

## 摘 要

本系统旨在设计并制作运动目标控制与自动追踪系统，完成对红色激光的精确定位与运动控制，以及自动追踪功能的优化。系统利用摄像模组采集图像，经过一定图像处理方法，对红色光斑的目标路径进行快速识别与坐标标定。运动控制系统通过硬件的精确组装和系统建模的方式，建立了图像位置与云台角度的非线性映射关系，配合摄像头捕获的坐标信息，实现了实时识别和准确控制。在舵机云台的控制中，进行坐标解算和路径插值处理，使系统具有良好的性能。光斑追踪系统通过硬件曝光调整、图像处理与色彩捕捉，精准识别激光点位差，进而采用离散位置式 PID 算法，加快光斑追踪的动态响应率与静态精准度。本方案通过反复仔细调试系统参数，最终实现题目要求。

**关键词：**坐标解算，图像处理，轨迹识别定位，自主跟踪，PID

# 运动目标控制与自动追踪系统（E 题）

## 【本科组】

### 一、系统方案设计与论证

#### 1.1 方案设计目标

该方案设计目标为：实现一个运动目标控制与自动追踪系统，其中红色激光笔为运动主体，能够按照题目要求在屏幕上准确移动并能够回到原点，而绿色激光笔则需要自动识别轨迹并追踪红色光斑，以确保两光斑中心距离在规定范围内，从而实现精确控制与自动追踪功能。

#### 1.2 系统基本方案

##### 1.1.1 控制方案设计

根据题目要求，本系统应由两套相互独立的二维电动云台控制系统及其附件组成。其一为红色激光控制系统，使用 Mega2560 主控接收来自视觉模块 OpenMV 的矩形路径识别结果并控制云台。发挥部分使用 OpenMV 直接控制云台追踪红色激光。

##### 1.1.2 机械结构方案设计

根据题目要求，此运动目标控制与自动追踪系统需要自主设计白色屏幕以显示红绿色激光轨迹，考虑到屏幕的倾角以及云台的纵向高度会极大的影响到激光在屏幕上的位置，导致其可能超出误差范围，所以我们选择采用铝型材作为屏幕固定装置。铝型材 3D 图及截面数据图如图一所示。在 60cm\*80cm 的磁吸白板上覆盖一层白纸，将其嵌入固定进铝型材凹槽中，并用铅笔画出 50cm\*50cm 的边框及中心点。为确保红外激光笔位置距离白板 1m，我们使用 1m 长的铝型材标定激光笔和屏幕的距离，并在搭载红外激光笔的云台两侧各增加了 1m 的铝型材并加装亚克力板来放置搭载绿色激光笔的云台。其中设置一块亚克力板可移动，方便搭载绿色激光笔云台移动。模型图及全结构实体图见图二。

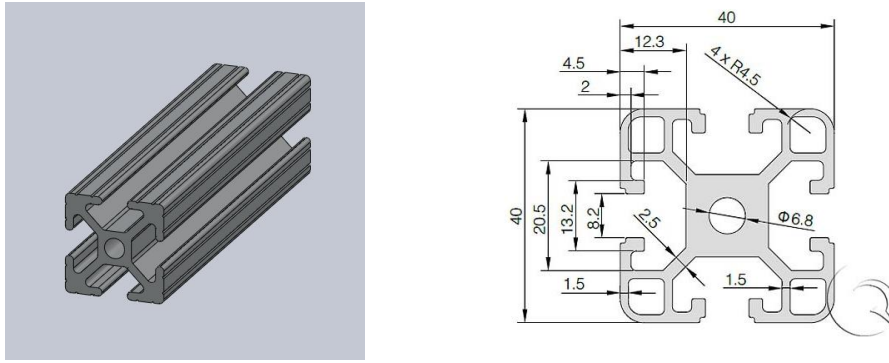


Figure 1 系统构建材料图

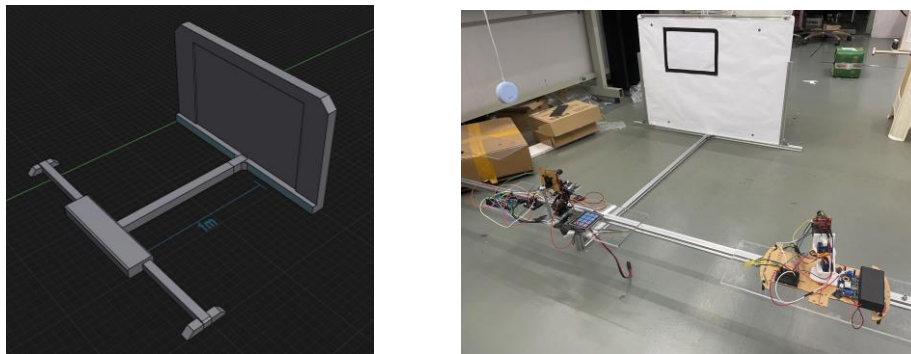


Figure 2 系统模型图与现场图

## 1.2 主要方案论证及选择

### 1.2.1 控制模块的选择

本队采用 Arduino Mega2560 开发板。Arduino 开发板配有专用 IDE，库函数及相关算法资料丰富，且调用库函数有利于节省代码编写时间。Mega2560 开发板具有 54 个数字输入输出引脚，满足系统所需的外设链接需求。同时，具有 16 个模拟输出引脚，4 个 UART 硬件串行接口，以及 16 MHz 晶振。其中内置的 Timer 可以同时控制最多 48 路舵机，PWM 信号输出稳定，硬件资源丰富，满足设计需求。

### 1.2.2 视觉定位模块的选择

视觉模块较为丰富，各有所长，因此我们进行了方案的探讨论证。

方案一：采用嘉楠科技 K210 MaixBit 模块。Maix Bit 开发板使用了 RISC-V 内核的 AI 芯片 K210，该芯片带有独立 FPU 的双核处理器，可以完成识别红色和绿色激光头的的需求。但是，K210 模块在神经网络方面的表现较为出色，而传统图像处理功能表现稍欠。因此，K210 可能与题目的匹配性较弱。

方案二：采用星瞳科技支持 MicroPython 的机器视觉模块 OpenMV，结合曝光可调节光学摄像头，进行多种机器视觉应用。OpenMV 集成了开源图像处理算法，其库函数丰富，使用方法灵活，板上外设功能稳定。尽管 OpenMV 没有自带 LCD 显示屏，但是其配套的可安装拓展板决定其在云台上的安装更加方便和牢固，在本赛题下硬件设备的稳固是参数准确的重要前提保证。

综合考虑，为了更好地实现功能，选择方案二。

## 二、系统理论分析与计算

### 2.1 坐标转换及定位算法分析

基础部分要求之中，红色激光的运动可分为三类：回归中心点，绕 50\*50cm 边线巡线，A4 靶纸黑色电工胶带巡线。准确控制红色激光的运动，需要明确舵机转动角和屏幕坐标的对应关系，因此，我们对系统进行数学建模，还原实际物理架构，并推算二维平面坐标与舵机转角坐标映射的函数。

物理模型搭建：考虑到实际情况激光头在屏幕上的投影并非在屏幕正中心，而且二维云台的舵机上电恢复的初始位置会对激光笔的俯仰角和转向角产生很大的误差，所以在人工搭建实际模型时，尽量将屏幕垂直与地面并使载有红色激光笔的云台正对屏幕中轴线，将云台和激光笔固定在一起后，将二维云台复电，此时的两舵机位置为  $(90^\circ, 90^\circ)$ ，手动调节云台水平转向角使得屏幕中的激光点位于屏幕中轴线上，将此位置固定作为默认位置建立模型求解。以屏幕中心点为原点，以屏幕右上为正方向建立屏幕的平面坐标系，下图为云台发射激光落在屏幕上的三维模型图。

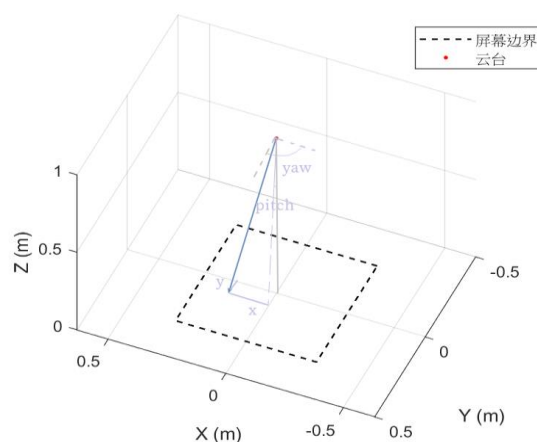


Figure 3 坐标解算

收集数据：采集激光点走直线的舵机转角数据，汇总后与屏幕坐标一一对应，利用 Matlab 程式中自带的 fitlm 拟合线性回归模型，进行线性回归预测：

		Estimate	SE	tStat	pValue
1	(Intercept)	0	0	NaN	NaN
2	x1	0.6737	1.8720e-04	3.5987e+03	2.0859e-250
3	x2	-0.0093	1.0916e-04	-84.8625	7.9703e-93

		Estimate	SE	tStat	pValue
1	(Intercept)	0	0	NaN	NaN
2	x1	0.6380	1.1328e-04	5.6323e+03	2.8130e-269
3	x2	0.0396	1.9425e-04	203.9230	1.5815e-129

Figure 4 模型数据

上图为激光点走水平和竖直直线的拟合结果，系数的标准误差值很小，通过 estimate 的值（变量前系数）可以确定对应函数关系表达式。

误差分析与修正：舵机在默认位置转动时若转动角较小会产生一些不可避免的机械误差，而且控制激光走水平线时，假设从 (0, 0.25m) 到 (0.25m, 0.25m) 时由空间几何推算可知会有接近一度的俯仰角差值。下图可见舵机返回角度值的实测结果：

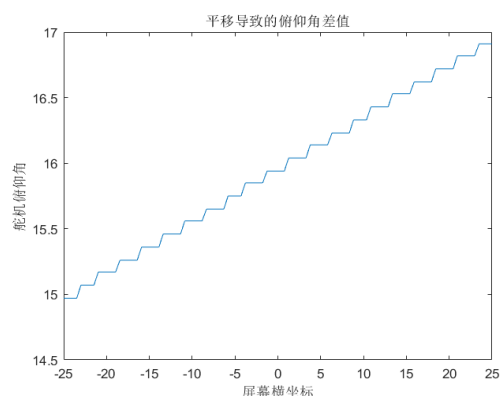


Figure 5 舵机返回角度值实测结果

经过实际测验，发现通过三角函数推算理论转动角度的效果并不好，并且整体趋向于越接近中心点距离差距越大的趋势，故采用参数修正，在表达式中引入  $\exp(-\lambda x)$  来修正误差，实际测验发现，误差减小明显。

## 2.2 矩形路径识别算法分析

红色激光控制系统使用 OpenMV H7 模块进行矩形路径识别。板载摄像头采集图像后，通过图像处理降低干扰，寻找黑色色块区域并选取面积最大者，确定为 ROI（关注区域）。然后，对区域进行线条查找与形状检测，锁定矩形四边并计算得出矩形四顶点

像素坐标值。在此之后，通过对屏幕区域进行坐标化划分，将像素坐标与系统模型坐标进行映射，进而将目标矩形在系统所建立的模型中进行精准定位。

## 2.3 激光点追踪算法分析

在光斑位置追踪系统中，首先通过图像识别算法确定两光斑位置差。此跟踪过程的细节见下文程序设计与分析。

位移误差确定后，利用此误差，使用 PID（Proportional-Integral-Derivative）算法进行闭环分析，求得对云台舵机的相关控制量，以实现精确追踪目标。PID 算法是一种反馈控制算法，它通过对光斑位置误差的比例、积分和微分进行加权求和，来调整云台的控制角度，使得光斑能够准确地跟踪期望位置。PID 算法表达如下：

$$K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

比例（P）：比例控制用于根据光斑位置误差来产生一个与误差成正比的控制量。当光斑偏离目标位置较远时，比例控制会产生较大的控制量，以加速云台的转动，使光斑更快地接近目标位置。

积分（I）：积分控制用于消除系统的稳态误差。它对光斑位置误差进行积分，以消除系统长时间偏离目标位置的恒定偏差。

微分（D）：微分控制用于抑制系统的振荡和过冲。通过对光斑位置误差的微分，可以预测光斑的运动趋势，从而使控制动作更加平稳。

PID 算法综合考虑了比例、积分和微分三个方面的控制效果，通过合理调整 PID 参数，可以实现快速响应、消除稳态误差和抑制振荡，从而使光斑位置能够准确地追踪目标。

此后，利用卡尔曼滤波记录目标轨迹，从而在目标短暂丢失的瞬间进行轨迹预测并补位，以保证追踪过程的连贯性。

## 三、电路与程序设计

### 3.1 电路结构和工作原理分析

系统结构：视觉模块连接主控，通过 UART 进行通讯传输识别结果；得到识别结果后，主控通过控制二维电动云台舵机转角绘制激光点轨迹，同时控制其它小型设备如

开关、扬声器等展示当前运行状态。

## 3.2 系统程序设计

### 3.2.1 程序功能描述与设计思路

#### 1、程序功能描述

系统采用按键控制输入指令，每个按键分别对应四种题目要求的控制功能，同时，另有按键可以控制程式的暂停与继续。绿色激光头处的按键开关可以在任意时刻控制绿色激光头停止运动。绿色激光实现实时追踪与暂停和重启。

#### 2、程序设计思路

控制过程中，通过固定好激光头和屏幕的相对位置，调节参数找到屏幕中心位置。使用稳定的移动舵机的算法，并调节参数，使激光头能够沿着屏幕顺时针运行一周，通过视觉模块串口通信，获取矩形坐标，进行坐标换算，并实现巡线。

追踪过程中，通过降低硬件曝光度，使激光光斑与环境的差异增大，以便实现红色激光光斑的轨迹追踪。之后，对图像进行 LAB 色域的颜色查找与二值化处理，定位当前模块朝向与光斑位移差。将激光头与视觉模块进行固定，使得二者移动姿态紧密关联，简化追踪模型。进而通过 PID 算法调节舵机角度控制量，实现稳定追踪。

### 3.2.2 程序流程图

#### 1、主程序流程图

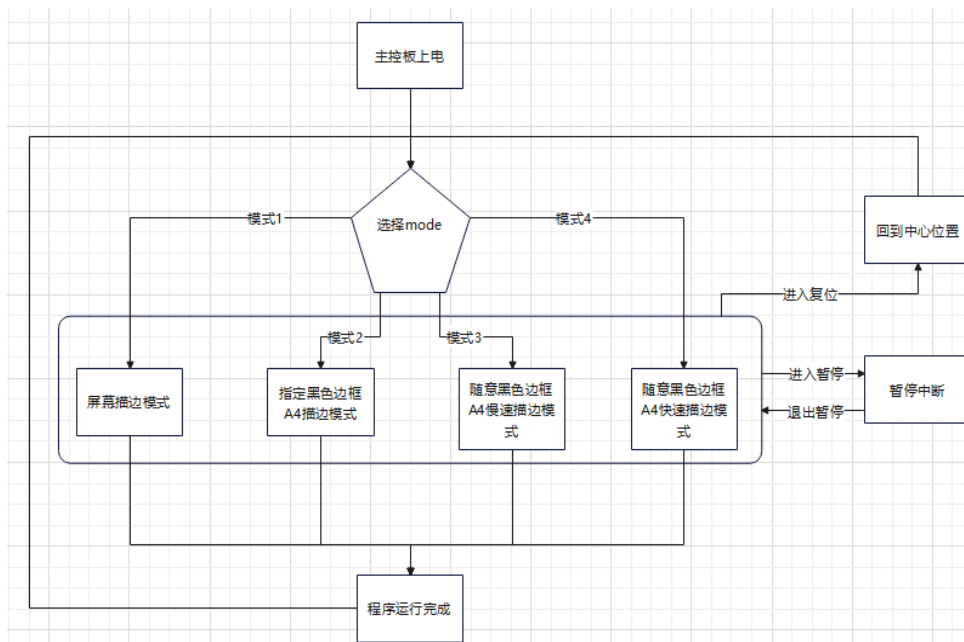


Figure 6 主程序流程图

## 四、测试方案与测试结果

### 4.1 测试方案

(1) 进入控制模式 1，云台绕屏幕四周方框顺时针运动，记录运动所需时间和偏离边框的最大距离，测量 6 次。

(2) 进入控制模式 2，云台绕固定位置的黑框顺时针运动，记录运动所需时间和偏移边框的最大距离，测量 4 次。

(3) 进入控制模式 3，云台按照摄像头识别的黑框位置慢速顺时针运动，记录运动所需时间、偏移的最大距离以及连续出界最大距离，测量 5 次。

(4) 进入控制模式 4，云台按照摄像头识别的黑框位置快速顺时针运动，记录运用时间、偏移的最大距离以及连续出界最大距离，测量 5 次。

(5) 在任意控制模式下，点击复位按钮，记录复位前所在位置（以屏幕中心点为原点，右和上分别为 x 和 y 轴正方向）和复位所需的时间，测量 4 次。

(6) 开启绿色激光头，红色激光头重复任务 3 和 4，测量绿色激光头的追踪时间，以及追踪上后二者相差的最大距离，测量 4 次。

### 4.2 测试条件与仪器

秒表、1 米直尺。

### 4.3 测试结果及分析

#### (1) 测试结果

表格 1 测试方案 1

	第一次测试	第二次测试	第三次测试	第四次测试	第五次测试	第六次测试
时间/s	11.25	11.15	11.33	11.5	11.64	11.29
误差/cm	1.0	1.6	1.2	0.8	0.6	1.1

表格 2 测试方案 2

过程时间(s)	11.35	11.14	11.23	11.34
误差(cm)	0.8	0.9	1.0	0.5

表格 3 测试方案 3

完成所需时间/s	18.38	19.2	17.8	17.92	18
误差/cm	2.1	1.2	3.2	2.8	1.7



最大连续出界距离/cm	3.1	2.3	4.2	2.3	2.3
-------------	-----	-----	-----	-----	-----

表格 4 测试方案 4

完成所需时间/s	6.1	5.8	6.3	5.9	5.8
误差/cm	1.2	2.8	2.1	1.5	2.6
最大连续出界距离/cm	2.8	8.3	5.2	3.7	7.3

表格 5 测试方案 5

复位前坐标 (cm)	(-25, 25)	(-14.3, 24)	(10.2, 20.2)	(15.4, 24.2)
复位时间	0.5s	0.4s	0.4s	0.4s

表格 6 测试方案 6

追踪时间/s	0.5s	0.4s	0.6s	0.6s
最大相差距离/cm	3.6	3.1	4.2	2.8

## (2) 测试分析与结论

分析：测试 1 和测试 2 由于硬件本身位置固定，在调参后有着稳定的高正确率，满足题目要求。由于坐标映射模型的误差、舵机机械机构精度不足以及识别准确度问题，导致测试方案 3 和 4 在不同位置时的偏移误差有所波动，有时可能会出现长距离的出界，经多轮测试仅有约 30% 成功率。复位功能可以在任意位置快速准确回正，满足题设需求。在绿色激光追踪测试中，绿色激光追踪的速度很快，最终锁定位置较为精准，但是由于红色激光头本身速度较快以及云台自身运动精度较低，最大相差距离偏大，实际任务成功率较低。

结论：本项目完成了基本任务 1、2、3；在任务四上尝试了两种方法，但囿于有限时间下的材料准备不足，一定程度上设备精度问题，以及视觉辅助方案设计的较为单一，正确率约为 30%；红绿激光追踪任务，追踪速度达到要求，在速度不过快的条件下，追踪过程平稳。但是，追踪过程中跟进控制频率不足，使得距离波动较大，成功率较低。