

文章编号 1004-924X(2025)09-1365-12

基于模型预测控制算法的太阳跟踪系统

方若鹏^{1,2}, 李仁仕¹, 焦 婷¹, 许振宇¹, 邓 昊¹, 姚 路¹, 何亚柏^{1*}, 阚瑞峰^{1*}

(1. 中国科学院 合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026)

摘要:为满足车载平台下激光外差太阳辐射光谱探测系统对太阳位置高精度跟踪的需求,设计了一套适用于移动平台下的太阳跟踪系统。将数据处理任务迁移至边缘计算平台,显著提升数据处理速度,保障系统在动态环境下的快速响应;同时结合相机畸变校正技术与视觉检测算法,精准确定相机画面太阳质心位置并计算角度偏移量;将角度偏移量作为系统模型的状态变量,引入模型预测控制算法对姿态调整电机转速实现最优控制,有效提升了太阳跟踪的准确度与稳定性。实验结果表明,该系统的响应延迟仅为 14.6 ms,将它置于以 15 km/h 的速度行驶的车载平台上, X 轴和 Y 轴方向的跟踪精度分别为 0.13° 和 0.04°。该太阳跟踪系统具有高精度、低延迟的优势,可满足外差测量在车载平台下对太阳位置高精度跟踪的需求。

关键词:激光外差;太阳跟踪;模型预测控制;图像处理

中图分类号: O433.1; TK513.4 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253309.1365

CSTR: 32169.14.OPE.20253309.1365

Design of sun tracking system based on model predictive control algorithm

FANG Ruopeng^{1,2}, LI Renshi¹, JIAO Ting¹, XU Zhenyu¹, DENG Hao¹, YAO Lu¹,
HE Yabai^{1*}, KAN Ruifeng^{1*}

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Science Island Branch, Graduate School of USTC, Hefei 230026, China)

* Corresponding author, E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn; yabaihe@hotmail.com

Abstract: A solar tracking system tailored for mobile platforms has been developed to fulfill the requirement for high-precision solar position tracking in a vehicle-mounted laser heterodyne solar radiation spectrum detection system. This study transfers data processing tasks to an edge computing platform, significantly enhancing processing speed and ensuring rapid system response in dynamic environments. Concurrently, the integration of camera distortion correction and vision detection algorithms enables precise determination of the solar centroid position within the camera image and calculation of the angular offset. This angular offset serves as the system model's state variable, and the introduction of a model predictive control algorithm facilitates optimal control of the attitude adjustment motor speed, thereby markedly improving tracking accuracy and stability. Experimental results demonstrate a system response delay of only 14.6

收稿日期: 2025-01-03; 修订日期: 2025-02-10.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2023YFC3705300); 国家自然科学基金面上项目 (No. 62475267)

ms, with tracking accuracies of 0.13° and 0.04° along the X- and Y-axes, respectively, when deployed on an onboard platform traveling at 15 km/h. The findings confirm that the designed solar tracking system combines high precision with low latency, meeting the stringent demands of heterodyne measurement for precise solar position tracking on vehicle platforms.

Key words: laser heterodyne; solar tracking; model predictive control; image processing

1 引言

激光外差光谱技术 (Laser Heterodyne Spectroscopy, LHS) 是当前用于测量温室气体柱浓度和廓线的重要手段^[1-3], 由于兼顾高光谱分辨率和系统易集成等优点, 已经成为与地基傅里叶变换光谱仪形成优势互补的测量方案。LHS 是一种相干探测技术, 通过窄线宽的本振激光器和太阳光在光电探测器中进行拍频, 从而提取太阳光中的分子吸收信息^[4-5], 其外差光谱信号强度正比于本振光功率和太阳光功率的乘积。因此, 太阳光功率接收的稳定性会直接影响外差信号的质量, 进而关系到测量的精确度, 这就要求系统必须具备实时且高精度的太阳位置跟踪能力。

目前, 国内外基于 LHS 的大气温室气体探测系统都需要搭配太阳跟踪仪对太阳光进行收集, 但由于太阳跟踪系统设备限制, 大多为地基定点观测^[6], 车载激光外差光谱仪的移动观测尚未见报道。为实现可移动大气观测, 满足区域碳排放对可移动探测的需求, 需要发展可移动高精度太阳跟踪技术。

太阳跟踪系统的常用方案有视日跟踪方式与光电跟踪方式^[7]两种。视日跟踪方式基于天文学原理, 计算特定地理位置、时间条件下太阳的方位角与高度角, 依据预设算法确定太阳位置, 使跟踪设备对准太阳^[8]。Solargur 等设计了一款基于 PLC 的双轴太阳跟踪系统, 通过天文计算来确定太阳的方位角和高度角^[9]。但这种方式高度依赖预先计算的太阳位置数据, 应用在移动平台时, 无法校正由于移动引起的基准方向偏移, 从而导致跟踪精度的下降。光电跟踪方式通过光电器件来监测太阳的实时位置。当太阳在传感器上的光斑位置发生偏移时, 系统检测到这一变化并处理, 结合控制算法控制电机调整角度, 确保传感器始终正对太阳, 实现

精确的位置跟踪。按照光电传感器的类型, 将光电跟踪方式分为四象限跟踪法和图像识别定位法。四象限跟踪法通过比较四路独立光电流的大小来调整传感器姿态^[10]。闫万红等设计了一套高精度的太阳跟踪系统, 利用四象限光电探测器为太阳导行镜提供了必要的位置反馈信息^[11]。但四象限探测器检测视场小且响应带宽低, 在动态环境下无法实现快速跟踪, 难以应用在船载、车载等移动平台上。基于图像传感器的图像识别定位法是将太阳光斑转换成图像数据后进行分析处理^[12]。相比于四象限传感器, 图像传感器的数据信息量更大, 其跟踪精度和抗干扰能力远超四象限跟踪法。近年来, 基于图像识别的太阳跟踪系统得到了广泛应用。Song 等提出了一种基于图像处理的太阳追踪算法, 结合 Canny 边缘检测与椭圆拟合技术来精确定位太阳斑点的中心, 显著提高了不同光照条件下的跟踪精度^[13]。朱海等利用双目相机, 通过鱼镜头扩大了跟踪视场, 并结合小视场图像 CCD, 设计出适用于船载平台的太阳光度计^[14]。吴兰艳等通过低成本监控云台的图像跟踪算法, 简化处理与控制过程, 实现船载移动平台的稳定太阳跟踪^[15]。本文基于图像识别定位方法, 将相机畸变校正技术与模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 算法相结合, 设计一款适用于车载平台的高精度太阳跟踪系统。

2 原理

2.1 太阳跟踪系统架构及硬件组成

图 1 为基于模型预测控制算法的太阳跟踪系统原理。它主要由图像传感器、控制处理单元和执行机构 3 部分组成。本系统选择 IMX219 相机作为图像传感器, 支持 $1280 \times 720 @ 60\text{FPS}$, 用于捕捉天空中太阳的位置及相关图像数据。与传

统光电传感器相比,IMX219相机能提供更为详细的视野信息,帮助系统识别太阳位置及排除潜在干扰因素,如云层或反射光;控制处理单元选用边缘计算平台 NVIDIA Jetson Orin NX,其搭载的 GPU 和 CUDA 并行计算框架,可提供高效的图像处理速度。处理单元通过分析图像数据

实时计算太阳的相对位置,驱动伺服电机进行角度调整;执行机构包括高精度伺服电机 TSM23 S-4AG 与中空旋转平台,通过双轴控制系统同时调整图像传感器和准直器的方位角和高度角,确保准直器能接收更多太阳光,适用于车载环境中的动态太阳追踪需求。

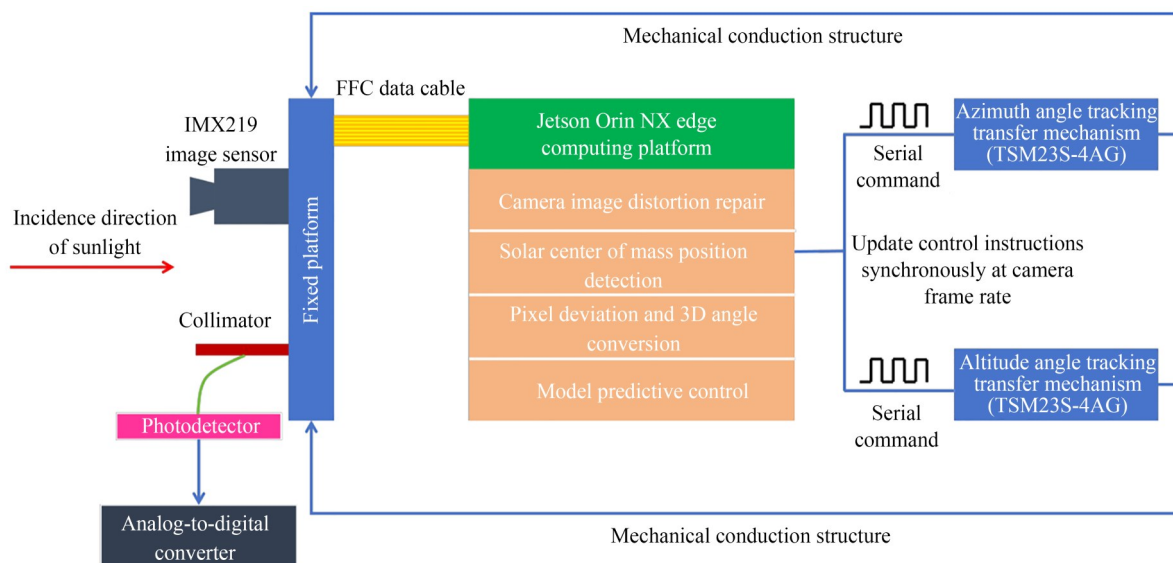


图1 车载太阳跟踪系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle sun tracker

2.2 太阳跟踪系统工作原理

如图1所示,首先,采用IMX219相机捕捉天空的图像数据。由于相机存在固有的几何畸变及非线性响应特性,需事先完成内部参数和畸变系数的标定工作,以确保图像质量。所采集的原始图像随后由Jetson Orin NX平台进行预处理,即根据已知的内参矩阵和畸变系数校正图像畸变,保证图像能够真实地再现天空景象。

将初步处理的图像进一步转化为灰度图,并通过二值化处理降低背景噪声的影响。然后,通过设置适当的亮度阈值来过滤无关信息,再利用最小外接圆法识别太阳的圆形轮廓,进而精确计算出太阳中心在图像中的像素坐标。该坐标与相机光学中心的像素坐标之间的差值,经过内参矩阵和畸变系数转换成实际的空间角度偏差。这一角度偏差作为MPC算法的状态变量,结合系统的动态模型,在每个控制周期内解决一个有限步长范围内的优化问题,以

预测未来的系统状态,并据此计算出最优的电机控制指令,实现太阳跟踪系统重新定位至正对太阳。

3 图像处理

3.1 太阳跟踪系统图像预处理

3.1.1 相机成像偏差分析

在相机拍摄过程中,由于物理因素的影响,图像与实际场景之间可能会产生一定的偏差^[16]。这些偏差常见的类型包括径向畸变、切向畸变、焦距误差、像素非线性响应以及制造误差。其中,径向畸变是相机成像偏差的主要来源。径向畸变通常分为“桶形畸变”和“枕形畸变”,分别表现为图像中的直线向外(桶形)或向内(枕形)弯曲,如图2(b)和2(c)所示。这两种畸变通常对图像的边缘区域影响较大,导致物体的几何形状无法准确反映真实场景中的空间关系,从而影响后续的图像处理和物体跟踪。

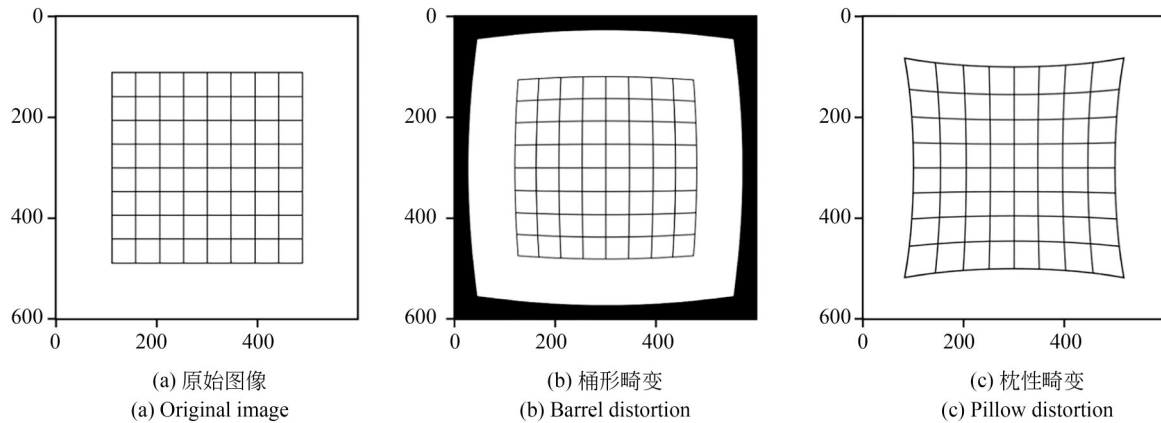


图 2 径向畸变

Fig. 2 Radial distortion

3.1.2 相机畸变校正

为了解决上述偏差问题,需要通过相机标定进行修正。标定的主要目标是确定相机的内参和外参。内参包括焦距、主点坐标、畸变系数等,用于描述相机的成像特性;外参表示相机对于世界坐标系的相对位置和方向。通过标定能够对相机的成像特性进行精确校准,使得图像中的像素点与实际物理空间中的点对应,从而

为后续的几何计算和空间测量提供准确可靠的数据支持。

张正友相机标定法是一种常用的相机标定方法,广泛应用于视觉测量和目标识别等领域^[17]。标定板采用棋盘格图案,并将其置于不同位置与角度拍摄,生成约 20 张包含清晰棋盘格的图像。随后,将这些图像导入 MATLAB 的视觉工具箱,提取棋盘格的角点,如图 3 所示。

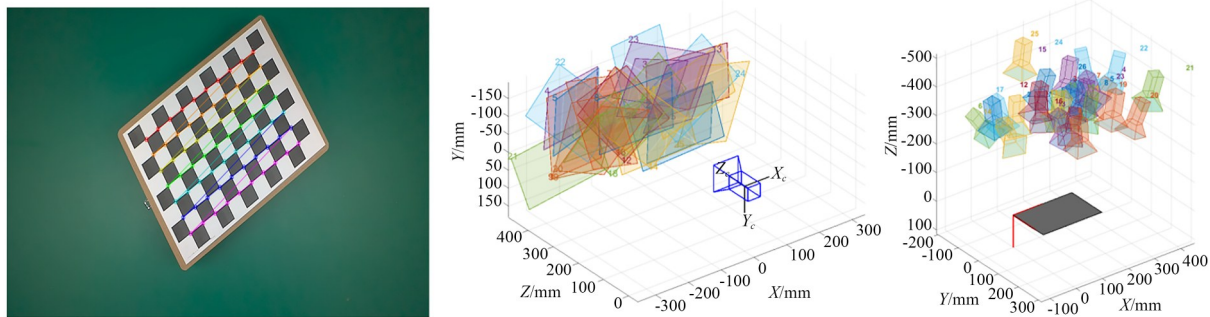


图 3 标定实验及外参可视化

Fig. 3 Calibration experiment and visualization of external parameters

最后结合棋盘格的实际物理尺寸,计算出 IMX219 相机的内参矩阵和畸变系数,如下:

$$K = \begin{bmatrix} 723.97 & 0 & 647.93 \\ 0 & 721.22 & 363.39 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & p_1 & p_2 \end{bmatrix} = [-0.095 \quad 0.107 \quad -0.002 \quad 0.001 \quad -0.051]. \quad (2)$$

完成相机标定后,使用畸变模型的校正公式对图像中的桶形畸变和枕形畸变进行校正。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ 2p_2 xy + p_1 (r^2 + 2y^2) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: x, y 为图像坐标系下理想的无畸变坐标, x_c, y_c 为畸变后图像像素点的坐标, r 为该点距成

像中心的距离。

相机畸变校正效果如图4所示,校正前后的重投影误差如表1所示。可以看出,校正后重投影误差明显降低,且在标准值以内,校正效果明显。

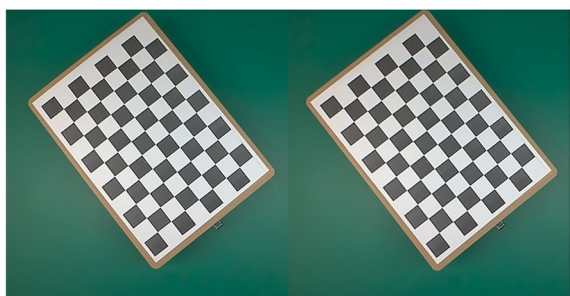


图4 校正前后图片对比

Fig. 4 Comparison of image before and after correction

表1 校正前后评估指标

Tab. 1 Evaluation indexes before and after correction

评估指标	原始图像	校正图像	标准值 (pixel)
平均重投影误差	0.63	0.32	<0.5
最大重投影误差	1.08	0.54	<1.0

3.2 太阳跟踪系统图像处理

太阳跟踪系统通过图像处理技术实现太阳位置的精准识别。首先,获取太阳的图像信息,如图5(a)所示;再对图像进行灰度转换,以去除彩色信息,保留亮度信息,如图5(b)所示。图像灰度级为256,转换公式如下:

$$I_{\text{gray}} = 0.2989I_R + 0.5870I_G + 0.1140I_B, \quad (4)$$

其中: I_R, I_G, I_B 分别为红色、绿色和蓝色通道的像素值, I_{gray} 为转换后的灰度值。此操作降低了数据维度,减少了计算复杂度,突出图像的亮度信

息,为后续处理步骤奠定了基础。

在完成灰度转换后,为消除光照强度变化带来的影响,需对图像进行亮度归一化处理;考虑到太阳在图像中的亮度远高于周围背景,进一步通过亮度阈值法来分割太阳区域,进行二值化处理,如图5(c)所示。

$$I_{\text{sun}}(x, y) = f(x) = \begin{cases} 1, & I(x, y) > T \\ 0, & I(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $I_{\text{sun}}(x, y)$ 为归一化图像后的亮度, T 为亮度阈值。

为了在二值化处理后的区域中筛选可能的太阳轮廓,计算整图的梯度幅值提取边界信息,梯度幅值较大处即可能为太阳边界。在提取所有的高亮度区域轮廓后,利用太阳光斑的圆形特征进一步确定太阳位置。首先,采用图像矩法计算轮廓的质心。图像的中心矩 m_{pq} 定义为:

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q I(x, y), \quad (6)$$

其中 p 和 q 是矩的阶数。通过计算零阶矩 m_{00} 和一阶矩 m_{10} 和 m_{01} ,得到的质心位置为:

$$c_x = \frac{m_{10}}{m_{00}}, c_y = \frac{m_{01}}{m_{00}}. \quad (7)$$

然后,利用最小外接圆法确定太阳位置与大小。通过比较每个轮廓的最小外接圆的面积、圆形成度和半径范围,筛选出最符合太阳特征的圆形,如图5(d)所示。太阳的外接圆通常面积较大,圆形成度接近1。通过上述方法,最终确定太阳光斑在相机像素坐标系中的位置。

为了准确描述太阳在天空中的位置,需将太阳质心的像素坐标转换为物理空间中的角度^[18]。这一过程依赖于相机的几何透视原理,如图6所示。通过相机标定求得相机焦距 f_x, f_y ,相机成像中心像素坐标为 (u_0, v_0) ,太阳质心像素坐标为

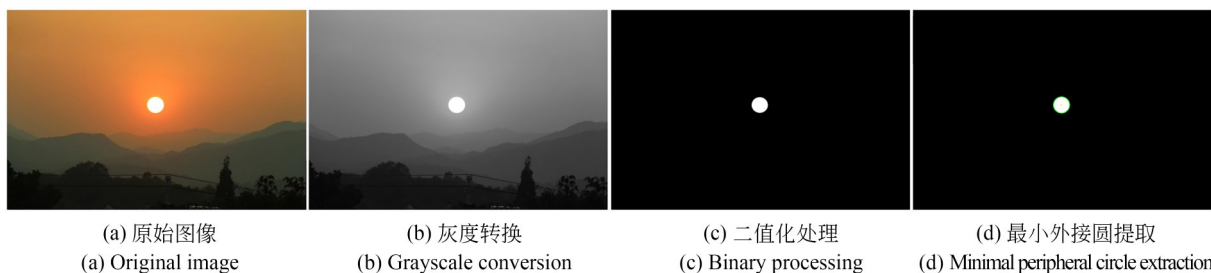


图5 图像处理

Fig. 5 Image processing

(u, v) , 则对应的视角角度为:

$$\theta_x = \arctan\left(\frac{(u - u_0)}{f_x}\right), \quad (8)$$

$$\theta_y = \arctan\left(\frac{(v - v_0)}{f_y}\right). \quad (9)$$

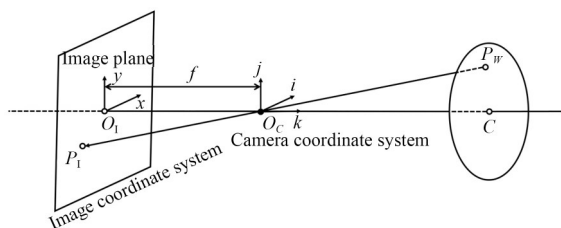


图6 像素点位置与其对应的物理角度

Fig. 6 Pixel position vs. corresponding physical angle

4 控制系统与运动学模型

控制系统负责将处理单元计算得到的太阳空间角度信息转化为机械执行命令, 调整太阳跟踪系统的角度始终正对太阳。

4.1 运动学模型

车载太阳跟踪系统在水平方向和垂直方向上均有独立的运动控制, 且两个电机的转动方向相互垂直, 可认为系统不存在耦合。对系统的输入和输出定义如下:

系统输入包括方位角电机的转动角速度 ω_x 和高度角电机的转动角速度 ω_y , 分别控制水平方向和垂直方向的转动;

系统输出为图像处理计算的视角角度, 即太阳光入射方向与相机平面法线方向在水平和垂直方向上的夹角 θ_x 和 θ_y , 分别表示太阳在水平和垂直方向上的偏离程度。

该系统属于典型的双输入双输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统。这种定义确保系统在两个方向上独立控制太阳的跟踪角度, 使得太阳光斑质心与相机成像画面中心重合。

方位角与高度角的变化率由控制方位角和高度角的电机决定, 如下:

$$\frac{d\theta_x(t)}{dt} = \frac{\omega_x(t)}{m}, \quad \frac{d\theta_y(t)}{dt} = \frac{\omega_y(t)}{m}. \quad (10)$$

结合上述内容, 可以写出连续系统的状态空

间方程:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = A_1 \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + B_1 \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

其中: 系统的状态变量为 $\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_x(t) \\ \theta_y(t) \end{pmatrix}$; 系统

的输入为 $\begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \end{pmatrix}$; 系统的输出为

$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}$; A_1 为系统矩阵, B_1 为输入矩

阵, C_1 为输出矩阵。

使用零阶保持法对该系统进行离散化, 采样率与相机帧率相同, 得到的离散系统状态方程为:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

4.2 模型预测控制算法

在车载太阳跟踪系统控制系统中, 伺服电机通过接收控制器的串口信号调整转速, 以实现太阳光线的精确跟踪。传统的 PID 控制算法虽然常用于控制工程领域, 但在本系统中面临一定的局限性。车载平台上的太阳跟踪系统涉及多个被控变量, 伺服电机的转速、扭矩, 以及最大饱和电流等物理因素都对系统构成限制, 而 PID 控制难以显式地处理这些多变量及其物理约束。因此, 本系统选用模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 作为核心控制算法。

MPC 是一种先进的过程控制方法, 广泛应用于工业生产和复杂系统中, 其优势在于能够基于系统模型预测未来的状态变化, 具有更强的稳定性和灵活性, 尤其适合需要管理多个输入和输出、存在复杂约束的控制场景^[19-20]。MPC 的具体步骤包括模型预测、滚动优化和反馈校正。MPC 的核心在于滚动优化策略, 即在每个采样周期内根据系统当前状态预测未来若干时刻的输出, 生成优化的控制输入序列, 使得未来输出与参考值的差值最小^[21]。

在车载平台的太阳跟踪系统中, 系统的控制目标是将相机镜头的法向量与太阳光的入射方向在水平方向和垂直方向上的夹角控制为零,

如下:

$$\begin{pmatrix} \theta_x(t) \\ \theta_y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

这意味着当水平和垂直方向的夹角都为零时,太阳光垂直入射至相机镜头,此时可认为太阳跟踪系统正对太阳。定义 $x_1(i|k), x_2(i|k)$ 为从 k 时刻开始向后的第 i 步预测系统状态, $u_1(i|k), u_2(i|k)$ 为从 k 时刻开始的第 i 步系统输入。根据系统的状态方程可以得到:

$$\begin{bmatrix} x_1(i|k) \\ x_2(i|k) \end{bmatrix} = A^i \begin{bmatrix} x_1(0|k) \\ x_2(0|k) \end{bmatrix} + \sum_{j=0}^{i-1} A^{i-j-1} B \begin{bmatrix} u_1(j|k) \\ u_2(j|k) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

为了弱化模型参数漂移带来的动态估计误差,使用增广矩阵,将模型在未来 N 个采样周期内的状态用预测方程表示:

$$X(k) = Fx(k) + \Phi U(k), \quad (16)$$

其中:

$$X(k) \triangleq \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1(1|k) \\ x_2(1|k) \end{pmatrix} \\ \vdots \\ \begin{pmatrix} x_1(N|k) \\ x_2(N|k) \end{pmatrix} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$U(k) \triangleq \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1(1|k) \\ u_2(1|k) \end{pmatrix} \\ \vdots \\ \begin{pmatrix} u_1(N|k) \\ u_2(N|k) \end{pmatrix} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$F \triangleq \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\Phi \triangleq \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & 0 \\ AB & B & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A^{N-1} & A^{N-2} & \dots & B \end{bmatrix}. \quad (20)$$

根据跟踪精度与控制需求建立代价函数:

$$J(K) = \sum_{i=1}^N \left\| \begin{pmatrix} x_1(i|k) \\ x_2(i|k) \end{pmatrix} \right\|_Q^2 + \left\| \begin{pmatrix} u_1(i|k) \\ u_2(i|k) \end{pmatrix} \right\|_R^2. \quad (21)$$

式中: $Q = \text{diag}[Q_1 \ \dots \ Q_N]$, Q_i 代表控制精度的权重; $R = \text{diag}[R_1 \ \dots \ R_N]$, R_i 代表控制信

号的权重。结合增广矩阵,代价函数可表示为:

$$J(K) = x^T(k) F^T Q F x(k) + 2x^T(k) F^T Q \Phi U(k) + U^T(k) (\Phi^T Q \Phi + R) U(k). \quad (22)$$

考虑到物理条件约束,由于电机转速和加速度存在上限,同时电机的旋转角度具有明确的限位要求,故显式状态约束与输入约束如下:

$$x_{\min} \leq x(i|k) \leq x_{\max}, \quad (23)$$

$$u_{\min} \leq u(i|k) \leq u_{\max}, \quad (24)$$

$$\dot{u}_{\min} \leq \dot{u}(i|k) \leq \dot{u}_{\max}. \quad (25)$$

通过求解在该终端不等式约束条件下的最优值,得到最优的控制序列 $U^*(k)$,并将优化得到的 $u^*(0|k)$ 用于实际控制系统中,上述过程会与采样同步执行,实现滚动优化,进而应对各种外部干扰的影响。通过计算出的最优电机控制指令,控制电机通过转动调整系统姿态,实现太阳光斑质心与相机成像中心的像素坐标差值最小。

5 实验结果

5.1 室内实验

鉴于太阳半径约为 6.96×10^8 m,地日距离约为 1.49×10^{11} m,在忽略地球曲率的情况下,当车辆沿直线行驶时,太阳跟踪系统的工作状态等效于静止平台下的工作状态。因此,在车辆行驶过程中,太阳跟踪系统的跟踪偏差主要来源于车辆转弯动作以及由路面不平整或车辆动态特性引起的晃动等。

为了模拟并评估太阳跟踪系统在不同角速度条件下的跟踪效果,在室内搭建测试系统进行实验,如图7所示。由于太阳跟踪系统的高度角和方位角相互独立无耦合,因此选择水平导轨,仅测试方位角变化时的跟踪效果。用直径为2 cm的圆形LED灯模拟太阳,太阳跟踪系统放在距导轨直线距离2.15 m处,通过计算可知此时圆形LED灯在画面中的成像尺寸与太阳在画面中的相同,约为7个像素点。圆形LED灯安装在滑轨上以恒定速度运动,模拟与太阳的相对移动。在滑轨中点位置,取得相对于太阳跟踪系统的最大角速度。

基于实际路况分析,机动车在转弯时的速度通常不超过25 km/h(约7 m/s),且最小转弯半径约为7 m,此时计算得到的角速度大约为0.99

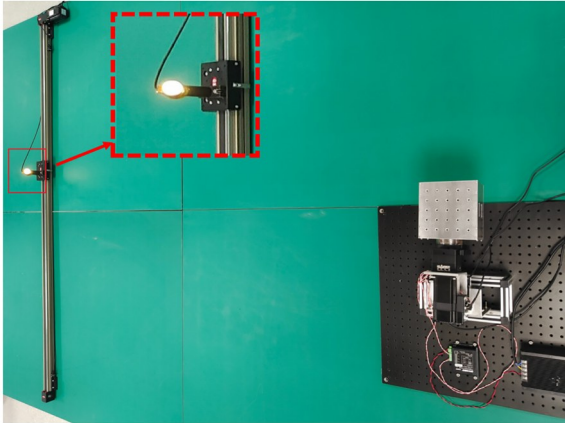


图7 室内模拟太阳跟踪系统车载环境测试装置

Fig. 7 Indoor simulation sun tracker vehicle environment test devices

rad/s。实验选取4个不同的角速度值进行测试: 0.50, 0.75, 1.00 和 1.25 rad/s, 对应的滑轨速度分别为 1.08, 1.61, 2.15 和 2.69 m/s, 滑轨运动总时间为 10 s, 由于滑轨长度限制, 每运动 1.5 m 折返一次。以太阳光跟踪系统获得的模拟太阳质心像素点坐标与视场中心像素点坐标间的差值作为跟踪效果的评判标准。由于导轨水平放置, 故 Y 轴质心偏移量恒为 0, X 轴质心偏移量如图 8 所示。可知, 当最大角速度为 1.25 rad/s 时, X 轴质心偏差最大为 6 个像素点, 对应视场角度偏差为 0.47° , 标准偏差为 4.71。

同时, 计算了太阳跟踪系统控制指令的响应时间, 如图 9 所示。得益于 Jetson Orin NX 100TOPS 的高算力以及畸变修复算法的快速高

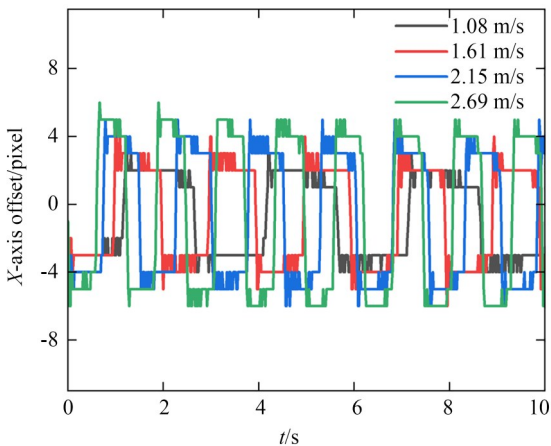


图8 不同速度下 X 轴质心像素偏差

Fig. 8 X-axis centroid pixel deviation at different speeds

效, 太阳跟踪系统的响应速度显著提高, 平均响应时长为 14.6 ms, 可满足高精度实时追踪太阳位置的需求。响应时间出现波动是由于测试过程中, CPU 及 GPU 温度升高导致系统出现降频。

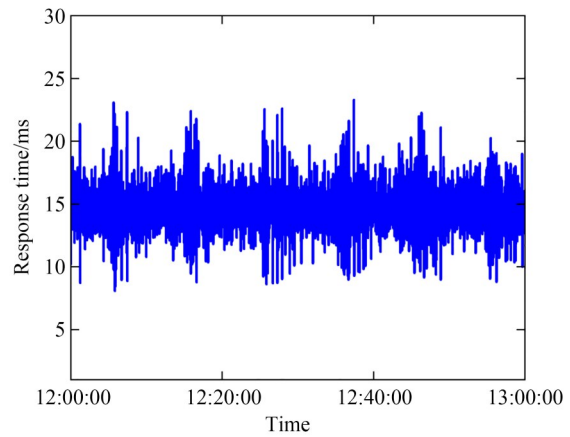


图9 太阳跟踪系统的响应时间

Fig. 9 Response time of sun tracker

5.2 外场实验

5.2.1 静止平台实验

静止状态下的高精度跟踪是实现移动平台高精度跟踪的前提。为了全面评估车载太阳跟踪系统的性能, 首先将太阳跟踪系统放置于静止平台上, 长时间连续追踪太阳位置。选择开阔、无遮挡的平地作为测试场地, 其地理位置为北纬 $31.906\ 197^\circ$ 、东经 $117.163\ 977^\circ$ 。该地点具有典型的光照条件, 适合此类设备的测试。

实验过程中, 采用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的天文数据, 成功提取了 2024 年 11 月 22 日中午 11:30 到 12:30 实验地点的太阳高度角和方位角信息, 作为参考值; 在同一时段, 将太阳跟踪系统置于实验场地, 追踪太阳位置, 并记录测量的实时高度角和方位角变化, 作为测量值, 如表 2 所示。从表中可以看出, 在 1 h 内, 太阳高度角与方位角的测量值与参考值一致, 证明太阳跟踪系统可以高精度追踪太阳位置。

实验记录的质心像素点偏差数据如图 10 所示, 质心 X 轴和 Y 轴的坐标偏移量均不超过 1 个像素点, 最大视场角度偏差为 0.08° 。

表 2 不同时刻太阳位置的方位角与高度角

Tab. 2 Azimuth and altitude of sun at different time

(°)

时间	NOAA 参考值		测量值		绝对误差	
	方位角	高度角	方位角	高度角	方位角	高度角
11:30	171.87	37.48	171.80	37.36	−0.07	−0.12
11:40	174.81	37.73	174.65	37.65	−0.16	−0.08
11:50	177.78	37.86	177.70	37.84	−0.08	−0.02
12:00	180.75	37.89	180.76	37.92	0.01	0.03
12:10	183.72	37.80	183.67	37.88	−0.05	0.08
12:20	186.67	37.61	186.60	37.74	−0.07	0.13
12:30	189.60	37.31	189.52	37.37	−0.08	0.06

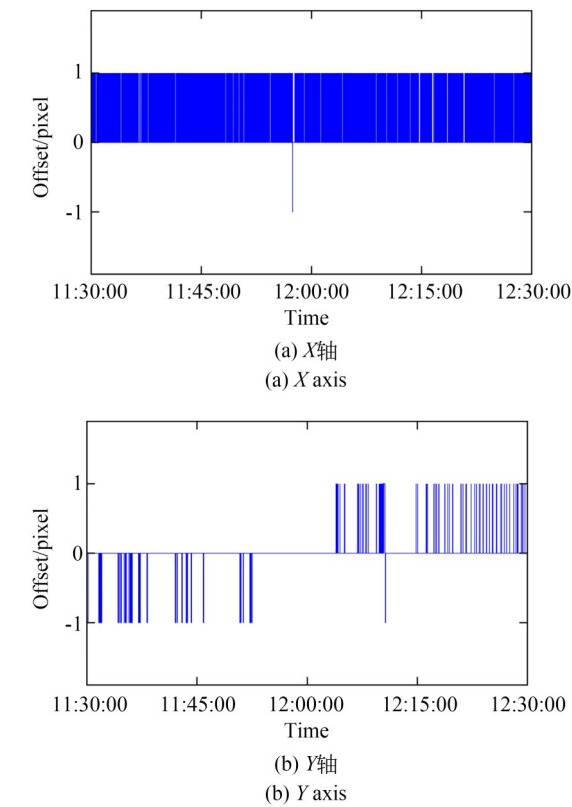


图 10 静止平台质心像素偏差

Fig. 10 Stationary platform centroid pixel deviation

利用安装在太阳跟踪系统上的准直器收集太阳光,滤光后耦合进光电探测器中,以探测到的电信号幅值作为评判标准,用于判断太阳跟踪系统采集到的信号光是否符合外差探测要求,结果如图 11 所示。采集的信号幅值在 0.59~0.63 V 波动,平均值为 0.62 V,标准差为 0.0067 V,较为稳定。由此表明,太阳跟踪系统在静止平台能

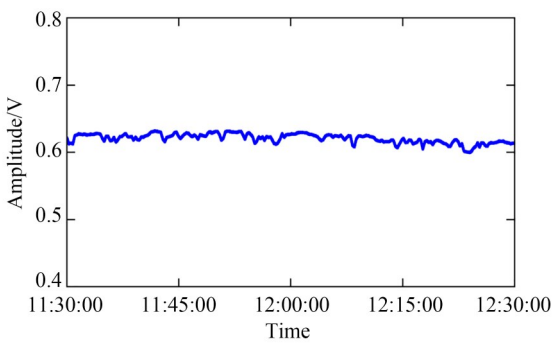


图 11 静止平台的光强幅值

Fig. 11 Light intensity amplitude of stationary platform

够高精度追踪太阳位置,收集到的太阳光能够满足外差测量需求。

5.2.2 车载平台实验

在 2024 年 12 月 1 日的 12 时 00 分至 12 时 10 分,选择合肥市庐阳区三国城路作为测试路段,进行太阳跟踪系统车载测试实验。当日天气晴朗,测试时间无云层遮挡,测试路段总长约为 2.5 km,整体较为平坦,且道路两侧无树荫遮挡;此外,该路段中包含一段转弯道路。实验过程中,设备放置于移动车辆上,车辆以 15 km/h 的速度行驶 10 min,以探究运动状态下的太阳跟踪精度。

实验记录的质心像素点偏差数据如图 12 所示。X 轴坐标偏移量最大不超过 8 个像素点,最大视场角度偏差为 0.63°,X 轴坐标平均偏移量为 1.62 个像素点,对应视场角度偏差为 0.13°,二阶原点矩为 3.85;Y 轴坐标偏移量最大不超过 6 个像素点,最大视场角度偏差为 0.48°,Y 轴坐标平

均偏移量为 0.45 个像素点,对应视场角度偏差为 0.04° ,二阶原点矩为 0.58。

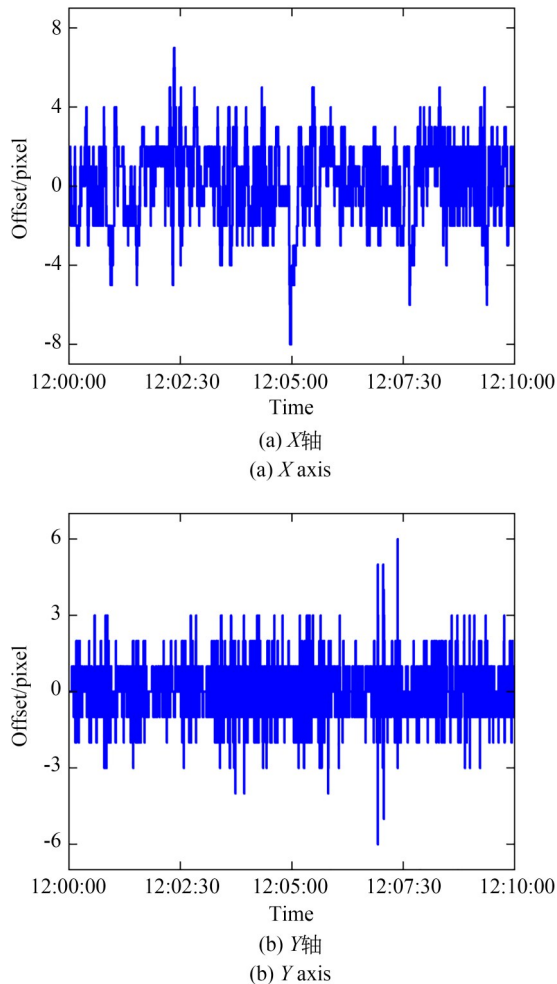


图 12 车载平台质心像素偏差

Fig. 12 Vehicle platform centroid pixel deviation

与静止平台测试相同,用探测到的电信号幅值作为太阳跟踪系统跟踪效果的判断依据,实验结果如图 13 所示。信号幅值平均值为 0.53 V,标准差为 0.087 1 V,波动较静止平台时增大。信号丢失总时长占整个测试时长的 3.9%,除信号丢失时段外,整体仍保持在 0.5 V 以上。在 12 时 04 分 55 秒至 12 时 05 分 09 秒,测试车辆通过转弯路段,持续时间为 14 s。在此过程中,信号丢失,持续时间约为 9 s。随后,信号恢复。在车辆行驶过程中,仍存在部分时段信号丢失,这是由于运动过程中产生颠簸,所带来的高频振动无法及时被太阳跟踪系统检测并处理,从而造成跟踪精度的下降。

实验结果表明,在车载移动平台上,太阳跟踪系统能够有效纠正因车辆行驶带来的光线偏移情况等,精确追踪太阳位置,满足移动外差探测需求。同时,太阳跟踪系统的处理过程不依赖前序检测数据,不会随时间推移产生累积误差,具备良好的长时间运行稳定性。

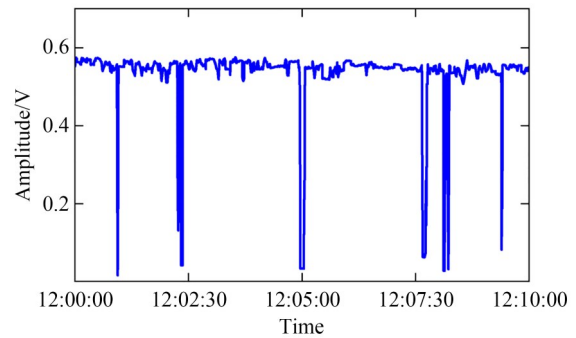


图 13 15 km/h 车速下的光强幅值

Fig. 13 Light intensity amplitude at speed of 15 km/h

6 结 论

本文针对太阳位置追踪的高精度探测需求,设计了一套基于模型预测控制算法的车载太阳跟踪系统。首先,将数据处理移至边缘计算平台,减少传输延迟,实时处理图像数据,平均响应时长仅为 14.6 ms;采用视觉检测算法与相机畸变校正技术处理图像,高精度计算当前太阳质心位置,进而获得视角角度,并作为系统动态模型的状态变量;结合电机运动控制系统建立车载太阳跟踪系统整体的运动学模型,通过模型预测控制算法优化跟踪控制,从而提升跟踪精度。实验结果表明,太阳跟踪系统在车载平台上,X 和 Y 轴方向的跟踪精度分别为 0.13° 和 0.04° ,可以高精度追踪太阳位置,能够满足外差测量对太阳光收集的基本要求。但由于实际车载环境的复杂性,太阳跟踪系统的跟踪精度受到车辆运动速度,路面平整状况以及天气等多方面的影响,仍存在较大的改进空间。

作者贡献声明:

方若鹏:研究设计,实验执行,数据分析及论文撰写;

李仁仕:理论指导,实验方案设计;

焦婷:数据处理与分析;
许振宇:论文审核与编辑;
邓昊:技术支持,项目支持;

姚路:技术指导;
何亚柏:实验资源提供和项目支持;
阚瑞峰:研究指导。

参考文献:

- [1] LI J, TAN T, SHEN F J, *et al.* Remote sensing of H₂O/HDO in the atmospheric column based on a near-infrared laser heterodyne radiometer suppressing local oscillator relative intensity noise [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 419: 136405.
- [2] DENG H, LI R S, LIU H, *et al.* Optical amplification enables a huge sensitivity improvement to laser heterodyne radiometers for high-resolution measurements of atmospheric gases [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4335-4338.
- [3] LU X J, HUANG Y B, WU P F, *et al.* Atmospheric HDO abundance measurements in the Tibetan Plateau based on laser heterodyne radiometer [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(3): 459.
- [4] DENG H, LI M X, HE Y B, *et al.* Laser heterodyne spectroradiometer assisted by self-calibrated wavelength modulation spectroscopy for atmospheric CO₂ column absorption measurements [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 230: 118071.
- [5] 李仁仕, 邓昊, 金谷雨, 等. 本振激光强度调制激光外差光谱遥测技术研究 [J]. *环境工程*, 2023, 41(10): 9-13.
- LI R SH, DENG H, JIN G Y, *et al.* Research on laser heterodyne spectrum telemetry technology based on local oscillator laser intensity modulation [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(10): 9-13. (in Chinese)
- [6] 张天民, 黄俊, 黄尧, 等. 3.93 μm 激光外差光谱系统光学结构设计与 N₂O 测量 [J]. *中国激光*, 2023, 50(14): 1411001.
- ZHANG T M, HUANG J, HUANG Y, *et al.* Optical structure design of 3.93 μm laser heterodyne spectrometer and N₂O measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(14): 1411001.
- [7] 董殿国. 太阳光跟踪控制系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.
- DONG D G. *Research on Solar Tracking Control System* [D]. Taiyuan: North University of China, 2023. (in Chinese)
- [8] BLANC P, WALD L. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(10): 3072-3083.
- [9] SUNGUR C. Multi-axes Sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(4): 1119-1125.
- [10] SALGADO-CONRADO L. A review on Sun position sensors used in solar applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2128-2146.
- [11] 闫万红, 韩振伟, 张宏吉, 等. 面向空间应用的四象限探测器筛选系统 [J]. *红外技术*, 2023, 45(5): 541-547.
- YAN W H, HAN ZH W, ZHANG H J, *et al.* Screening system of four-quadrant detector for space application [J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(5): 541-547. (in Chinese)
- [12] WEI C C, SONG Y C, CHANG C C, *et al.* Design of a solar tracking system using the brightest region in the sky image sensor [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 1995.
- [13] SONG X F, GUO W C. A Sun spot center orientation method based on ellipse fitting in the application of CPV solar tracker [C]. 2010 *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*. October 13-14, 2010. Changsha, China. IEEE, 2010: 175-178.
- [14] 朱海, 李建玉, 黄宏华, 等. 船载太阳光度计图像跟踪系统 [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 409-416.
- ZHU H, LI J Y, HUANG H H, *et al.* Shipboard Sun-photometer image tracking system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 409-416. (in Chinese)
- [15] 吴兰艳, 杨晨光, 邓昊, 等. 船载激光外差温室气体探测系统研制 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(21): 3157-3165.
- WU L Y, YANG CH G, DENG H, *et al.* Development of shipborne laser heterodyne greenhouse

- gas detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(21): 3157-3165. (in Chinese)
- [16] 林绿开, 钮倩倩, 李毅. 基于棋盘标定板的优化相机参数标定方法[J]. *计算机技术与发展*, 2023, 33(12): 101-105.
LIN L K, NIU Q Q, LI Y. Optimized camera parameter calibration method based on checkerboard [J]. *Computer Technology and Development*, 2023, 33(12): 101-105. (in Chinese)
- [17] 黄霖川. 面向在役承压构件的便携式磁光成像缺陷检测系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
HUANG L C. *Research on Portable Magneto-optical Imaging Defect Detection System for In-service Pressure Components*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [18] 王晴. 基于机器视觉的工业堆叠零件目标识别研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- WANG Q. *Research on Target Recognition of Industrial Stacked Parts Based on Machine Vision* [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2024. (in Chinese)
- [19] KHAZOOM C, HONG S, CHIGNOLI M, *et al.* Tailoring solution accuracy for fast whole-body model predictive control of legged robots [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9 (12): 11074-11081.
- [20] KÖHLER J, MÜLLER M A, ALLGÖWER F. Analysis and design of model predictive control frameworks for dynamic operation: an overview [J]. *Annual Reviews in Control*, 2024, 57: 100929.
- [21] HARBI I, RODRIGUEZ J, LIEGMANN E, *et al.* Model-predictive control of multilevel inverters: challenges, recent advances, and trends [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(9): 10845-10868.

作者简介:



方若鹏(1999—),男,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事激光光谱技术与控制算法方面的研究。E-mail: frp@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



阚瑞峰(1977—),男,辽宁锦州人,博士,研究员,博士生导师,2006年于中国科学院安徽光机所获得博士学位,主要从事光学与光谱学监测方法的研究。E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn