将不同尺度和层次的特征信息进行综合, 能够提供更丰富的特征表示。

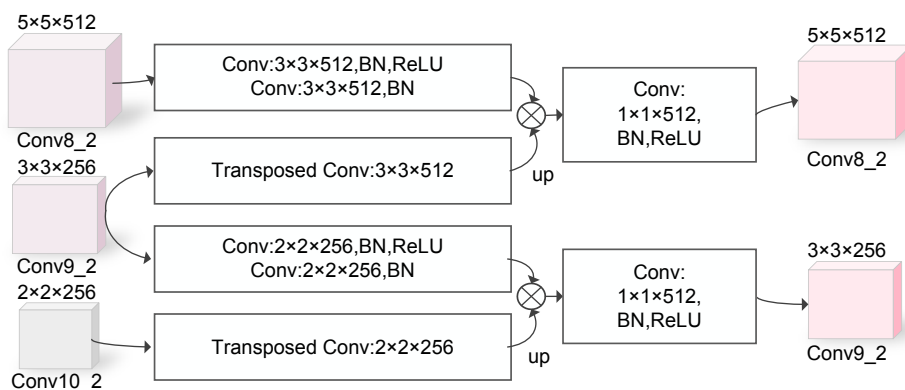


图 5 特征融合模块
Fig. 5 Diagram of the feature fusion module

此外, 不同特征层对于同一目标的描述可能具有不同的视角和抗干扰能力, 融合特征层能够增强特征的鲁棒性和稳定性, 有助于提高感兴趣区域提取的准确性。

2.3 图像处理

2.3.1 图像处理流程

激光对准系统的目的在于激光光斑与光伏阵列的对准, 研究采用自适应 RoI 提取方式与传统图像处理相结合的方式, 对激光对准系统的图像处理环节进行设计。首先, 在采集到数字图像之后, 通过训练完成的改进 SSD 卷积神经网络提取 ROI; 其次, 对感兴趣区域进行处理, 图像预处理流程包括优化权值的图像灰度化处理、基于灰度直方图的阈值分割、滤波去噪, 经由优化的图像预处理环节提取出激光光斑与两个信标光斑之后, 由于两个信标光像素点较少, 针对激光光斑使用基于最小二乘法的椭圆拟合算法进行中心点定位, 对于两个信标光斑则采用形心法进行定位。

在图像预处理的环节中, 本研究综合数字图像的 RGB 三通道的特性, 对 NIR (近红外) 波段的光斑对应的图像特征进行提取, 对灰度化与阈值处理环节进行了改进, 基于光斑图像三通道像素分布优化灰度加权平均法中的权值, 并根据 RoI 区域灰度直方图的分布特点实现自适应阈值分割。

2.3.2 图像灰度化

灰度化处理将彩色图像转化为灰度图像, 灰度范围为 0 至 255, 常见的方法主要包括最大值法、平均值法、加权平均法等。本研究使用加权平均法对彩色图像进行灰度化处理, 为了进一步简便阈值选择并定位光斑中心点, 对权值进行了优化, 加权平均法公式

如 (5) 所示:

$$I(x,y) = (1 - \alpha - \beta)I_R(x,y) + \alpha I_G(x,y) + \beta I_B(x,y), \quad (5)$$

其中: $I_R(x,y)$, $I_G(x,y)$, $I_B(x,y)$ 分别表示 RGB 三通道图像中坐标 (x,y) 的像素值, $I(x,y)$ 表示灰度图像中坐标 (x,y) 的像素值, $1 - \alpha - \beta$, α 和 β 分别表示 RGB 三通道的权值。

图 6 是某采集图像的 RoI 区域的三通道像素值的二维强度分布, 通过观察多张图像三通道分布情况发现, 单个激光光斑和两个信标光的像素点相对于背景有明显的凸起, 而且三个通道对光斑的贡献也不同。研究选取 10 张典型的光斑彩色图像, 提取三通道像素值, 并通过设定阈值 (根据 Otsu 与迭代法求得全局阈值约为 127) 的方式滤除背景, 仅保留像素值 (光斑包含在内) 较为强烈的部分。对于每一组光斑的三通道像素值, 计算它们的均值, 并进一步求出了 10 组彩图的均值。最终, 得到三通道像素的比例 $\alpha = 0.299$, $\beta = 0.348$ 。

图 7(a) 和 7(b) 是分别使用常规权值 (为使灰度图像更符合人眼的视觉感受, 通常情况下, RGB 三通

道权值分别为 30%、59% 和 11%) 以及优化权值对某一幅图像进行灰度化处理后得到的直方图对比, 能够观察到优化后的方法能够使灰度直方图中波峰波谷更加明显。在灰度值为 126 附近的区域, 使用优化权值进行灰度化的灰度图像直方图 (图 7(b)), 相较于使用常规权值进行灰度化的灰度图像直方图 (图 7(a)), 所形成的三角区域更大, 进一步强化了波峰。因此, 使用优化权值对图像进行灰度化, 能够使后续基于灰度直方图提取出的阈值能够更加契合光斑图像的分割, 确保能够完整检测出激光光斑与信标光斑, 实现中心点定位。

2.3.3 阈值处理

常用的阈值分割方法有固定阈值法、迭代法、最大类间方差法 (Otsu 法) 等, 总结本研究中感兴趣区域图像的特性以及灰度处理后直方图的形状, 总体上能够将 RoI 区域分为三类, 包括背景 (白色墙壁, 灰度值中等)、黑色挡光板 (灰度值最低) 以及光斑 (灰度值最高, 但是面积小)。为使光斑从图像中完整地剥离, 研究采用基于灰度直方图的方式进行固定阈值

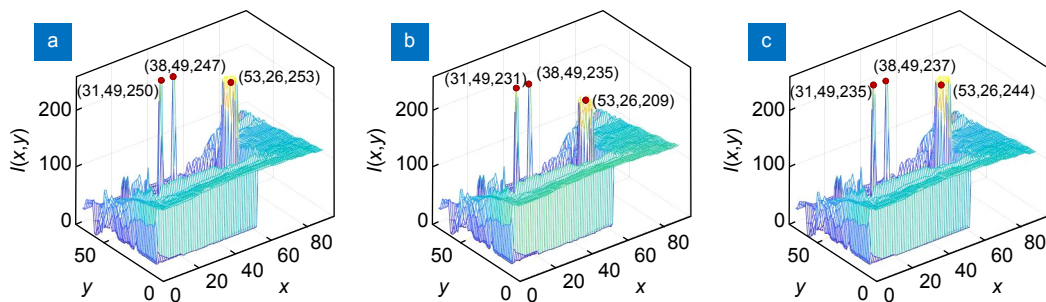


图 6 某采集图像的 RoI 区域的三通道像素值的二维强度分布。(a) R 通道; (b) G 通道; (c) B 通道

Fig. 6 Two-dimensional strength distribution of three channel pixel values in the RoI area of a captured image. (a) Red channel; (b) Green channel; (c) Blue channel

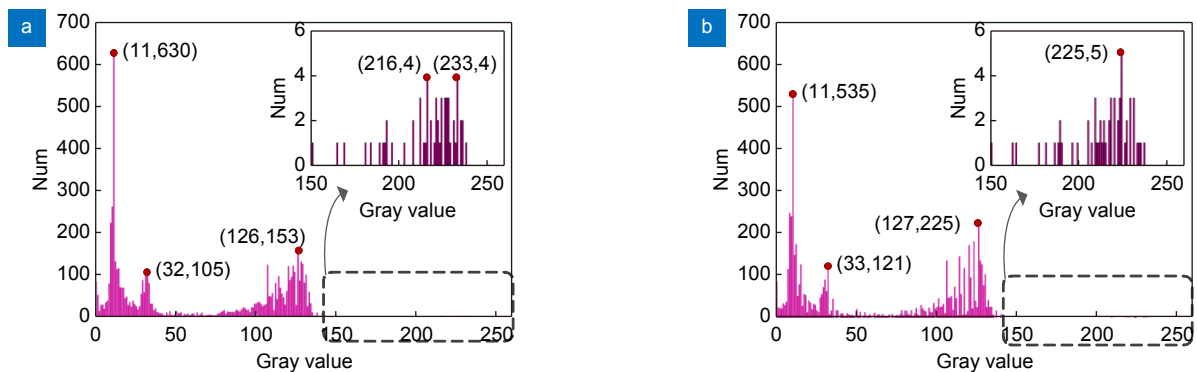


图 7 使用不同权值进行灰度处理后的直方图对比。(a) 常规权值; (b) 优化后权值

Fig. 7 Comparison on histograms after grayscale processing using two weighted average methods. (a) Using conventional weights; (b) Using improved weighted average method

分割, 选择灰度直方图中最后一个明显波谷位置作为固定阈值, 由于实际应用时 RoI 灰度图像的直方图波峰波谷个数未必恒定, 实验中将每一个波谷位置设置为阈值, 依次滤除。

图 8(a) 和 8(b) 分别为某张 RoI 图像的原图与经过优化权重转换而成的灰度图像, 图 8(c) 和 8(d) 分别是使用迭代法和 Otsu 法进行分割后得到的图像, 由于 RoI 图像背景较为复杂, 全局阈值分割并不能很好地提取出光斑, 而采用基于灰度直方图的阈值分割方式得到的图像如图 8(e) 所示, 容易看到, 单个光斑以及两个信标光斑都能够较好地提取出来, 阈值分割的效果较好。

3 实验结果

3.1 实验设备及图像数据采集

本研究实验设备采用操作系统为 Windows 11, 处理器为 Intel Core i7-12700H 2.30 GHz, 内存 16 G 的便携式笔记本电脑。

在建立激光无线电能传输对准系统的数据集时, 首先采用 Python+OpenCV 对摄像头进行实时调用, 视频帧率为 30, 按照每 5 帧截取 1 帧的方式抽帧截取图片, 控制变量为相对位置 (包括距离 1.5~4 m、水平方位、俯仰角等)、室内灯光明暗程度、遮挡, 总

计形成 1573 张图片。图片标签为感兴趣区域 (RoI) 一项, 使用 LabelImg 工具对图像中预设 RoI (黑色挡光板区域) 进行标记并制作 VOC 格式数据集。

3.2 实验一: 光学感兴趣区域提取实验

本实验采用的深度学习框架为 Tensorflow1.11.0+Keras2.1.5, 开发语言为 Python3.6。算法训练时优化器为随机梯度下降, 训练时动态调整学习率, 训练总共进行 100 个世代 (max epoch=100), 设置 batch size 为 16, 每个世代的 step=79。用验证集的 loss 曲线和 RoI AP 曲线评估模型训练的效果, 三种模型的训练集 loss 曲线如图 9(a) 所示, 验证集 loss 曲线如图 9(b) 所示, 三种模型验证集 RoI AP 曲线如图 9(c) 所示。

由图 9(a) 和图 9(b) 可以看出, 在 100 个 epoch 时, 三种模型针对训练集、验证集的 loss 曲线基本收敛, 此时的模型可视作有效。由图 9(c) 可以看出, 三种模型在 100 个 epoch 时 RoI 区域的 AP 值都为 1, 这是因为在本研究中, 分类目标仅有 RoI 区域一种; 此外, 放大 RoI 区域前 20 个 epoch 的 AP 值, 可以看出, 改进后的 MobileNet-SSD 模型 AP 值到 1 的速度更快。

不同网络模型性能比较如表 1 所示, 其中 FPS 为对目标进行实时检测时的帧率, Size 表示模型的大小, Time 表示训练 100 个 epoch 所耗费的时长。图 10 为



图 8 使用不同阈值处理方式得到的图像。(a) 原图像; (b) 灰度图像; (c) 迭代法; (d) Otsu 法; (e) 基于灰度直方图的阈值分割法, 最终阈值为 133

Fig. 8 Images obtained using different threshold processing methods. (a) Original Image; (b) Grayscale image; (c) Using iterative method; (d) Using Otsu method; (e) Using proposed method with the threshold is 133

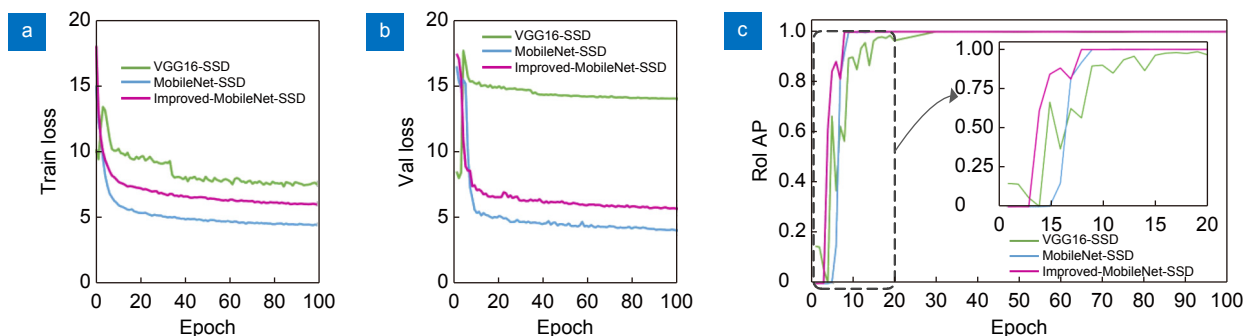


图 9 训练时评估曲线。(a) 训练集 loss 曲线; (b) 验证集 loss 曲线; (c) 验证集 RoI AP 曲线

Fig. 9 The evaluated curve during training. (a) Training set loss curves; (b) Validation set loss curves; (c) Validation set RoI AP curves

表 1 不同网络模型性能比较

Table 1 Performance comparison of different network models

Net	FPS	Size/MB	Time/h	Err _x /%	Err _y /%
VGG16-SSD	4.68	90.7	30.0	17.5	28.1
MobileNet-SSD	18.92	24.0	7.5	13.6	3.1
Improved-MobileNet-SSD	18.50	43.1	8.5	0.3	0

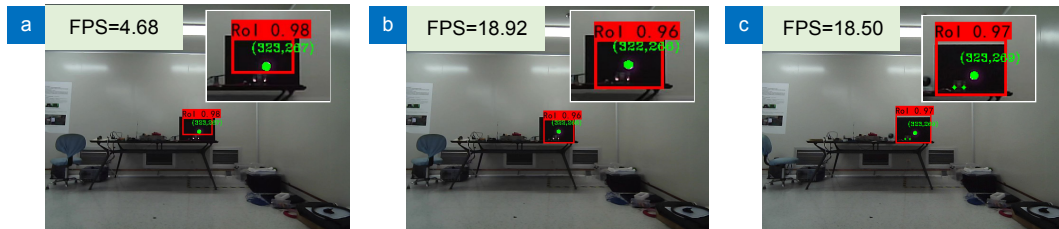


图 10 使用不同网络模型预测结果。(a) VGG16-SSD; (b) MobileNet-SSD; (c) 改进的 MobileNet-SSD

Fig. 10 Predict results of different network models. (a) VGG16-SSD; (b) MobileNet-SSD; (c) Improved MobileNet-SSD

直接调用摄像头对图像进行实时处理的效果对比图, 本实验中预期的感兴趣区域为黑色挡光板区域, 在数据集中, 通过人为标定的方法进行划分。在实时检测过程中, 需要保证该挡光板尽可能完整地处于感兴趣区域内, 避免光斑丢失, 此外, 检测 RoI 越趋近于预期区域时, 效果越好。为量化对比三种算法在实时检测中的效果, 定义 Err_x 和 Err_y 作为评价指标, 分别表示检测得到的 RoI 在水平方向和竖直方向上与实际目标区域的偏差。

分析表格中数据, 得出如下结论: 1) 改进的 SSD 方法相较于传统 VGG16 模型和 MobilNet 模型, 检测目标区域偏差显著减小, RoI 能够完整覆盖目标区域; 2) 相较于 VGG16-SSD, 训练速度提升了 71.67%, 模型大小减小了 52.48%, 在实时检测时速度提升了 295.30%; 3) 相较于 MobileNet-SSD, 由于本方法额外引入了注意力机制与特征层融合, 导致本方法训练速度下降了 13.33%, 模型大小增加了 79.58%, 实时检测速度下降了 1.69%, 但是对准偏差显著减小, 以牺牲部分检测速度的代价确保 RoI 的准确提取。

实验结果表明, 改进的 MobileNet-SSD 模型相较于 VGG16-SSD 模型在速度、精度方面有明显提升; 相较于 MobileNet-SSD 模型, 尽管在速度上有一些损失, 但是在精度以及实际应用效果 (检测出的 RoI 范围) 上更有优势。总体上而言, 所提出的改进 SSD 网络的感兴趣区域提取方法在检测精度上具有优越性, 并且具有较高的检测速度。

3.3 实验二: 基于自适应 RoI 提取的光斑中心点定位实验

为直观体现对准系统效果, 将训练完成的改进 MobileNet-SSD 模型部署在激光对准实验平台中, 针对自适应 RoI 进行图像预处理并对激光光斑与两个信标光斑进行中心点定位, 计算云台方位角和俯仰角并驱动激光光斑对准光伏阵列。

实验在室内激光无线电能传输系统下进行, 无线电能传输距离为 360 cm, 实验装置如图 11 所示。由于 808 nm 半导体激光器与砷化镓光伏电池的组具有更优的光电效率特性, 因此实验中激光光束的波长为 808 nm; 此外, 两个信标 LED 选择 630 nm 波长的红色光, 其波长长, 穿透空气的能力强, 相较于其他颜色在图像中成像更为明显。

实验中通过上位机给舵机发送角度控制量, 舵机向云台发送控制信号进而控制云台运动, 而云台运动的时间为人为设定, 设定时间为 100 ms; 图像处理 FPS 约为 18 (每秒处理 18 帧), 能够实现非常快速的对准, 某次对准前后对比如图 12 所示。其中, 图 12(a) 为对准前图像, 在数字图像坐标系中, 检测到的两个信标光坐标为 (312.66, 281.33) 和 (323.00, 281.00), 激光光斑中心点位置为 (324.50, 262.00), 计算得到的光伏阵列中心点坐标为 (317.92, 280.24), 驱动透镜对准光伏阵列中心后读取到的图像如图 12(b) 所示, 成像中检测得到的光斑中心点为 (319.35, 278.97), 对准误差大约为 0.45% (检测得到的光斑中心点相较于光伏阵列中心点误差), 在实际

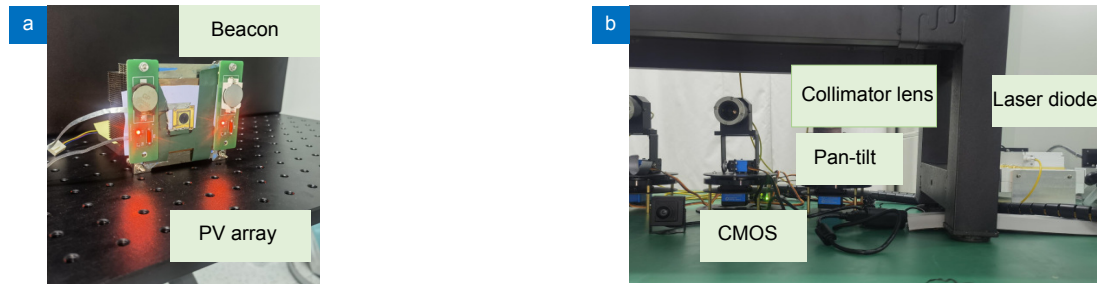


图 11 实验装置图

Fig. 11 Experimental device diagram

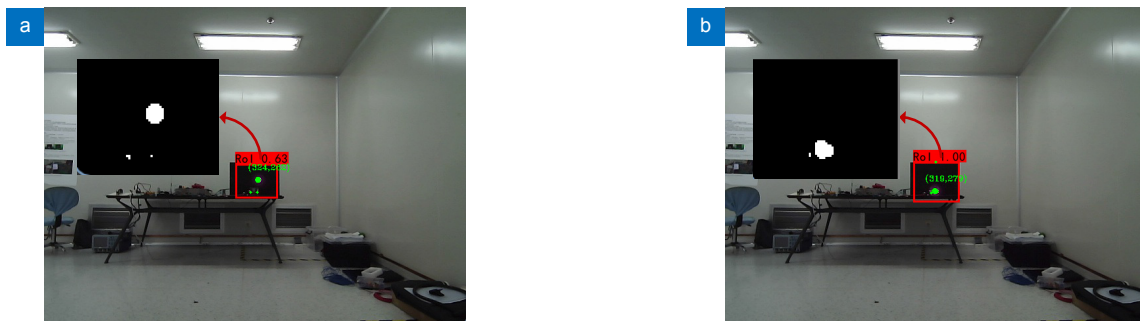


图 12 对准前后对比图。(a) 对准前光斑中心点坐标 (324.5, 262.0); (b) 对准后光斑中心点坐标 (319.35, 278.97)

Fig. 12 Comparison before and after alignment. (a) Coordinate of center point of light spot before alignment is (324.5262.0); (b) Coordinate of the center point of the light spot after alignment is (319.35278.97)

检测过程中, 对准精度能够稳定在 95% 以上, 造成误差的原因主要在于云台存在齿轮虚位及机械松动等非线性因素。

为进一步提高对准精度, 减少对对准误差, 提高光电转换效率, 可以引入光伏侧输出功率与云台位置的闭环控制算法, 通过对光伏侧输出功率最大值的跟踪, 寻找激光光斑与光伏阵列最优对准位置, 实现精确对准。此外, 针对更远距离的激光无线供电的应用场景, 如百米级的无人机供电、千米级及以上的卫星供电, 通过采用焦距可调的图像传感器, 适配目标与画幅大小, 确保成像清晰, 即可将本方案进一步拓展。

4 结 论

本文针对激光无线电能传输系统中激光对准问题进行探讨研究, 设计了一种激光对准系统, 并对系统中感兴趣区域提取环节及图像预处理环节进行了优化改进, 通过理论分析与实验对方法进行了验证。实验结果表明: 1) 通过引入 MobileNet 网络、引入空间注意力机制、融合特征层的方式改进 SSD 网络, 相较于原模型, 训练速度提升了 71.67%, 模型大小减小了 52.48%, 在实时检测时速度提升了 295.30%, 检测

误差显著减小; 2) 根据红外激光光斑数字图像的 RGB 颜色空间特性, 使用优化权值对三通道数据进行加权, 基于灰度处理后的直方图求解灰度图像的分割阈值, 能够有效分离目标光斑与背景; 3) 激光对准系统对准后光斑中心点像素位置的最优精度能够达到 99.55%, 图像处理算法精度、速度能够满足激光传能应用需求。

对于激光对准系统目标及应用需求, 下一步的研究重点包括: 1) 针对多光斑对准问题进行进一步研究; 2) 引入位置对光伏输出功率的闭环控制, 根据光伏阵列功率对位置进行调节, 进一步提高对准精度, 实现光斑与光伏阵列的最优匹配, 减少功率损失, 提升传输效率。

参考文献

- [1] Cheng S J, Chen X L, Wang J H, et al. Key technologies and applications of wireless power transmission[J]. *Trans China Electrotech Soc*, 2015, 30(19): 68-84.
程时杰, 陈小良, 王军华, 等. 无线输电关键技术及其应用[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(19): 68-84.
- [2] Fan X M, Mo X Y, Zhang X. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. *Proc CSEE*, 2015, 35(10): 2584-2600.
范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J].

- 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2584–2600.
- [3] Shi Z L, Meng W W, Shen J S, et al. Tracking design of APT system of laser wireless energy transmission for unmanned aerial vehicle[J]. *Laser Technol*, 2019, 43(6): 809–814.
时振磊, 孟文文, 申景诗, 等. 无人机激光无线能量传输APT系统跟踪设计[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 809–814.
- [4] Liang J Y, Chen R D, Yao H F, et al. Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(8): 210439.
梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 等. 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展[J]. *光电工程*, 2022, 49(8): 210439.
- [5] Zhao X, Song Y S, Tong S F, et al. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. *Chin J Lasers*, 2014, 41(10): 0305005.
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 0305005.
- [6] Cheng K, Dong H, Cai Z R, et al. Scheme design of high efficiency long distance laser power transmission[J]. *Spacecr Eng*, 2015, 24(1): 8–12.
程坤, 董昊, 蔡卓燃, 等. 高效率远距离激光无线能量传输方案设计[J]. *航天器工程*, 2015, 24(1): 8–12.
- [7] Li Z P, Zhang Y G, Ai Y, et al. Laser tracking and wireless power supply system for unmanned aerial vehicles[J]. *Laser Technol*, 2018, 42(3): 306–310.
李志鹏, 张燕革, 艾勇, 等. 无人机激光跟踪与无线供电系统[J]. *激光技术*, 2018, 42(3): 306–310.
- [8] Zhang G, Dong D X, Yang Y N. Design and implementation of a laser tracking, aiming and charging system for micro-unmanned aerial vehicle[J]. *Laser Technol*, 2022, 46(2): 169–174.
张港, 董大兴, 杨雁南. 激光对微型无人机跟瞄充电系统的设计与实现[J]. *激光技术*, 2022, 46(2): 169–174.
- [9] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, USA, 2014: 580–587. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81>.
- [10] Girshick R. Fast R-CNN[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile, 2015: 1440–1448. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169>.
- [11] Ren S Q, He K M, Girshick R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2017, 39(6): 1137–1149.
- [12] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, USA, 2016: 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>.
- [13] Liu W, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: single shot MultiBox detector[C]//Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision, Amsterdam, The Netherlands, 2016: 21–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2.
- [14] Howard A G, Zhu M L, Chen B, et al. MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[Z]. arXiv: 1704.04861, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>.
- [15] Hu J, Shen L, Albanie S, et al. Squeeze-and-excitation networks[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2020, 42(8): 2011–2023.
- [16] Woo S, Park J, Lee J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_1.
- [17] Lin T Y, Dollár P, Girshick R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, USA, 2017: 936–944. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.106>.
- [18] Liu Z R, Wang Z Q, Liu S J, et al. Research of PreciseLaser spot center location algorithm[J]. *Comput Simul*, 2011, 28(5): 399–401,409.
刘兆蓉, 王志乾, 刘绍锦, 等. 激光光斑中心精确定位算法研究[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(5): 399–401,409.
- [19] He J K, Huang L Y, Yang D Z, et al. Adaptive detection for near-far field laser spot energy center[J]. *Laser Infrared*, 2022, 52(4): 620–624.
何佳凯, 黄来玉, 杨德振, 等. 远近场自适应激光光斑能量中心检测[J]. *激光与红外*, 2022, 52(4): 620–624.

作者简介



康劲松(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事载运工具电气化及智能化、新能源利用及控制、激光无线电能传输技术等的研究。

E-mail: kjs@tongji.edu.cn



【通信作者】周艳萍(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光无线电能传输、图像处理、机器学习方面的研究。

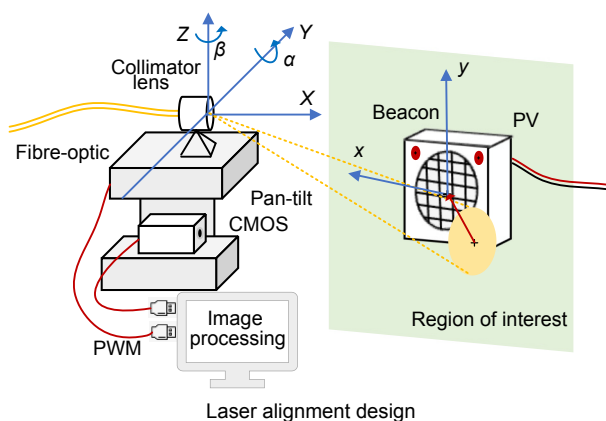
E-mail: zhouyanp@tongji.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Design of alignment subsystem for laser wireless power transmission system

Kang Jinsong^{1,2}, Zhou Yanping^{3*}, Sun Liangrong³, Kong Fanwei⁴, Lv Yanting⁴



Overview: Laser alignment is a prerequisite for stable energy acquisition at the receiver end in laser-based wireless power transmission systems. A laser alignment system requires high accuracy, stability, and real-time performance. Therefore, an overall design method for laser alignment systems is proposed: Firstly, the image of the plane where the photovoltaic array is located is captured by the camera. Secondly, the improved SSD (single shot multi-Box detector) network which has been trained is used to predict the region of interest containing laser spots and two beacon spots. Then, preprocessing the image which contains grayscale processing, threshold segmentation, filtering and denoising, and using ellipse fitting and centroid method to locate the center points of the laser spot and beacon spots. Finally, position control signals are output to the pan-tilt after coordinate conversion calculation, and the pan-tilt is driven to align the light spot with the photovoltaic array.

Image processing is the key to system design. Thus, the optimization and improvement are made for the adaptive extraction of the region of interest and image processing in system design. On the one hand, the SSD model is improved by introducing MobileNet, spatial attention mechanism, and semantic fusion. The improved neural network model is used to train and achieve adaptive prediction of regions of interest. The improved model proposed in this paper has a training speed increase of 71.67%, a model size reduction of 52.48%, and a real-time detection speed increase of 295.30% compared to the original model. On the other hand, based on the characteristics of the laser spot, the weight values in the process of converting color images to grayscale images are optimized. With the optimized grayscale processing method, the peaks and valleys of the grayscale histogram are more pronounced, based on which, adaptive selection of the threshold in the threshold segmentation stage is achieved. When processing images, optimizing the grayscale processing of three channel weights and adaptive threshold segmentation can effectively extract light spots and reduce the error of light spot positioning. The experimental results show that the improved laser alignment system has a stable accuracy of over 95% with the best accuracy has reached 99.55%, which can meet the requirements of accuracy, speed, and stability in engineering practice.

Kang J S, Zhou Y P, Sun L R, et al. Design of alignment subsystem for laser wireless power transmission system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230109; DOI: [10.12086/oe.2023.230109](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230109)

¹Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; ²Key Laboratory of Maglev Technology in Railway Industry, Tongji University, Shanghai 201804, China; ³College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; ⁴Shanghai Aerospace Electronics Co., Ltd., Shanghai 201821, China

* E-mail: zhouyanp@tongji.edu.cn