

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260052.

专题:面向6G的无线光通信

刘嘉树,刘远博,朱秉诚. 基于视觉和光电二极管的跟瞄方法对比[J]. 光通信研究, 2026(3):20-27.

Liu J S, Liu Y B, Zhu B C. Comparison of Vision-based and Photodiode-based Laser Tracking and Pointing Methods[J]. Study on Optical Communications, 2026(3):20-27.

## 基于视觉和光电二极管的跟瞄方法对比(特邀)

刘嘉树<sup>1,2</sup>,刘远博<sup>1,2</sup>,朱秉诚<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学信息科学与工程学院,南京 210000; 2. 紫金山实验室,南京 211111)

**摘要:**【目的】现有的自由空间光通信系统普遍基于相机或光电二极管(PD),但对于这两类传感器的定量建模研究和联合讨论较少,且对于高动态场景下这两种传感器在响应速度与跟踪精度的具体差异研究不足,也缺乏基于实验数据的量化对比。【方法】基于这些问题,文章首先建立了相机的激光光斑采样模型和光电探测器光强分布与光斑位置信息的映射模型。随后,分别设计了适用于相机和4象限光电探测器(QPD)的跟瞄算法,并设计了一种由中心QPD与外围8个PD组成的复合光电探测器以解决PD装置视场受限的问题。最后,基于跟瞄算法生成的控制信号,搭建了针对高动态场景的硬件实验平台并进行了跟瞄实验。【结果】实验结果表明:相机跟瞄系统能够捕获约 $10^\circ$ 范围内的目标,对于初始偏差约为 $3^\circ$ 的目标收敛时间约为10s,具备大视场广覆盖能力;而复合光电探测器能捕获约 $2^\circ$ 范围内光斑,对于初始偏差约为 $1^\circ$ 的目标收敛时间约为1s,展现出高速率的优势。【结论】研究从理论和实验两方面证实了相机跟瞄系统与PD跟瞄系统的互补特性,说明了视觉粗捕获与光电精跟踪在实际工程中的必要性,为构建高鲁棒性的空地光链路提供了理论基础和实验数据。

**关键词:** 自由空间光通信;光跟瞄;视觉伺服;光电定位;比例-积分-微分控制

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A

## Comparison of Vision-based and Photodiode-based Laser Tracking and Pointing Methods

LIU Jiashu<sup>1,2</sup>, LIU Yuanbo<sup>1,2</sup>, ZHU Bingcheng<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China;  
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

**Abstract:** 【Objective】 Existing Free-Space Optical (FSO) communication systems predominantly rely on either cameras or Photodiode (PD). However, there is a scarcity of quantitative modeling and comparative analysis regarding these two mechanisms. Specifically, the differences in response speed and tracking accuracy under high-dynamic scenarios remain underexplored. Moreover, there is also a lack of quantitative comparisons based on experimental data. 【Methods】 To address these issues, this paper first establishes a laser spot sampling model for the camera and a mapping model correlating light intensity distribution with spot position for the photodetector. Subsequently, tracking and pointing algorithms tailored for both the camera and the Quadrant Photodiode (QPD) are developed. Furthermore, a hybrid photodetector architecture, comprising a central QPD surrounded by an array of eight peripheral PD, is designed to overcome the limited Field of View inherent to traditional PD devices. Finally, a hardware experimental platform simulating high-dynamic scenarios is constructed to conduct closed-loop tracking experiments based on the signals generated by the proposed algorithms. 【Results】 Experimental results demonstrate that the camera-based system achieves a capture range of approximately  $10^\circ$ , with a convergence time of about 10 s for an initial deviation of  $3^\circ$ , exhibiting superior wide-area coverage capabilities. In contrast, the hybrid photodetector system captures spots within a  $2^\circ$  range and achieves convergence in approximately 1 s for a  $1^\circ$  initial deviation, highlighting its advantage in high-speed response. 【Conclusion】 These findings conclusively validate the complementary nature of camera-based and PD-based tracking systems from both theoretical and experimental perspectives, underscoring the necessity of integrating visual coarse acquisition with photoelectric fine tracking in practical engineering. This work provides a rigorous theoretical basis and experimental data for constructing robust air-ground optical links.

**Key words:** FSO communication; optical acquisition; pointing and tracking; visual servoing; photoelectric positioning; proportional-integral-derivative control

## 0 引言

自由空间光(Free-Space Optical, FSO)通信相

比于传统无线电而言,其传输带宽更高<sup>[1]</sup>、空域资源利用率更高<sup>[2]</sup>,且信息安全性更好<sup>[3]</sup>。在建设面向第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Net-

收稿日期:2026-02-14; 修回日期:2026-04-09; 纸质出版日期:2026-06-10

基金项目:科技部重点研发计划资助项目(2023YFB3609804)

作者简介:刘嘉树(2004-),男,河北邢台人。硕士,主要研究方向为新型光通信器件。

通信作者:朱秉诚,副教授。E-mail:zbc@seu.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

works, 6G)的空天地一体化网络时<sup>[4]</sup>, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)对于实现全球覆盖十分关键<sup>[5]</sup>。FSO 技术能解决频谱资源短缺等问题, 不仅传输速率快, 还天然不受电磁干扰影响, 已成为应对 UAV 高通量通信难点的重要手段<sup>[6]</sup>。但 FSO 系统对平台高频振动极度敏感, 微小的指向偏差即可导致链路中断<sup>[7-8]</sup>。

当下有关 FSO 跟瞄机制的研究主要集中在视觉跟瞄、光电跟瞄及多级复合跟瞄 3 个方向。在视觉跟瞄方向, 文献[9]利用核相关滤波算法达成了 UAV 对移动目标的稳定跟踪; 文献[10]采用卡尔曼滤波来补偿视觉采样时滞。但上述视觉跟瞄方案会受到图像采样帧率与图像处理耗时的限制, 难以有效地补偿高频机械微振动。在光电跟瞄方向, 文献[11]建立了 4 象限光电探测器(Quadrant Photodiode, QPD)映射模型来实现高精度锁定; 文献[12]证明了基于 QPD 的实时补偿能改善 UAV FSO 链路的可靠性。但光电系统视场较窄, 如果光束大幅偏移并脱离光敏面, 系统就会因丢失位置信号而失效。在复合跟瞄方向, 文献[13]归纳了相机粗捕获和光电二极管(Photodiode, PD)精跟踪的经典分级框架; 文献[14]在“CLICK”立方星激光通信任务当中验证了“信标相机加 QPD”的分级策略。但当下的研究部分只是对通用框架展开理论梳理, 缺乏在同一物理平台上对视觉与光电系统性能的量化对比。

综上所述, 当前研究大多侧重单一系统的独立优化, 缺乏在同一物理环境下对视觉跟瞄系统与光电跟瞄系统动态响应特性的定量对比研究。且针对单一 QPD 装置容易丢失目标这一问题, 目前有效的硬件级重捕获解决方案研究较为匮乏。

针对以上难题, 本文构建了包含视觉感知与光电探测的 FSO 跟瞄系统建模及实验验证框架。本文首先建立了互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)图像传感器采样模型及光电探测器光强分布映射模型, 并针对传统 QPD 视场受限的问题<sup>[15]</sup>, 设计了由中心 QPD 与外围 8 个 PD 组成的复合光电探测器结构。在此基础上, 本文分别设计了适用于相机和光电探测器的静态跟瞄算法, 以及基于比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制的动态跟瞄算法。本文还通过搭建高动态场景下的硬件实验平台, 量化对比了视觉与复合光电跟瞄系统在视场角范围与响应速度上的具体差异。

## 1 系统模型

### 1.1 CMOS 图像传感器模型

如图 1 所示, CMOS 图像传感器经由像素阵列将入射光场转变为数字图像, 这适用于初始捕获阶段。假设目标光斑中心位于  $(x_c, y_c)$ , 其强度分布可近似为二维高斯函数。

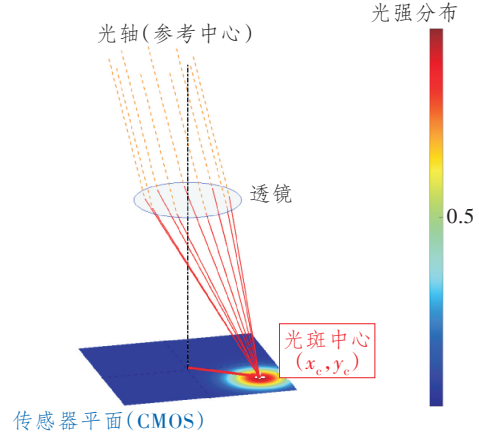


图 1 CMOS 传感器模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of the CMOS sensor

坐标为第  $i$  行第  $j$  列的像素, 其模拟信号电压  $V_{i,j}$  为该像素点的光强  $s_{i,j}$  与加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)  $n_{i,j}$  的叠加, 即  $V_{i,j} = s_{i,j} + n_{i,j}$ 。其中噪声  $n_{i,j}$  主要包含由光子到达随机性引发的散粒噪声和由暗电流产生的热噪声, 是均值为零、方差为  $\sigma_n^2$  的高斯随机变量。经过采样的含噪数字图像矩阵  $V_{i,j}$  将作为后续质心估计算法的输入数据。

### 1.2 QPD 传感器模型

QPD 具有较高的响应速度与位置灵敏度, 是实现高频精跟踪控制的关键传感器<sup>[16]</sup>。假设入射到 QPD 表面的光斑强度分布为  $I(x, y)$ , 其符合各向同性的二维高斯分布, 光斑中心位于  $(\mu_x, \mu_y)$ , 标准差为  $\sigma_s$ , 则  $I(x, y)$  可表示为

$$I(x, y) = \frac{P_r}{2\pi\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(x-\mu_x)^2 + (y-\mu_y)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad (1)$$

式中,  $P_r$  为从信道模型中获得的总接收光功率。第  $k$  个象限 ( $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ ) 产生的理想光电流  $i_k$  等于 PD 的响应度  $\mathcal{R}$  与该象限积分区域  $A_k$  上光强积分的乘积, 即

$$i_k = \mathcal{R} \iint_{A_k} I(x, y) dx dy. \quad (2)$$

其中, 假设 QPD 中心位于坐标原点,  $x$  和  $y$  分

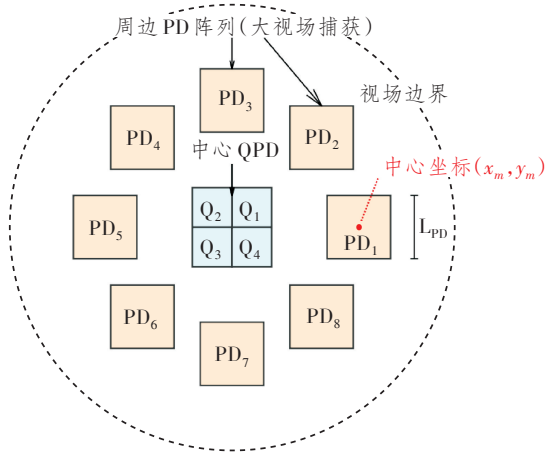
别为 QPD 光敏表面上的水平空间物理坐标和垂直空间物理坐标,4 个象限积分区域  $A_k$  定义如下:

$$\begin{cases} A_1 = \{(x, y) | x \geq 0, y \geq 0\} \\ A_2 = \{(x, y) | x < 0, y \geq 0\} \\ A_3 = \{(x, y) | x < 0, y < 0\} \\ A_4 = \{(x, y) | x \geq 0, y < 0\} \end{cases}$$

考虑到 AWGN 干扰的存在,实际测量得到的电流  $\hat{i}_k$  为  $i_k$  叠加独立同分布的噪声项  $n_k$ ,即  $\hat{i}_k = i_k + n_k$ ,式中  $n_k$  为符合均值为零、方差为  $\sigma_n^2$  的高斯分布。传感器输出的最终结果包含噪声的象限电流向量,记为  $\hat{i} = [\hat{i}_1, \hat{i}_2, \hat{i}_3, \hat{i}_4]^T$ ,该向量会作为后续光斑位置估计算法的输入。

### 1.3 复合 QPD+PD 传感器模型

当光束入射角较小时,光斑会落在 QPD 范围内,但入射角较大时光斑会移出 QPD 范围导致目标丢失。为解决视场受限问题,本研究设计了包含中心 QPD 和周边  $M$  个分立 PD 的复合结构来扩大视场,如图 2 所示。在几何尺寸与布局方面,中心 QPD 的直径设计为 10 mm,外围阵列由 8 个分立 PD 组成,每个正方形 PD 的边长  $L_{PD}$  约为 10 mm,均匀分布在以 QPD 几何中心为原点、直径为 30 mm 的圆周上。



注:  $(x_m, y_m)$  为第  $m$  个 PD 的中心坐标;  $Q_1 \sim Q_4$  为 QPD 的 4 个独立光敏区域。

图 2 复合光电探测器结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of the hybrid photodetector structure

复合 PD 系统的视场角指系统的全视场角,采用物理实验的方法进行测量与界定。在测量过程中,将平行光源置于距离接收透镜中心  $L$  (约 1 m) 处,使光束沿主光轴入射,随后通过云台使光源在垂

直于光轴的方向上产生偏移  $D$ 。随着  $D$  的增大,当外围 PD 输出的光电流信号衰减至阈值时,记录此时的最大偏移量  $D_{max}$ 。将系统的半视场角定义为  $\theta_{max} = \arctan(D_{max}/L)$ ,全视场角即为  $2\theta_{max}$ 。

第  $m$  个周边 PD 主要用于检测发生大角度偏移时的光斑。其产生的理想光电流  $j_m$  为

$$j_m = \mathcal{R} \iint_{A_m} I(x, y) dx dy, \quad (3)$$

式中,  $A_m$  为第  $m$  个周边 PD 的光敏区域,  $A_m = \{(x, y) | |x - x_m| \leq \frac{L_{PD}}{2}, |y - y_m| \leq \frac{L_{PD}}{2}\}$ 。

电路设计存在差异,放大器增益或器件特性也会有所区别,周边 PD 的噪声水平可能会不同于中心 QPD。因此第  $m$  个 PD 的测量电流  $\hat{j}_m$  叠加了噪声项  $n'_m$ ,即  $\hat{j}_m = j_m + n'_m$ ,式中  $n'_m$  符合均值为零、方差为  $\sigma_p^2$  的高斯分布。

当光斑中心  $(\mu_x, \mu_y)$  显著偏离原点时,中心 QPD 的 4 个象限无法接收到足够的光功率,这会造成精跟踪失效。在此情况下,系统将使用  $M$  个周边 PD 的测量电流向量  $\hat{j} = [\hat{j}_1, \dots, \hat{j}_M]^T$  来估计光斑的大致方向。然后,系统驱动云台将光斑重新移到 QPD 的有效工作区域,从而完成重捕获。

## 2 跟瞄算法

### 2.1 静态跟瞄算法

#### 2.1.1 基于 CMOS 的静态跟瞄算法

CMOS 传感器依靠数字图像处理技术完成目标定位,其核心是利用灰度加权质心算法计算光斑的位置。首先对前面提到的噪声图像矩阵进行阈值分割与轮廓提取,以此来识别目标区域  $\Omega$ 。目标区域  $\Omega$  是一个有界的离散像素集合,其中的像素索引  $(i, j)$  均为整数,光斑的质心坐标  $(\hat{x}_c, \hat{y}_c)$  可表示为

$$\begin{cases} \hat{x}_c = \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} V_{i,j} \cdot j}{\sum_{(i,j) \in \Omega} V_{i,j}} \\ \hat{y}_c = \frac{\sum_{(i,j) \in \Omega} V_{i,j} \cdot i}{\sum_{(i,j) \in \Omega} V_{i,j}} \end{cases} \quad (4)$$

获得光斑的质心坐标  $(\hat{x}_c, \hat{y}_c)$  之后,系统将其转化为控制指令来驱动执行机构。设 CMOS 传感器中心坐标为  $(x_0, y_0)$ ,计算目标光斑相对于视场中心

的像素位置偏差  $(e_x, e_y)$ , 可表示为

$$\begin{cases} e_x = \widehat{x}_c - x_0 \\ e_y = \widehat{y}_c - y_0 \end{cases} \quad (5)$$

将该像素偏差转换为控制系统的输入信号, 引入水平方向和垂直方向的比例增益系数  $K_{\text{CMOS}x}$  与  $K_{\text{CMOS}y}$ 。最终生成的控制信号  $(U_{\text{CMOS}x}, U_{\text{CMOS}y})$  代表相机系统输出到云台控制器的角速度指令, 可表示为

$$\begin{cases} U_{\text{CMOS}x} = -K_{\text{CMOS}x} \cdot e_x \\ U_{\text{CMOS}y} = -K_{\text{CMOS}y} \cdot e_y \end{cases} \quad (6)$$

式中, 负号表示负反馈控制机制, 该机制使得控制信号向缩减偏差的方向变化, 驱动执行机构调整光轴使光斑最终收敛至传感器中心  $(x_0, y_0)$ , 实现跟瞄。

### 2.1.2 基于 QPD 的静态跟瞄算法

QPD 传感器依靠其高频响应特性进行解算, 基于高斯光斑模型, 对误差函数进行逆变换, 可直接从 4 象限电流向量  $\hat{i}$  中推导出光斑中心  $(\widehat{\mu}_x, \widehat{\mu}_y)$ , 可表示为

$$\begin{cases} \widehat{\mu}_x = -\gamma_s \cdot Q^{-1} \left( \frac{\widehat{i}_1 + \widehat{i}_4}{\sum_{k=1}^4 \widehat{i}_k} \right) \\ \widehat{\mu}_y = -\gamma_s \cdot Q^{-1} \left( \frac{\widehat{i}_1 + \widehat{i}_2}{\sum_{k=1}^4 \widehat{i}_k} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\gamma_s$  为探测器表面上高斯光斑的半径;  $Q^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布右尾函数的逆函数。Q 函数  $Q(z)$  为标准正态分布概率密度函数在区间  $[z, +\infty)$  上的积分, 可表示为

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{\tau^2}{2}} d\tau, \quad (8)$$

式中:  $z$  为积分下限, 代表标准正态分布的自变量阈值;  $\tau$  为积分变量。

此方法利用高斯函数的解析特性, 由非线性映射建立了光电流比率与位置的精确关系。

得到光斑中心相对于 QPD 几何中心的位置偏差  $(\widehat{\mu}_x, \widehat{\mu}_y)$  后, 系统会生成对应的控制指令  $(U_{\text{QPD}x}, U_{\text{QPD}y})$ , 这代表 QPD 系统向云台控制器发出的角速度指令。设 QPD 的几何中心为  $(0, 0)$ , 则位置偏差为  $e_x = \widehat{\mu}_x$  和  $e_y = \widehat{\mu}_y$ 。为实现控制, 引入与系统结构相关的比例增益系数  $K_{\text{QPD}x}$  和  $K_{\text{QPD}y}$ , 最终输出给执行机构的控制信号  $(U_{\text{QPD}x}, U_{\text{QPD}y})$  可表示为

$$\begin{cases} U_{\text{QPD}x} = -K_{\text{QPD}x} \cdot \widehat{\mu}_x \\ U_{\text{QPD}y} = -K_{\text{QPD}y} \cdot \widehat{\mu}_y \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $K_{\text{QPD}x}$  和  $K_{\text{QPD}y}$  综合了探测器的光电响应度和执行机构的偏转灵敏度。该控制信号驱动云台进行反向偏转, 将光斑移回 QPD 的几何中心完成跟瞄。

### 2.1.3 基于复合 QPD+PD 传感器的静态跟瞄算法

在光斑脱离 QPD 有效区域的重捕获场景下, 若中心 QPD 总电流低于阈值, 则系统会使用周边  $M$  个 PD 进行粗跟踪。通过寻找响应最强 PD 来确定光斑的大致方位索引, 可表示为

$$m^* = \arg \max_{m \in \{1, \dots, M\}} (\widehat{j}_m), \quad (10)$$

式中,  $m^*$  为电流读数最大的 PD 的索引。确定主响应 PD 后, 系统会调用预先标定的几何位置参数, 获取第  $m^*$  个 PD 的几何中心坐标  $(x_m, y_m)$ , 该坐标代表着当前时刻光斑相对于 QPD 中心的粗略位置偏差。

为驱动云台将光斑从边缘区域拉回中心视场, 定义粗跟踪比例增益系数  $K_{\text{Com}x}$  与  $K_{\text{Com}y}$ 。最终输出给执行机构的粗跟踪控制信号  $(U_{\text{Com}x}, U_{\text{Com}y})$  可表示为

$$\begin{cases} U_{\text{Com}x} = -K_{\text{Com}x} \cdot x_m \\ U_{\text{Com}y} = -K_{\text{Com}y} \cdot y_m \end{cases} \quad (11)$$

式中, 控制信号  $(U_{\text{Com}x}, U_{\text{Com}y})$  为控制云台的角速度指令, 驱动执行机构向光斑偏移的反方向转动, 直到光斑重新落入中心 QPD 的光敏面区域内。当中心 QPD 检测到总光强超过阈值后, 系统将立即终止粗跟踪信号, 平滑切换回式(9)中的 QPD 跟瞄模式, 从而完成大视场捕获到高精度跟瞄的全过程。

### 2.2 基于 PID 控制的动态跟瞄算法

动态算法凭借历史误差序列来产生连续控制指令, 如此即可避免因控制信号大幅波动引起的振荡现象。本研究采用增量式 PID 控制算法, 以解决位置式算法存在的积分饱和问题并提高计算效率。

定义  $u_{\text{base}}(t)$  为  $t$  时刻由传感器模型计算出的基础控制信号, 视觉跟瞄系统中  $u_{\text{base}}(t) = U_{\text{CMOS}}(t)$ , 光电跟瞄系统中  $u_{\text{base}}(t) = U_{\text{QPD}}(t)$  或  $u_{\text{base}}(t) = U_{\text{Com}}(t)$ 。基于上述基础信号, 以  $x$  轴为例, 系统采用增量式 PID 算法生成最终驱动云台的动态控制指令  $\Delta U_x[n]$ , 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta U_x[n] = & K_p (u_{\text{base}}[n] - u_{\text{base}}[n-1]) + K_i T_s u_{\text{base}}[n] + \\ & \frac{K_d}{T_s} (u_{\text{base}}[n] - 2u_{\text{base}}[n-1] + u_{\text{base}}[n-2]), \end{aligned} \quad (12)$$

式中： $T_s$ 为采样周期； $u_{\text{base}}[n]$ 、 $u_{\text{base}}[n-1]$ 和 $u_{\text{base}}[n-2]$ 分别为当前、前一时刻和前两时刻的基础控制信号； $K_p$ 为比例系数； $K_i$ 为积分系数； $K_d$ 为微分系数。当前时刻的最终控制输出 $U_x[n]$ 通过将当前计算出的动态控制指令 $\Delta U_x[n]$ 累加到上一时刻的输出中获得，即 $U_x[n]=U_x[n-1]+\Delta U_x[n]$ 。

为了确保云台具备快速收敛与平稳锁定的能力，本系统采用试凑法对控制参数进行整定。首先关闭积分与微分环节，逐步增大比例系数 $K_p$ 直至系统响应出现等幅振荡现象，记录此时的临界增益；随后将 $K_p$ 回调至临界值的约60%，并逐渐引入积分系数 $K_i$ 以消除系统的稳态误差；最后微调微分系数 $K_d$ 增加系统阻尼，抑制瞬态超调并缩短调节时间。

基于上述整定方法，结合不同传感器硬件的实际采样频率，本文对两种跟瞄模式的控制参数分别进行了物理标定。在视觉跟瞄实验中，系统采样周期为 $T_{\text{sc}}=0.033\text{ s}$ ，整定后的参数为 $K_{\text{pc}}=20$ 、 $K_{\text{ic}}=1$ 和 $K_{\text{dc}}=1$ ；在复合光电跟瞄实验中，系统采样周期为 $T_{\text{spd}}=0.001\text{ s}$ ，整定后的参数为 $K_{\text{ppd}}=5$ 、 $K_{\text{ipd}}=0.2$ 和 $K_{\text{dpd}}=0.2$ 。动态跟瞄算法计算方位与俯仰控制指令，控制双轴云台实时快速补偿由平台动力学引起的指向误差，确保光斑稳定收敛于探测器中心。

### 3 仿真和实验结果

为评估 CMOS 跟瞄算法在复杂光照环境中的鲁棒性，本实验构建了 $640\times 480$ 像素的 CMOS 成像仿真模型。实验设定目标光斑位于图像左上区域 $(100.5, 100.5)$ ，并引入动态随机噪声 $(\sigma_n \in [0, 30])$ 以及背景噪声均值 $(\mu \in \{0, 10, 20\})$ ，经过量化和固定阈值处理后，通过500次蒙特卡罗实验来计算均方根跟瞄误差。

如图3所示，定位误差受随机噪声和背景偏置的共同影响。在低噪区 $(\sigma_n < 9)$ 系统可精准锁定目标，但误差随 $\sigma_n$ 增大呈非线性增长态势。而背景偏置 $\mu$ 影响着系统失效临界点：强背景下 $(\mu=20)$ 的跟踪误差在 $\sigma_n \approx 12$ 处就急剧上升；若无背景 $(\mu=0)$ ，系统则能维持更好的稳定性，直到 $\sigma_n > 18$ 才开始出现明显偏差。这种现象出现的物理原理是： $\sigma_n$ 越大，噪声波动会越剧烈，更多背景像素会超过阈值，造成错误的质心权重。而 $\mu$ 增大会使图像整体亮度逼近阈值，于是更小的 $\sigma_n$ 波动就能让大量背景像素越过阈值，使跟踪误差增大。

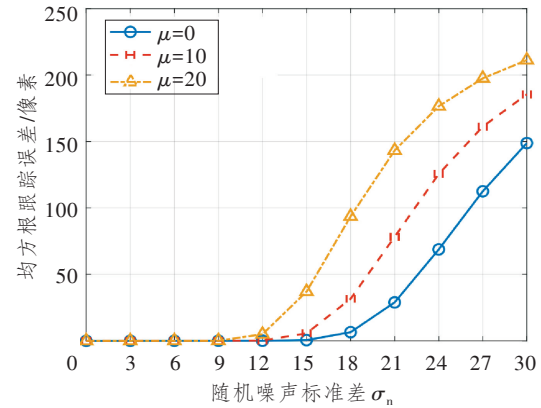


图3 CMOS跟瞄算法中随机噪声与背景偏置对定位精度的影响

Figure 3 Influence of random noise and background bias on positioning accuracy in CMOS tracking algorithm

为验证复合探测器在跟瞄任务中的有效性，本仿真构建了包含中心 QPD 与外围 PD 阵列的复合传感器模型，并设定高斯光斑半径 $\sigma_s=1.5\text{ mm}$ 以模拟目标从大视场偏差被引导至视轴中心的完整过程。

如图4所示，仿真结果清晰地展示了粗精跟瞄的两步式跟踪策略：当目标大角度偏离中心时，算法会激活外围 PD 进行粗跟踪，识别响应最强外围 PD 的几何中心实现初始捕获。在控制信号引导光斑进入中心区域后，系统会切换到 QPD 精跟踪模式，此时估计中心与真实光斑中心高度重合。这一过程体现出外围 PD 牺牲精度换取大视场捕获、中心 QPD 专注小视场高精度跟踪的互补优势，有效解决了单一 QPD 视场狭窄容易丢失目标的问题，提升了系统的鲁棒性。

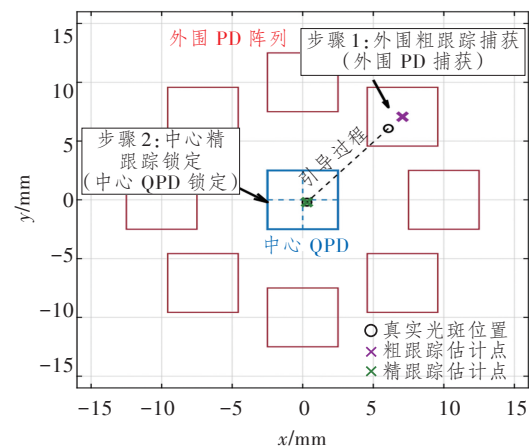


图4 复合光电探测器跟瞄过程

Figure 4 Tracking and pointing process of the hybrid photo-detector

为了验证控制算法的动态响应特性与快速捕获

能力,本实验在包含高斯白噪声( $\sigma=0.05^\circ$ )与环境漂移的仿真场景下,对比了比例控制器(P控制器)与PID控制器对目标俯仰角的跟踪性能。实验设定初始指向误差约为 $0.9^\circ$ ,重点评估系统消除初始偏差并实现稳定跟踪的收敛过程。

如图5所示,两种控制策略在瞬态响应阶段( $0\sim 0.6$ )s存在明显差别。P控制器表现出欠阻尼特征,出现了达 $-0.4^\circ$ 的大幅超调情况,之后经过了2~3个明显的振荡周期,直至 $t\approx 0.6$ s才进入稳态,这容易在捕获初期引发视轴晃动。而PID控制器的下冲幅度约为P控制器的一半( $\approx -0.2^\circ$ )且未出现反复震荡,在 $t\approx 0.25$ s时即已稳定在零误差带附近,其调节时间缩短了约60%。此现象表明PID控制算法中的微分环节可通过抑制误差的变化率引入系统阻尼,从而有效抵消了电机惯性带来的动态超调。实验表明该PID算法比传统P控制具备更快的收敛速度和更强的稳定性,可在高动态场景下缩短目标捕获所需的时间。

为在物理环境中进一步验证跟瞄算法并量化传

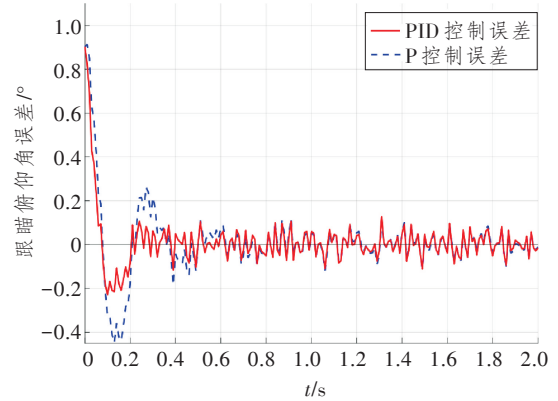


图5 高动态场景下PID控制与P控制俯仰角跟瞄误差性能对比

Figure 5 Performance comparison of pitch tracking error between PID and P control in high dynamic scenarios

感器性能差异,本文搭建了地面硬件测试平台。采用定制3轴云台作为执行单元,分别对基于CMOS的视觉跟瞄系统与基于PD的光电跟踪系统进行了性能测试,核心硬件设备参数与实验条件如表1所示。

表1 实验平台关键设备参数表

Table 1 Key equipment parameters of the experimental platform

设备/模块	参数名称	具体参数
激光器波长与功率	信标光器件	OSRAM GW CS8PM1. PM
	中心波长/nm	600
	功率/W	约3
执行机构	云台型号	定制3轴云台
	云台精度/ $^\circ$	0.02
视觉传感器	CMOS型号	AR0234
	工作帧率/FPS	约30
光电探测器	QPD型号	Vishay K857PE
	PD型号	Vishay BPW34
实验环境	日光灯光通量/lux	1820

注:FPS为帧率单位每秒帧数。

在基于CMOS的视觉跟瞄硬件实验中,目标距离云台约4m,系统会实时提取跟踪像素偏差来作为PID控制器的误差输入。如图6所示,初始时系统在 $x$ 和 $y$ 轴上均存在约90像素(偏移角度约 $3^\circ$ )的显著偏差,开启跟踪模式后误差大幅缩减。经5s的短暂超调与震荡后,系统在约 $t=10$ s时达到稳态,跟踪误差收敛至 $\pm 3$ 像素范围内。稳态下观测到的残留高频抖动主要源于电机机械回差与微振动,而非算法失稳,该结果验证了视觉跟瞄系统在大偏差跟踪场景下的鲁棒性。

本文设计的复合光电探测器结构如图7所示,位于中心的QPD负责精跟踪锁定,环绕分布的外围PD阵列负责粗跟踪引导。

在此硬件基础上,本文重点评估了系统在多次人为制造偏差下的动态跟踪性能。如图8所示,在不同时刻施加突然的扰动(偏移角度约 $1^\circ$ ),实验结果表明,该复合跟踪系统具备动态鲁棒性:每当出现偏差后,控制算法均能驱动视轴在约1s内快速消除误差并回归锁定状态,将归一化跟踪误差重新收敛至零,且恢复过程平滑、无持续震荡,此结果充分

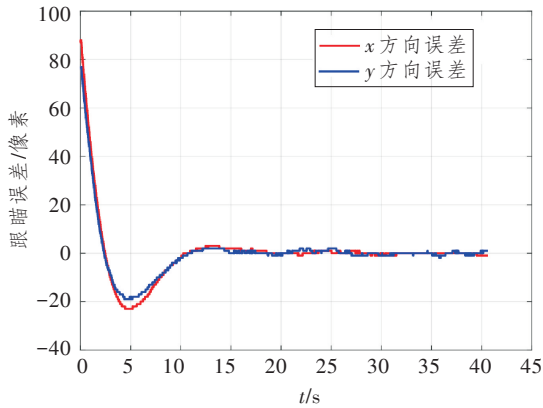


图6 相机系统跟踪误差随时间的变化  
Figure 6 Tracking error of the camera system over time variation

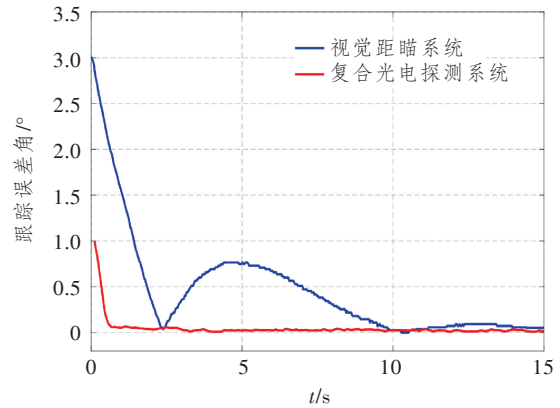


图9 两种系统跟踪动态响应对比  
Figure 9 Comparison of dynamic tracking responses between the two systems

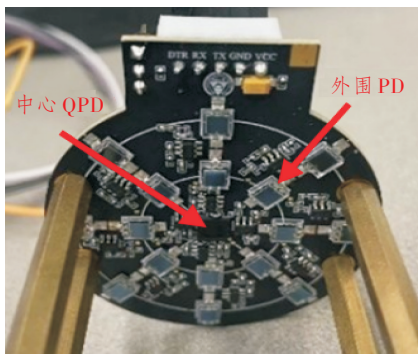


图7 复合光电探测器结构  
Figure 7 Structure of the hybrid photodetector

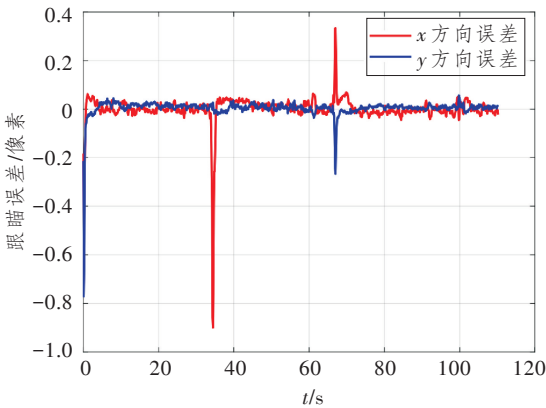


图8 PD系统跟踪误差随时间的变化  
Figure 8 Tracking error of the PD system over time variation

验证了基于该复合结构的探测系统在复杂干扰环境下的跟瞄性能。

为了在同一基准下直观量化并对比这两种跟瞄系统的性能差异,本文将上述独立实验中的位置偏差转化为统一的跟踪误差角,绘制了两种系统在应对初始视场偏差时的动态响应对比图,如图9所示。

由图可知两种系统彼此存在互补的优势。基于CMOS的视觉系统虽然受限于图像处理帧率与传

输延迟,导致收敛时间较长(约10s),但实验证实了其在面对显著初始偏差(约3°)时依然具备可靠的捕获能力,适用于大视场范围内的粗对准。而基于复合结构的光电探测系统则展现了优秀的动态响应特性,凭借高频模拟反馈,系统在突发扰动1°的情况下实现了秒级(≈1s)的快速重捕获与极低的稳态误差。上述软硬件实验结果有力地支持了第2节提出的多模态融合策略,不仅证实了相机跟瞄系统与PD跟瞄系统之间的互补特性,更阐明了将视觉粗捕获与光电精跟踪相结合在实际工程应用中的必要性。

#### 4 结束语

本文构建了涵盖CMOS图像传感器、QPD传感器及QPD+PD复合传感器的综合系统模型。在此基础上,分别设计了适用于上述3种传感器的跟瞄算法,并提出了高动态场景下的PID动态控制策略。数值仿真结果表明,该控制系统能有效抑制动态响应过程中的超调问题,在PID控制下实现了0.2s内的快速收敛与稳态锁定。

通过搭建地面实验平台,本文量化对比了视觉与光电跟瞄系统在高动态场景下的性能差异:视觉跟瞄系统能够捕获约10°范围内的目标,在约3°初始大偏差下的收敛时间约10s,适用于大范围引导;而复合光电探测器能捕获约2°范围内光斑,在约1°突发扰动下的重捕获时间约1s,展现出了高速率优势。实验数据有力证实了视觉粗捕获与光电精跟踪的互补优势,说明了二者在实际工程中的必要性。

基于上述互补特性,在实际的FSO通信工程应用中,建议采用“视觉粗捕获加光电精跟踪”的两

级复合架构。该架构能兼顾大视场捕获与高速精准锁定,是构建高鲁棒性空地光链路的有效方案。未来计划将该复合跟瞄架构搭载于真实 UAV 平台,开展室外空地高动态挂飞测试;同时,考虑在控制算法中引入自适应滤波机制,以进一步克服室外复杂大气湍流效应对光斑形态与定位精度的干扰。

#### 参考文献:

- [1] 柳海楠, 邵宇丰, 王安蓉, 等. FSO通信系统中机器学习算法的研究进展[J]. 光通信研究, 2025(2): 240040.  
Liu H N, Shao Y F, Wang A R, et al. Research Progress of Machine Learning Algorithms Applied in FSO Communication Systems[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240040.
- [2] 罗诗尧. 面向空间激光通信的快速捕获瞄准技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2025.  
Luo S Y. Research on Fast Acquisition and Aiming Technology for Space Laser Communication[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025.
- [3] 吴旭阳, 王建萍, 陈丹阳, 等. 基于自由空间光的无人机通信研究进展及展望[J]. 电子学报, 2025, 53(8): 3026–3046.  
Wu X Y, Wang J P, Chen D Y, et al. Research Progress and Future Prospects of Free-Space Optical Communication for UAVs [J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(8): 3026–3046.
- [4] 朱一鸣, 林显浩, 迟楠, 等. 面向5G/6G移动前传网络的关键技术[J]. 光通信研究, 2025(3): 240078.  
Zhu Y M, Lin X H, Chi N, et al. Key Technologies for 5G/6G Mobile Fronthaul Network [J]. Study on Optical Communications, 2025(3): 240078.
- [5] 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 无人机机载光无线通信研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230003.  
Ding J P, Yi Z L, Wang J T, et al. Recent Advances of UAV Airborne Optical Wireless Communications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230003.
- [6] 许敬旭. 光通信网络在智慧城市的应用及技术发展趋势[J]. 光通信技术, 2025, 49(3): 114–118.  
Xu J X. Application and Technological Development Trends of Optical Communication Networks in Smart Cities [J]. Optical Communication Technology, 2025, 49(3): 114–118.
- [7] Ryu J H, Chang Kim S, Ryoo J R, et al. Tracking Control for Free-Space Optical Communication of Unmanned Aerial Vehicle [C]//2018 IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS). Singapore: IEEE, 2018: 8644959.
- [8] 张丽霞, 林妩媚, 廖志杰, 等. 校正激光光束指向漂移的算法研究[J]. 激光技术, 2012, 36(3): 386.  
Zhang L X, Lin W M, Liao Z J, et al. Research of Algorithm to Correct Direction Drifts of Laser Beam [J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 386.
- [9] Wu S, Li R, Shi Y, et al. Vision-based Target Detection and Tracking System for a Quadcopter [J]. IEEE Access, 2021, 9: 62043–62054.
- [10] 李成龙. 眼在手机机器人的跟瞄控制方法研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.  
Li C L. Research on Tracking and Aiming Control Method of Eye-in-Hand Robot [D]. Jinan, China: Qilu University of Technology, 2023.
- [11] Wang F, Cheng T, Xu A, et al. An FSO Tracking System for Gaussian Beams [C]//2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: IEEE, 2020: 965–969.
- [12] Safi H, Dargahi A, Cheng J. Beam Tracking for UAV-Assisted FSO Links with a Four-Quadrant Detector [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(12): 3908–3912.
- [13] Kaymak Y, Rojas-Cessa R, Feng J, et al. A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1104–1123.
- [14] Tomio H, Grenfell P, Kammerer W, et al. Development and Testing of the Laser Transmitter and Pointing, Acquisition, and Tracking System for the CubeSat Laser Infrared CrosslinK (CLICK) B/C Mission [C]//2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Kyoto, Japan: IEEE, 2022: 9749715.
- [15] Zhu B, Zhang C, Zhang Z, et al. Design and Implementation of Visible Light Positioning Systems based on Photodiode Arrays [J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(11): 166–172.
- [16] Bielecki Z, Achtenberg K, Kopytko M, et al. Review of Photodetectors Characterization Methods [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2022: 140534.