

# 运动目标控制与自动追踪系统的设计与实现

王毅达,张林丽<sup>†</sup>,代永宏,尹晟

(华南理工大学电子与信息学院,广东 广州 510640)

**摘要:**为实现激光笔光斑的精确控制和自动追踪,设计并实现了一种创新的运动目标控制与自动追踪系统,旨在提高目标追踪的效率和准确性,满足高精度应用场景的需求。系统由机械结构和控制系统组成,其中控制系统以 STM32F103C8T6 单片机为核心,结合 OpenMV 视觉检测模块和二维云台,并应用增量式 PID 控制算法进行动态追踪。在多次测试中,系统都能够稳定运行,有效地完成目标追踪任务。该系统不仅证明了其在精确控制和自动追踪方面的高性能,而且展现了其在实际应用中的广泛价值。

**关键词:**运动控制;自动追踪;单片机;OpenMV;PID 算法;二维云台

**中图分类号:**TN99

**文献标识码:**A

## Design and Implementation of a Moving Object Control and Automatic Tracking System

WANG Yida, ZHANG Linli<sup>†</sup>, DAI Yonghong, YIN Sheng

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** To achieve precise control and automatic tracking of the laser pointer spot, this study designed and implemented an innovative motion target control and automatic tracking system aimed at improving the efficiency and accuracy of target tracking to meet the needs of high-precision application scenarios. The system consists of a mechanical structure and a control system, where the control system is centered around the STM32F103C8T6 single chip microcontroller, combined with the OpenMV vision detection module and a 2D gimbal, and applies an incremental PID control algorithm for dynamic tracking. In multiple tests, the system was able to operate stably and effectively complete the target tracking task. This system not only demonstrated its high performance in precise control and automatic tracking but also showcased its wide value in practical applications.

**Key words:** motion control; automatic tracking; single chip microcontroller; OpenMV; PID algorithm; 2D gimbal

在现代自动化和智能化技术迅猛发展的背景下,“运动目标控制与自动追踪系统设计”作为一个前沿项目<sup>[1]</sup>,拥有着广泛的应用前景和重要的实际价值<sup>[2]</sup>。该系统的设计旨在结合先进的控制理论和现代电子技术,实现对动态目标的精确跟踪和有效控制。这一系统的研发不仅是对自动化技术的

一次重要探索,也是智能控制领域的一次创新尝试。随着机器视觉、智能控制算法以及高性能硬件的不断进步,实现精确的运动目标追踪和控制已经成为可能。

本设计以 STM32F103C8T6 为主控板,通过 OpenMV 实现视觉识别,旨在设计一个能够实时

收稿日期:2024-01-31

基金项目:教育部2023年产学研合作协同育人项目(230802595183345);企业横向项目(311232352003)

作者简介:王毅达(2004—),男,广东深圳人,本科,研究方向:电子信息工程。

<sup>†</sup>通信联系人,E-mail:12581673@qq.com

识别和跟踪特定目标(如激光光斑)的系统,并通过精确的控制算法调整目标的运动轨迹,以满足特定的应用需求。这一系统的应用场景广泛,从工业自动化到娱乐电子,都有着重要的实际意义。

## 1 系统需求分析

本项目团队设计并实现了一套激光笔运动目标控制和自动追踪系统。系统核心功能是通过控制云台上的舵机调整激光笔的指向,使红色光斑在 A4 纸面上沿预定路径移动。通过按键设置可以控制红色激光光斑指向屏幕中心;可以控制红色光斑在 50 cm×50 cm 的方框内沿指定路径移动;也可以利用 OpenMV 识别 A4 纸的黑色边框,并通过无线串口模块无线传输边框顶点相对坐标数据给主控板,通过增量式 PID 算法实现云台舵机控制激光笔红色光斑沿 A4 纸边框运动。

在系统的高级功能中,自动追踪系统的 OpenMV 模块同时识别红色和绿色激光笔光斑的位置,第二块主控制板接收这些数据并输出 PWM 信号,控制绿色激光笔光斑移动至红色光斑所在位置。当两光斑靠近时,系统会触发蜂鸣器和 LED 灯。此外,系统还集成了一个按键,用于通过中断机制暂停和恢复系统运行。

## 2 系统方案选择

本系统的设计精心构建,旨在实现高效的运动控制和精确的视觉识别。系统主要由三个核心模块组成:主控模块、运动控制模块和视觉识别模块<sup>[3]</sup>。每个模块的选择都经过了详尽的考量和比较,以确保系统的最优性能。

### 2.1 主控模块的论证与选择

在主控模块的选择上,考虑了以下三种方案:

方案 1:瑞萨 R5F100LEA

瑞萨 R5F100LEA 芯片以其快速的代码生成速度和用户友好的操作界面著称。然而,该芯片的一个主要限制是其内部资源较为有限,这可能导致编程的灵活性受限。

方案 2:STM32F103C8T6

此芯片的优势在于低功耗、资源丰富,以及拥有大量的库函数,使其易于操作。特别值得一提的是,本团队对 STM32F103C8T6 的功能和操作有着深入的了解和丰富的经验,这将极大地促进项目的顺利进行。

方案 3:TIMCU

此芯片提供了全面的系统解决方案,但它的资料相对有限,操作较为复杂。此外,考虑到本团队对 TIMCU 的使用经验不足,这可能会影响项目的进展速度和最终效果。

综合考量:

考虑到芯片的性能、资源、团队熟悉程度以及项目需求,最终选择了 STM32F103C8T6 作为主控模块。这一选择不仅基于它的技术优势,也考虑到了团队的实际操作能力和项目的整体需求,确保系统的高效性和稳定性。

### 2.2 运动控制模块的论证与选择

在寻找合适的运动控制模块时,我们考虑了以下三种方案:

方案 1:圆底数字舵机二维云台

这种云台在精度和稳定性方面表现优异,特别是在防抖动方面具有显著优势。它的快速响应能力保证了激光笔位置的迅速且准确调整,同时在设计上考虑了激光笔的牢固固定和整体美观性。

方案 2:步进电机驱动的二维云台

步进电机驱动的二维云台提供了一个解决方案。虽然步进电机可以非常精确地控制角度,适用于需要精确角度调整的应用,且闭环控制系统确保了运动的精确性和稳定性,减少了失步的风险,但是步进电机在高速或高负载下的性能可能不如其他类型的电机,且需要合适的散热措施进行散热。

方案 3:无刷电机驱动的二维云台

该方案以其高精度和稳定性著称。无刷电机的使用不仅提供了优秀的性能,也确保了更长的使用寿命和更低的维护需求。然而,这种云台的成本较高,且操作上相对更为复杂。

综合考虑成本、精度、稳定性和操作复杂性后,决定采用圆底数字舵机二维云台作为运动控制模块。这一选择基于其高精度、优秀的稳定性和合理的成本效益比,同时在激光笔的固定和整体外观设计上也表现出色。

### 2.3 视觉模块的论证与选择

方案 1:OpenMV

OpenMV 是一款集成了机器视觉功能的微控制器板,适用于执行较为复杂的视觉处理任务<sup>[4]</sup>。它支持多种高级视觉算法,如 AprilTag 跟踪、边缘检测、模板匹配、图像捕获和视频录制,以及对 TensorFlow Lite 的支持。此外,OpenMV 可以通过 MicroPython 进行高级编程,简化了视觉算法的开发过程<sup>[5]</sup>。它还提供了多种通信接口,包括

WiFi、USB 虚拟 COM 端口、CAN 总线、SPI 总线和 I2C 总线，方便与其他设备的连接和交互。尽管价格较高，但其强大的功能和灵活性使其成为一个理想的选择。

方案 2:K210

K210 以其高性价比和快速处理速度著称，特别适用于快速图像处理和巡线任务。然而，它在运行时会产生较多的热量，且在图像清晰度方面存在限制，特别是在处理小尺寸光斑等需要高分辨率图像的应用场景中。这些限制可能影响其在更为精细的视觉任务中的应用。

在对比两种方案后，本系统选择采用 OpenMV。此决定基于 OpenMV 在高级视觉处理能力、环境适应性、图像质量及编程灵活性方面的优势。尽管 OpenMV 的成本较高，但其全面的视觉处理功能和与外部设备交互的能力使其成为本系统的理想选择。

2.4 控制算法的论证与选择

方案 1:模糊控制算法

模糊控制算法具有不需要事先知道对象的数学模型、系统响应快、超调小、过渡过程时间短等优点，但编程复杂，数据处理量大。

方案 2:增量式 PID 算法

采用增量式 PID，按比例、积分、微分的函数关系进行运算，然后将其运算结果用作输出控制的变化量。优点是控制精度高且算法简单明了，节约了单片机的资源和计算时间，且改控制方案不需要建立复杂的数学模型，鲁棒性强，简单易上手。

方案 3:开环控制

开环控制舵机，不引入任何反馈环节，直接控制舵机按照已有设定运动。开环控制实现较为方便，在机械结构稳固时较为精确。

综合考虑，本系统选择方案二和方案三配合使用。

3 设计方案

3.1 电路总体框图

运动控制系统的电路总体框图如图 1 所示，包含两个电源，电动势分别为 3.3 V 和 12 V，其中 3.3 V 电源为 OpenMV 供电，12 V 电源经过 RT8279 降为 5 V 之后为二维云台的两个舵机供电<sup>[6]</sup>，再经过 RT9013-33GB 降为 3.3 V 后给主控供电<sup>[7,8]</sup>，主控为其余模块供电，所有设备共地。

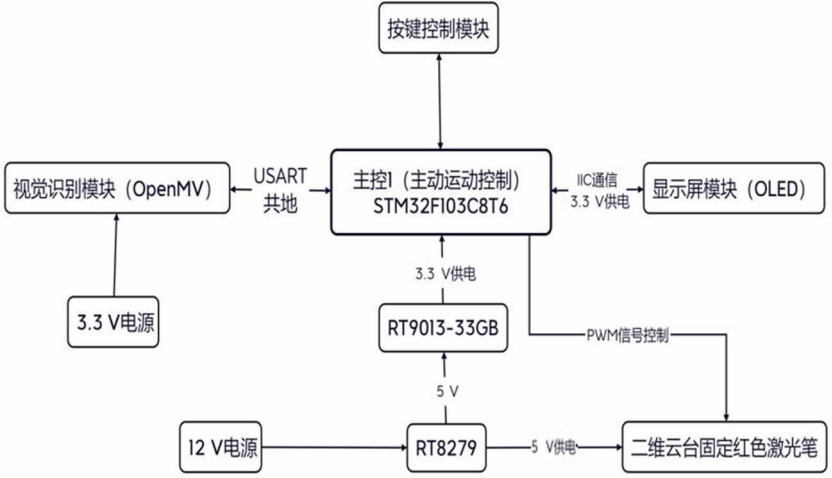


图 1 运动控制系统电路框图

自动追踪系统电路大体框架与运动控制系统类似，如图 2 所示，相比而言，多出了由 LED 与蜂鸣器构成的声光提示模块。

3.2 程序的设计

3.2.1 主控板程序功能描述与设计思路

运动控制系统可以通过按键实现控制系统的执行，有如下功能：

按键 1 切换模式，根据不同需求可选择不同模式，分别可以实现使激光笔光斑指向屏幕中央，控

制红色光斑在 50cm×50cm 的方框内沿指定路径移动，控制光斑沿所识别 A4 纸边沿运动。

按键 2 确认/退出当前选中模式，并在 OLED 屏幕上显示当前选择的模式。

按键 3 实现暂停功能。

自动追踪系统中按键有如下功能：

按键 1 切换模式，根据不同需求可选择不同模式，分别可以实现使激光笔光斑指向屏幕中央，复位追踪系统，开启追踪模式。

按键 2 确认模式,并在 OLED 屏幕上显示当前选择的模式。

按键 3 实现暂停功能。

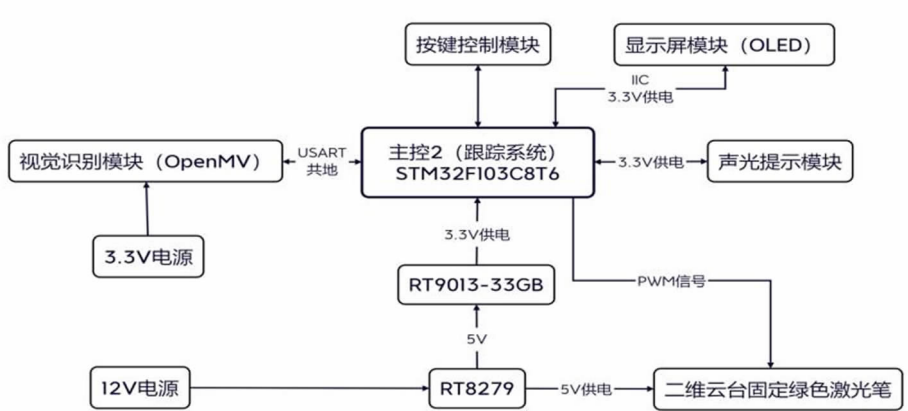


图 2 自动追踪系统电路框图

3.2.2 OpenMV 程序功能描述与设计思路

建立坐标系,获得红色光斑、绿色光斑以及目标位置的相对坐标,以串口的方式发送给主控板。

3.2.3 总体程序流程图

运动控制系统主控板的系统程序框图如图 3

所示。主控板在进行外设引脚初始化后复位云台,在串口中断中<sup>[9]</sup>接收 OpenMV 数据,通过读取按键值判断将要执行的功能。

自动追踪系统总体程序框图如图 4 所示。

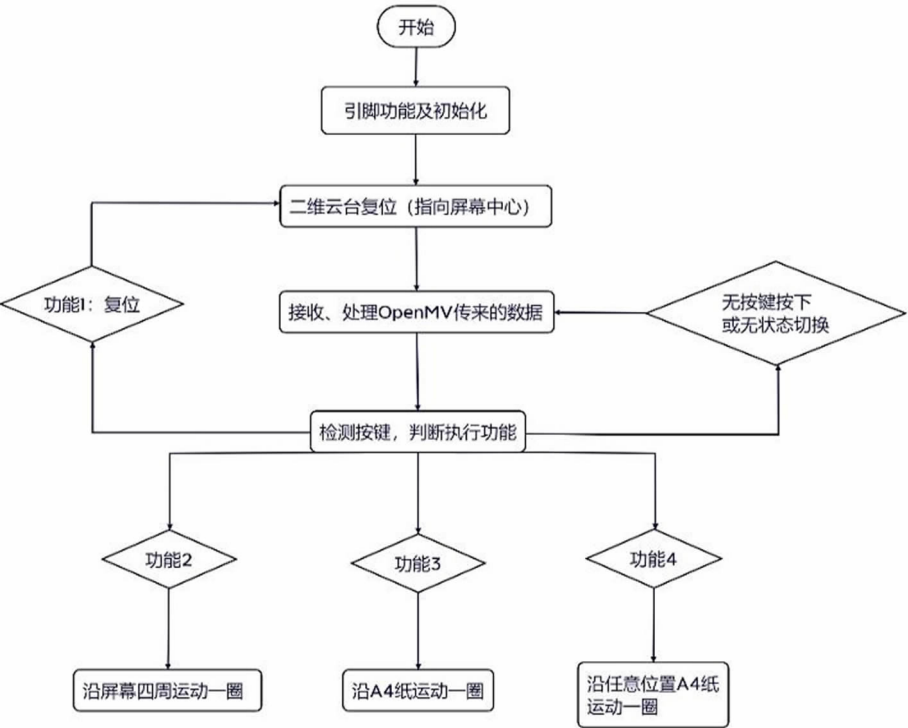


图 3 运动控制系统程序框图

3.3 运动控制原理

3.3.1 增量式 PID

增量式 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制是一种常用的控制算法,它在每次迭代中只计算控制量增量。与传统 PID 相比,增量式 PID 不直接输出控制量,而是输出控制量的变化

量。这种方法使得控制器能夜更加灵活地应对系统的动态变化。在增量式 PID 中,比例(P)、积分(I)和微分(D)三个部分分别计算当前误差、误差的累积和误差的变化率<sup>[10]</sup>,然后将这三部分的增量相加,用来调整控制输出。  
在本设计中,增量式 PID 的计算输出值作为

舵机 PWM 占空比的改变量。

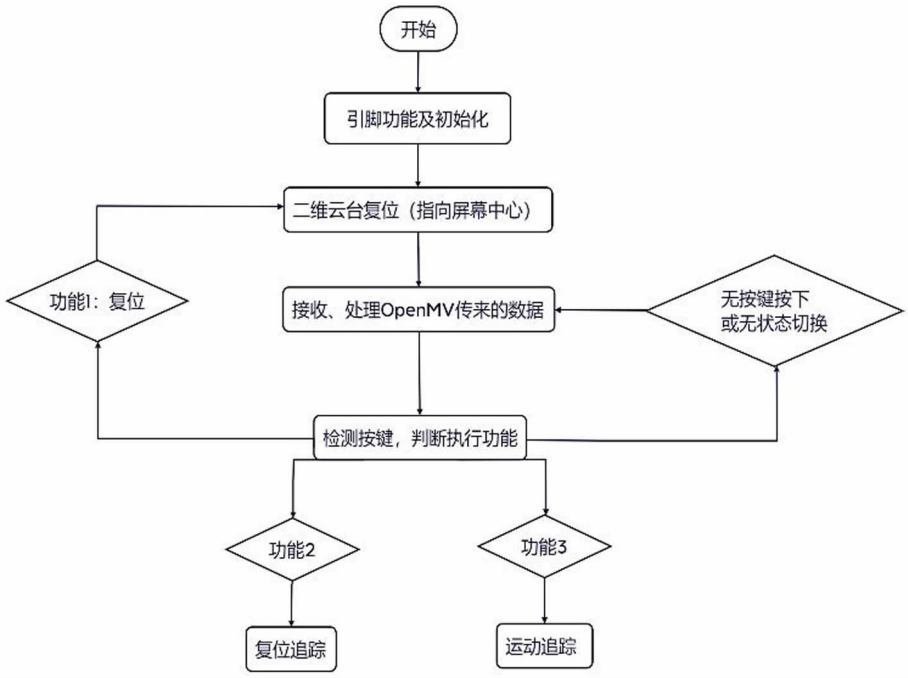


图 4 自动追踪系统程序框图

3.3.2 PID 控制框图

增量式 PID 控制二维云台运动如图 5 所示。其中目标值由不同的模式确定,并由 OpenMV 转换成目标坐标值后与红绿光斑当前位置一同发送

给主控板,作差后经过增量式 PID 的计算与叠加作为当前时刻的 PWM 输出值,从而控制二维云台的运动。

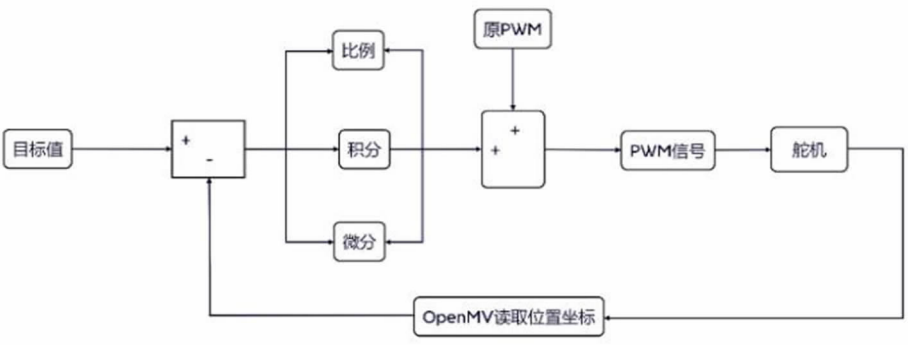


图 5 PID 算法控制框图

4 测试方案与测试结果

4.1 测试方案

机械结构调试:将运动控制系统的云台固定在距离屏幕 1 m 处,自动追踪系统的云台置于其左右任意位置,调整初始位置。  
软件调试:调整云台舵机参数初始化设定、PID 初始化参数,OpenMV 开始识别。

4.2 测试条件及仪器

检查电路连接,保证云台激光笔到屏幕的距离以及其他初始条件一致。

刻度尺用于量取激光笔光斑与目标中心点及边框线之间的距离;使用手机秒表计时。

4.3 测试结果及分析

4.3.1 运动控制系统测试

(1)按键控制红色激光笔指向屏幕中央,测量稳定后红色光斑与屏幕中心的距离,测试结果见表 1。

表 1 中心点偏差距离测试

| 实验次数  | 与中心点偏差距离/cm |
|-------|-------------|
| 第一次实验 | 1.55        |
| 第二次实验 | 1.39        |
| 第三次实验 | 1.62        |

结果分析:光斑可从任意位置初始化后回到中

心点,误差不超过 2 cm。

(2)红色激光沿方框运动,通过暂停按钮在偏差较大时暂停运动,测量最大偏差距离;不按暂停键,测量运动一周的时间。测试结果见表 2。

表 2 最大偏差与用时测试

| 实验次数  | 最大偏差<br>距离/cm | 转一圈<br>用时/s |
|-------|---------------|-------------|
| 第一次实验 | 1.52          | 26.7        |
| 第二次实验 | 1.81          | 27.1        |
| 第三次实验 | 1.03          | 28.0        |

结果分析:光斑可沿屏幕 1 mm 细线顺时针移动一圈,误差不超过 2 cm,用时在 30 min 内。

(3)红色激光沿选定位置 A4 纸边沿黑线运动,记录光斑脱离黑线的次数以及环绕一周所需的时间。测试结果见表 3。

表 3 固定位置脱离计数与用时测试

| 实验次数  | 脱离黑线<br>次数/次 | 转一圈<br>用时/s |
|-------|--------------|-------------|
| 第一次实验 | 4            | 5.52        |
| 第二次实验 | 1            | 5.62        |
| 第三次实验 | 3            | 5.65        |

结果分析:光斑可沿 A4 纸边框顺时针移动一圈,基本不脱离 1.8 mm 黑线,用时在 10 s 内。

(4)红色激光沿任意位置 A4 纸黑线,记录光斑脱离黑色的次数以及环绕一周所需的时间。测试结果见表 4。

表 4 任意位置脱离计数与用时测试

| 实验次数  | 脱离黑线<br>次数 | 转一圈用时/s<br>(含初始化时间) |
|-------|------------|---------------------|
| 第一次实验 | 5          | 24.18               |
| 第二次实验 | 7          | 23.99               |
| 第三次实验 | 4          | 21.30               |

结果分析:光斑可沿 A4 纸边框顺时针移动一圈,基本不脱离 1.8 mm 黑线,用时在 30 min 内。

4.3.2 自动追踪部分测试

(1)绿色激光复位追踪:红色激光笔指向屏幕中央的过程中,控制绿色激光笔的光斑进行追踪,测量绿色激光笔指向红色光斑位置的时间以及稳定时两者的误差。测试结果见表 5。

表 5 追踪静止点用时测试

| 实验次数  | 红色光斑复位过程中绿色<br>光斑追踪所用时间/s | 距离/cm |
|-------|---------------------------|-------|
| 第一次实验 | 0.83                      | 1.89  |
| 第二次实验 | 0.85                      | 1.98  |
| 第三次实验 | 0.53                      | 1.50  |

结果分析:在运动控制系统控制云台复位后跟踪系统能在 2 s 内追踪到红色光斑,两者稳定后间距基本不超过 2 cm,同时发出声光提示。

(2)绿色激光运动追踪:运动控制系统控制红色激光笔光斑沿 A4 边沿黑线运动,启动自动追踪系统,测量追踪一圈的总用时;通过暂停按键,测量出两色光斑中心间距的最大值。测试结果见表 6。

表 6 追踪运动点移动一圈时间及最大偏差距离测试

| 实验次数     | 追踪用时/s(第一组为自定位置,<br>第二组为任意位置) | 距离/cm |
|----------|-------------------------------|-------|
| 实验一第 1 次 | 24.25                         | 1.81  |
| 实验一第 2 次 | 24.15                         | 2.10  |
| 实验一第 3 次 | 23.39                         | 1.93  |
| 实验二第 1 次 | 21.98                         | 1.87  |
| 实验二第 2 次 | 22.01                         | 1.85  |
| 实验二第 3 次 | 24.33                         | 1.91  |

结果分析:在红色光斑寻线运动过程中,自动追踪系统在 2 s 内追踪成功,且追踪成功之后发出声光提示,两光斑的间距始终不超过 3 cm。

5 结 论

本项目成功设计并实现了一款创新的系统,能够精确控制和自动追踪动态目标,特别是激光笔光斑。系统由机械结构和高级控制系统组成,核心技术包括 TM32F103C8T6 单片机、OpenMV 视觉检测模块以及二维云台,结合增量式 PID 算法实现动态目标的追踪。该系统展现了高精度控制和快速响应能力,并具有强大的抗干扰性能,能够实时识别和追踪目标。此设计在电子和机械工程领域展示了创新性,并体现了精确控制在实际应用中的重要价值。

参考文献

[1] 李文心. 基于视觉的目标跟踪控制系统研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.

[2] 孙训红,都海波,陈维乐,等. 基于移动机器人机载视觉云台的有限时间目标跟踪控制[J]. 控制与决策,2023,38(10):2875—2880.

[3] 刘义亨,董梦超,黄家才,等. 基于 OpenMV 的目标跟踪系统设计[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2019,17(1):39—44.

[5] 韩立立,刘晓然,刘文杰,等. 基于 OpenMV 的智能交通灯系统设计[J]. 微型电脑应用,2023,39(11):22—26.

[5] 李加定,缪文南. 基于 OpenMV 的智能送药小车的设计[J]. 电子设计工程,2024,32(2):162—166.

[6] 程亮,赵子龙. 单片降压型 DC-DC 转换器的控制电路设计[J]. 电子器件,2020,43(1):205—209.

[7] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2015.

[8] 闫石. 数字电子技术基础[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2005.

[9] 张泊宁,杜忠华,鲍科. 基于机器视觉的二轴云台的目标跟踪设计[J]. 电子设计工程,2019,27(12):152—157.

[10] 陆聪,张北伟. 基于 STM32 三轴云台控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2019,38(9):75—78.