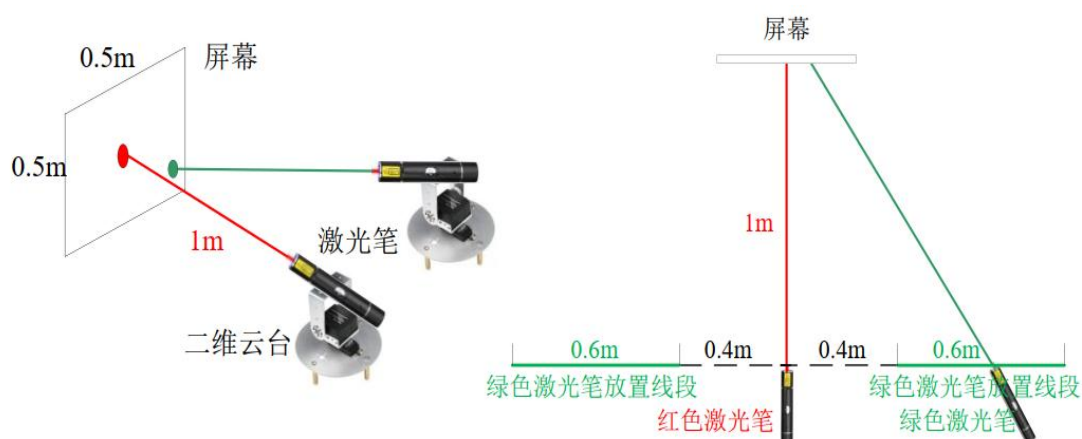


题目：运动目标控制与自动追踪系统（E 题）

摘 要

本系统由运动目标控制系统和自动追踪系统两个分系统组成。采用 **OpenMV** 和云台舵机作为控制部分。同时，系统有不同的按钮开发模块，通过不同的按键操作可以实现复位、绕线、循迹、静态追踪与动态追踪功能，并设置的声光提醒。

系统首先应用**二值化**将视觉图像预处理，通过检测区域阈值变化判定红光位置，并通过**几何定位**、**速度分解**分别实现复位、绕线循迹。此外，系统对串口实现了**按键开发**功能，从而实现红光、绿光的复位和追踪控制。同时，应用 **PID 控制算法**对红光进行双态追踪，追踪成功后会有**声光提示**功能。



关键词：控制系统 自动追踪 数字式 PID OpenMV 按键开发

1. 系统方案

整个系统主要由运动目标控制模块与自动追踪模块构成。为了实现运动目标控制与自动追踪系统的功能，我们设计了几种不同的方案并进行论证。

1.1 方案分析与选择

1) 机器视觉测距方案

机器视觉测距是通过图像处理和计算来估计物体与摄像头之间的距离。通过传统几何算法完成机器视觉测距，将各物体的位置抽象为空间几何关系，建立方程得到位置参数关系。利用 OpenMV 测得的距离及已知的物体长度列等式，从而求得空间距离。

2) 屏幕边线运动控制系统

方案一：采用直接控制法。通过直接调节顶点参数，控制红色光斑沿着四个已知顶点转动。

方案二：采用机器视觉识别边框。通过机器视觉调节，识别出边框位置，并控制云台沿边框移动。

方案比较：

方案一设置方法较简便，但程序固定，不具有普适性；

方案二运动更准确且能适应不同环境下变化，但识别铅笔线框对设备及光照等要求过高，根据已有实验条件难以实现。

方案一完成的系统符合本题运动要求，故采用方案一。

3) 靶纸边缘运动控制系统

要完成实验要求中沿胶带运动一周的目标，因题目对摆放存在任意性的要求，靶纸的边框约 1.8cm 宽且为黑色，与屏幕的色差明显，受光照影响小，通过二值化机器容易识别，故采用机器视觉识别靶纸边框的方法。

方案一：引入数字式 PID 运动。利用摄像头识别到边框的四个顶点，在运动过程中，通过摄像头传输的红色光斑与靶纸边缘的相对位置信息，控制舵机云台使红色光斑绕靶纸运动。

方案二：采用实时观察光斑偏移量的方法。始终获取靶纸四个边框的位置信息，并控制光斑固定步长，时刻以微小的角度运动，当光斑与边框的偏移量超出预设值，则根据情况做出实时修正。

方案比较：

方案一操作思路明确、计算量小、光斑移动速度快，但运动精度低且舵机的控制难度大；

方案二可通过减小步长提高精度，对舵机控制难度小。

两种方案均理论上可行，但都测试后，方案一虽然光斑运动速度快且基本贴合运动状态，但运动过程中误差过大，无法满足不脱离黑色胶带的题目要求。而方案二通过减小步长与重复判断提高光斑运动的精度，可以满足题目要求，故最终选择方案二。

1.2 总体方案论述

1) 运动目标控制系统

其中，运动目标控制模块的总体框图如图 1-1 所示。

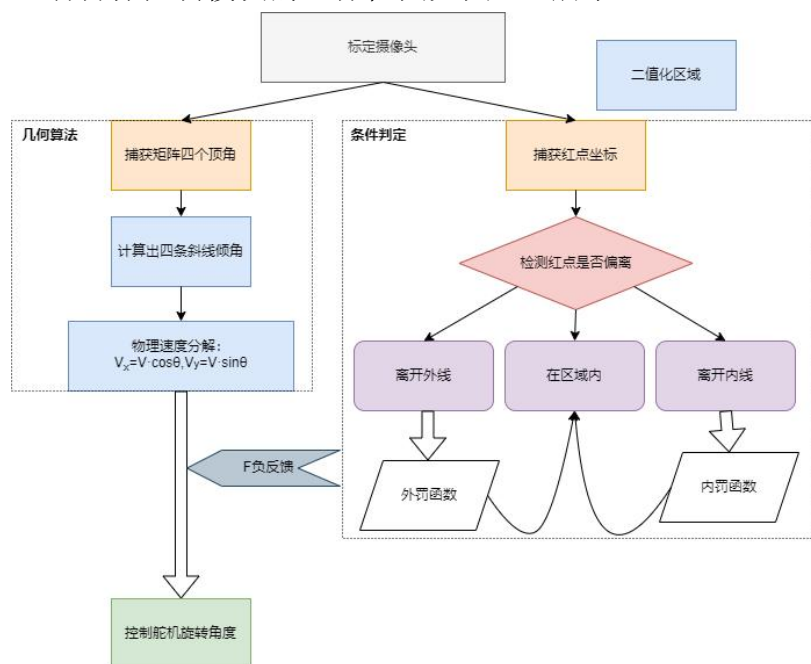


图 1-1 运动目标控制模块框图

系统呈现为将以 OpenMV 摄像头为核心的视觉模块与分别水平、垂直两个舵机相连接，通过传输处理后的视觉数据控制舵机运动，完成实验要求。

通过设置舵机云台的位姿参数完成复位功能，并通过确定光斑位于四个顶点的位姿参数，以直接定位的方式完成绕屏幕的顺时针运动。要完成绕任意角度靶纸运动，首先利用 OpenMV 传输的信息获取红色光斑与黑色电工胶带的位置，从而控制光点从顶点沿靶纸边固定步进，并实时调整偏离量完成绕靶纸的运动。

2) 自动追踪系统

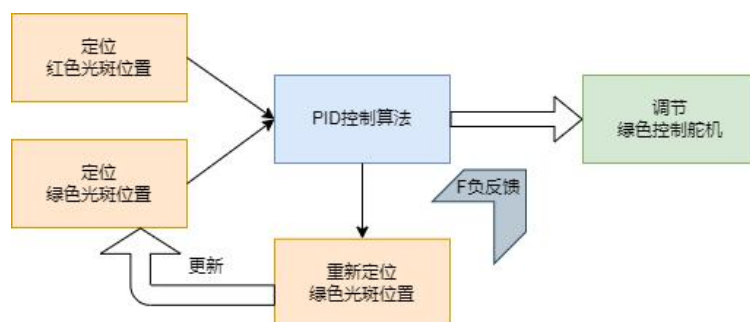


图 1-2 运动目标控制模块框图

如图 1-2，系统采用 PID 控制算法，使红绿两色光斑的位置差不断减小。

2. 理论分析与计算

2.1 理论分析

本题中的相机定位可抽象为利用单目相机的视觉室内定位技术模型。本系统中，单目相机基于小孔成像原理进行工作。

2.1.1 相机定位原理

在小孔成像模型中，各种坐标系的建立与转换占据重要的位置。

以相机光心 O_c 组成的坐标系成为相机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 。以光心在像平面投影 O' （图像平面中心）为原点的坐标系称为图像坐标系 $O'xy$ 。以图像平面左上角为原点的坐标系称为像素坐标系 Ouv 。物体在真实世界中的坐标能够用世界坐标系描述为 $O_w x_w y_w z_w$ 。

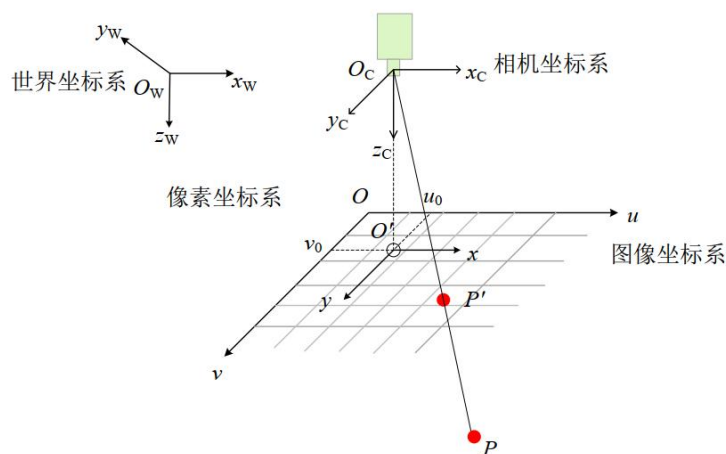


图 2-1 坐标系模型示意图

相机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 和世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ 之间的转换关系如图 2-1 所示。基于坐标转换原理，能够得到：

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

其中， \mathbf{R} 表示旋转矩阵， \mathbf{t} 表示平移向量。

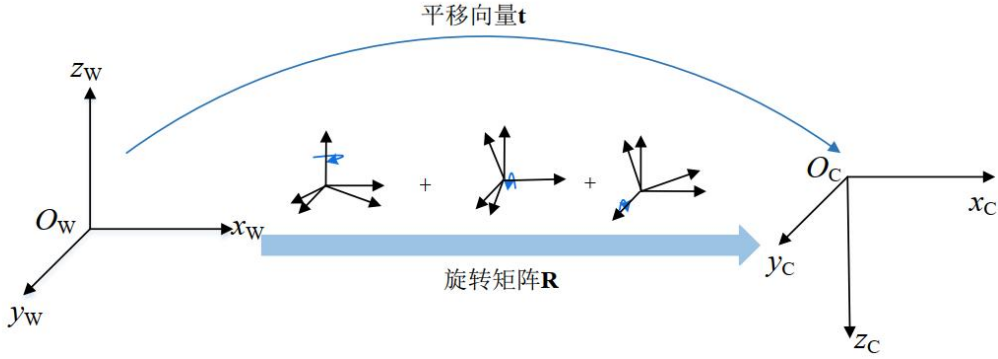


图 2-2 三维坐标系间的旋转和平移关系

能够得到空间点与像素点之间的对应关系，表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_3^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \mathbf{P} = \frac{1}{z_c} \mathbf{K} \mathbf{P} \quad (2-2)$$

其中， \mathbf{K} 为相机的透视投影矩阵。 \mathbf{K}_1 为相机的内参矩阵， \mathbf{K}_2 为相机的外参矩阵。对相机的内参矩阵和外参矩阵进行标定之后，能够获得空间中任意一点 $P(x, y, z)$ 对应像素坐标 (u, v) 。

2.1.2 运动控制原理

单片机控制系统通过 A/D 电路检测输出值 S ，并计算偏差 e 和控制变量 y ，再经 D/A 转换后输出给执行机构，从而实现缩小或消除输出偏差的目的，使系统输出值 S 稳定在给定值区域内。在计算机控制过程中，整个计算过程采用的是数值计算方法，当采样周期足够小时，这种数值近似计算相当准确，使离散的被控过程与连续过程相当接近。

本系统采用位置式 PID 控制算法，算法公式如下（2-3）式。

$$u_k = K_p [e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T}] \quad (2-3)$$

其中， T 为采样时间。

2.2 数值计算

2.2.1 PID 稳定性分析

对于 PID 控制器的稳定性分析，我们可以考虑系统的闭环传递函数，并

应用根据控制理论的稳定性判据进行分析。假设我们有一个标准的 PID 控制器，闭环系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p + K_i/s + K_d \cdot s}{1 + G_p \cdot (K_p + K_i/s + K_d \cdot s)} \quad (2-4)$$

其中， K_p 为比例增益， K_i 为积分增益， K_d 为微分增益， G_p 为被控对象（系统）的传递函数。

稳定性判据：对于控制器的稳定性分析，我们关注闭环系统的极点位置。如果所有的极点位于左半复平面，系统就是稳定的。否则就是不稳定的。

经判断，PID 控制系统的极点均在左半复平面，系统稳定。

2.2.2 斜向运动参数设置

要完成任意倾角的靶纸绕周运动，需设置水平舵机及垂直舵机运动速度关系。示意图如下图 2-4。

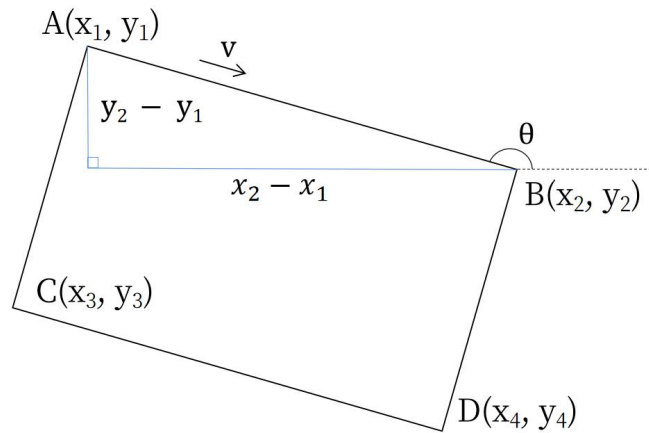


图 2-4 斜向靶纸运动示意图

由几何关系可得两舵机运动速度关系如下式（2-5）。

$$\begin{aligned} \frac{v_y}{v_x} &= k = \tan\theta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\ \Rightarrow v_y &= v \sin\theta, v_x = v \cos\theta \end{aligned} \quad (2-5)$$

3. 电路与程序设计

3.1 电路设计

3.1.1 系统框图

根据以上的方案论证与比较，完成电路示意图 3-1：

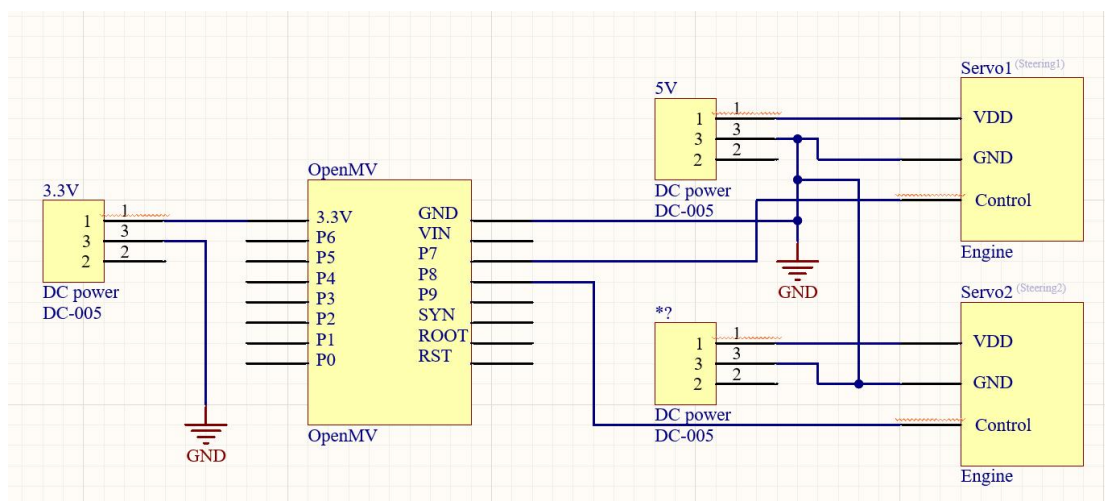


图 3-1 运动目标控制系统电路图

其中，电路中使用三个锂电池盒为各器件提供直流电压信号，OpenMV 识别运动状态，并根据所编写程序分析位姿调整方式，并分别调节两个舵机（水平、垂直）的运动状态，并使用面包板达到器件共地的效果。

3.1.2 功能模块设计

在所设计的系统中，主要设计了摄像头模块、激光模块、舵机云台模块和供电模块四个模块，各模块分别达到特定的功能。

表 3-1 系统功能模块

电子模块	功能
激光模块	发射红绿两色光斑
摄像头模块	获取红绿两色光斑及靶纸的位置
舵机云台模块	调节云台以调整光斑或摄像头
供电模块	提供直流信号

3.2 程序设计

3.2.1 运动目标控制模块

本模块中，程序主要完成机器视觉的处理与对舵机的控制。

OpenMV IDE 读取 OpenMV 摄像头所获取的视觉信号，并通过调整阈值，完成对视觉信号的二值化处理，分别完成对红色激光点的捕捉与对 A4 纸黑色边框的获取，从而获得舵机云台位姿的偏差量。通过在程序中进行公式计算，得到舵机云台需要调整的量，完成云台角度的匹配。

注：代码详见附录。

3.2.2 自动追踪系统模块

本模块中，程序主要完成对红绿两色光斑的识别，包括图像处理、PID 参数调整以及控制动作执行。

1. 图像处理和目标检测。使用阈值化技术，以确定红光和绿光的中心位置。
2. PID 参数调整。调整 PID 参数，以实现稳定的跟踪和快速的收敛性。
3. 控制执行。根据计算得到的控制信号，执行相应的动作来调整绿光的位置。
4. 调试控制器稳定性。测试并调整参数，优化系统性能。

注：代码详见附录。

4. 测试方案与测试结果

4.1 测试方案

1) 基本部分测试

- a. 摆放好各器件位置后，联通各回路，轻按按钮 1，观察红色光斑复位状况，并测量复位后的红色光斑与中心的误差值；
- b. 长按按钮 1 至指示灯亮，观察红色光斑运动状况，检查红色光斑是否在规定时间内按指定方向完成绕周，且偏移量小于 2cm；
- c. 在屏幕上张贴水平 A4 靶纸，轻按按钮 2，观察红色光斑绕 A4 靶纸运动状况，检查红色光斑是否能在在规定时间内按正确方向完成绕周，且不脱离靶纸边缘黑色胶带；
- d. 在屏幕上分别以较小倾角与较大倾角张贴 A4 靶纸，观察红色光斑绕周情况，检查红色光斑是否能在在规定时间内按正确方向完成绕周，且不脱离靶纸边缘黑色胶带；

2) 发挥部分测试

- a. 摆放好各器件位置后，将红色光斑复位，并轻按按钮 3 启动自动追踪系统，观察绿色光斑是否在 2 秒内追踪到红色光斑，且在成功时发出连续声光提示；
- b. 轻按按钮 2 的同时启动自动追踪系统，启动红色光斑绕周运动控制系统与自动追踪系统，观察绿色光斑追随红色光斑的状态；
- c. 检查运动过程中运动目标控制系统和自动追踪系统暂停键的使用，并检查绿色光斑追随红色光斑过程中是否满足光斑距离小于 3cm。

4.2 系统性能概览

1) 测试结果

测试中，分别将 A4 靶纸向不同方向倾斜不同角度，并反馈运动状态，得到下图。图中，红色散点反应红色光斑运动状态，灰色区域为黑色电工胶带区域。

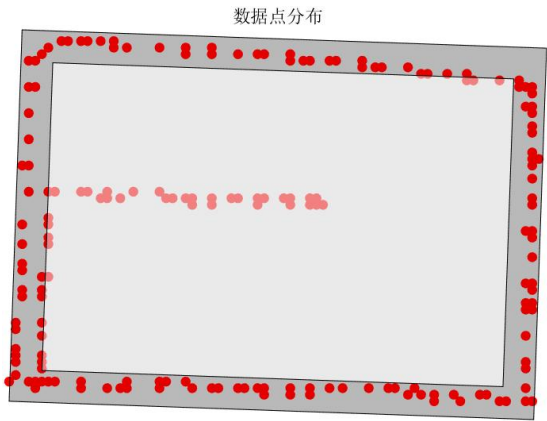


图 4-1 靶纸右倾微小角度的运动控制反馈

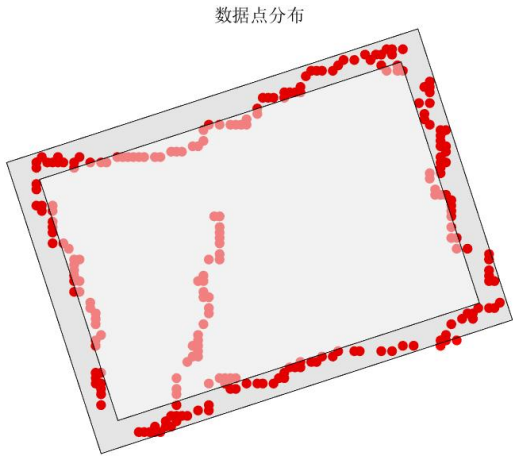


图 4-2 靶纸左倾明显角度的运动控制反馈

2) 性能记录

表 4-1 系统性能测试记录结果

测试项目	测试结果	测试项目	测试结果
红色光斑复位偏差值	0.12cm	红色光斑绕行屏幕一周时间（10 次取均）	21.3s
绕水平靶纸一周时间（10 次取均）	17s	绕水平靶纸一周偏离次数（10 次取均）	0 次
绕较大倾角靶纸一周时间（10 次取均）	24s	绕较大倾角靶纸一周偏差次数（10 次取均）	0.3 次
追踪静止红色光斑时间（10 次取均）	1.73s	暂停运动时两色光斑距离（10 次取均）	2.78cm

4.3 改进措施

1. 在 A4 靶纸倾斜时，红色光斑绕周时存在较大误差。原因是两个 180° 数字舵机无法完成同步转动，以至难以控制红色光斑以平滑斜线运动。可以通过将两个 180° 数字舵机更换为模拟舵机，以控制光斑向任意方向转动；
2. 摄像模块的精度偏低，无法精准捕捉光斑与黑色电工胶带的绝对位置，可通过提高摄像头的配置或摄像模块信息处理的性能，以提高程序处理精度。

附录

A 产品说明

a. 摄像模块

星瞳 OpenMV4 H7 Plus 500W 高清智能摄像头

b. 激光模块

红色激光模组：3V 激光二极管

发射功率：150mW	出光功率：<5mW
标准尺寸：Φ 6 * 10.5	供电电压：3VDC
工作寿命：1000 小时以上	工作电流：<40mA
光斑模式：点状光斑，连续输出	工作温度：-36℃~65℃
激光波长：650nm（红色）	贮存温度：-36℃~65℃
光点大小：15 米处光点为 Φ 10mm~ Φ 15mm	

绿色激光模组：绿光点状激光头激光二极管 6MM 直径激光管

激光波长：520nm 绿光	工作电压：支持 3V~5V
工作电流：<250MA	工作模式：ACC 恒电流电路
输出功率：10mw	光点大小：10 米处 Φ 15
工作温度：-10℃~+70℃	储藏温度：-20℃~+80℃
外形尺寸：Φ 6 × 10.5mm	

c. 舵机云台模块

简易版 2 自由度电动云台

产品型号：LD-1501MG 金属数字舵机	堵转扭矩：13kg: cm 6V 15kg: cm 6. 5V 17kg. cm 7. 4V
工作电压：6-8. 4V	转动速度：0. 16sec/60° 7. 4 V
空载电流：100mA	堵转电流：2. 4A~3A
控制方式：PWM 脉宽控制	舵机精度：0. 3°
产品尺寸：54*20*46mm	PWM 脉宽范围：500~2500us

d. 串口调试模块 Arduino Uno

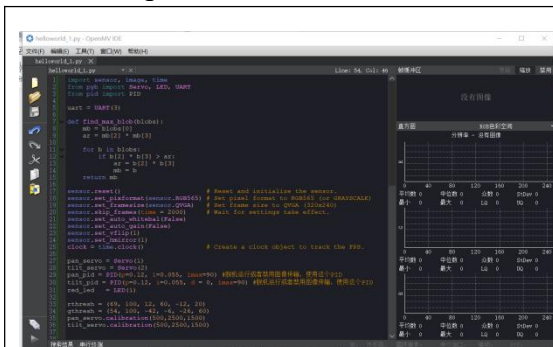
B 程序调制

1) Arduino IDE 程序

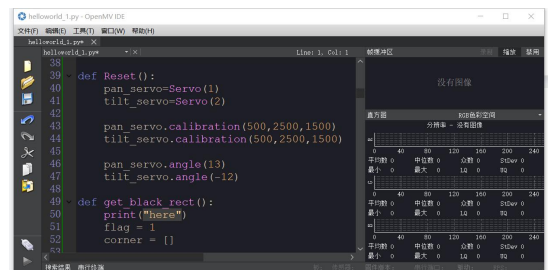


附图 1 按钮串口调试程序

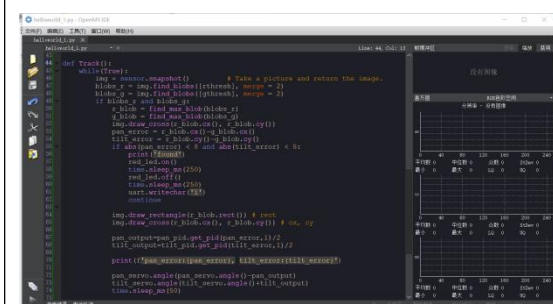
2) OpenMV IDE 程序



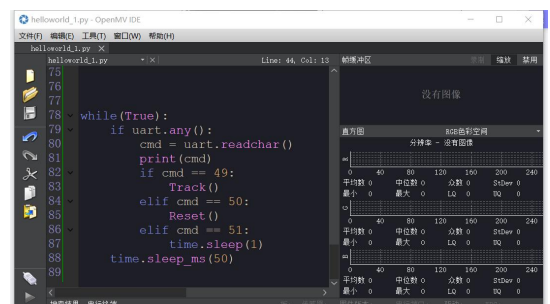
附图 2 机器视觉二值化程序



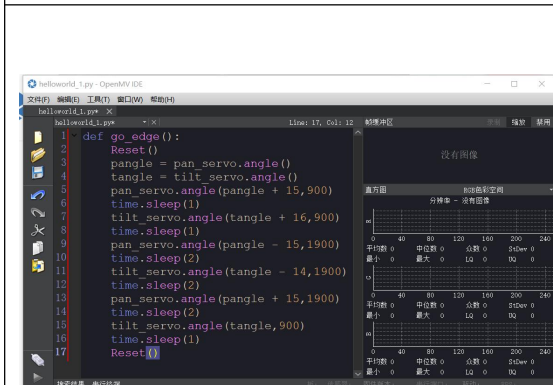
附图 3 红色光斑复位函数



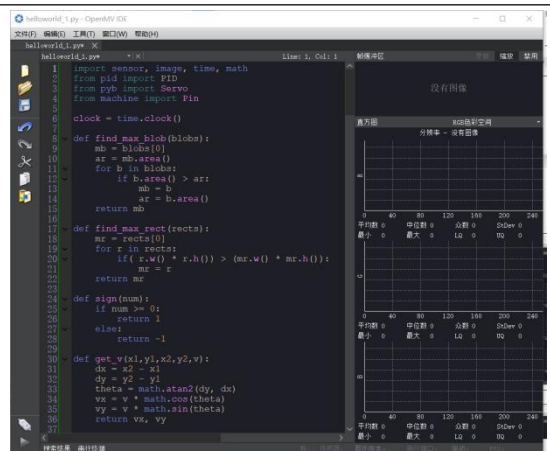
附图 4 绿色光斑跟随函数



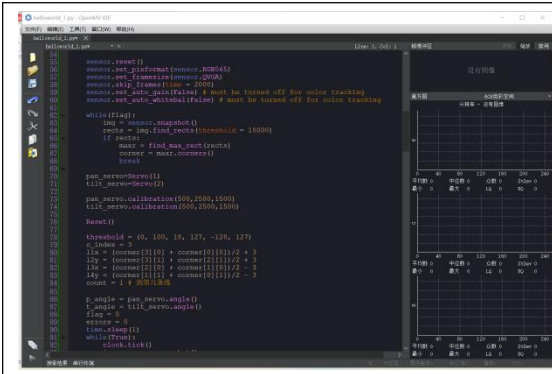
附图 5 监听用户行为程序



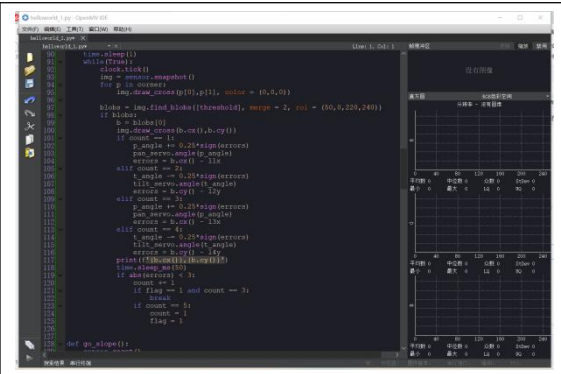
附图 6 绕屏幕转动函数



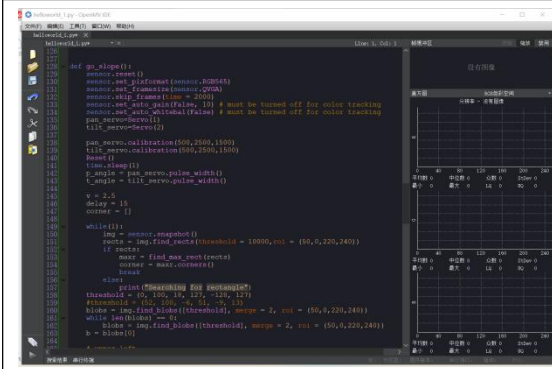
附图 7 寻块及寻点函数



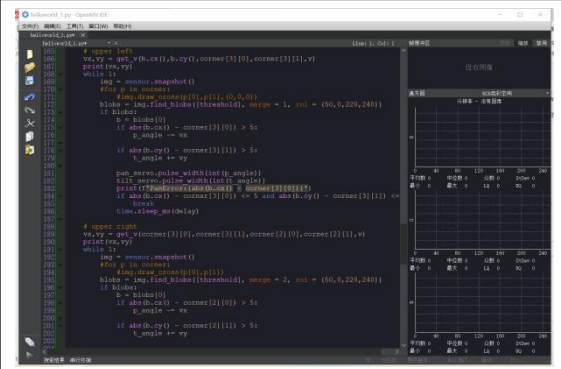
附图 8 绕靶纸转动准备程序（1）



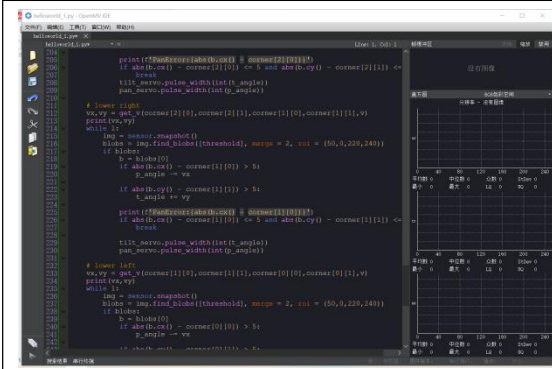
附图 9 绕靶纸转动准备程序（2）



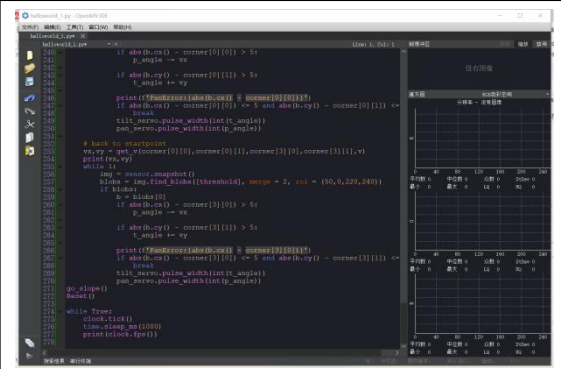
附图 10 绕靶纸转动函数（1）



附图 11 绕靶纸转动函数（2）



附图 12 绕靶纸转动函数（3）



附图 13 绕靶纸转动函数（4）

C 参考文献

- [1]孙艾霞. 基于小孔成像的智能机器人单目视觉初步测距测高模型研究[D]. 内蒙古农业大学, 2021. DOI: 10. 27229/d. cnki. gnmnu. 2021. 000492.
- [2]叶晗鸣, 阮洪浩, 王逍遥. 基于机器人的对接位姿视觉测量系统标定研究[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(01): 9-12.
- [3]贾爽. 基于单目视觉的室内定位关键技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022. DOI: 10. 27061/d. cnki. ghgdu. 2022. 000391.
- [4]历风满. 数字PID控制算法的研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2005(04): 85-88.