

2023 年全国大学生电子设计竞赛

运动目标控制与自动追踪系统（E 题）



2023 年 8 月 5 日

摘要：针对本题目的各项要求，本研究采用软硬件结合的方法设计了一套运动目标控制与自动追踪系统。该系统由 MAIX Bit K210 视觉处理模块、STM32 单片机控制模块、摄像头模块以及二轴舵机云台和激光笔构成一个闭环控制系统。摄像头模块用于采集图像信息，经由 MAIX Bit 进行图像数据处理，得到实时红点坐标、A4 黑色边框四角坐标，通过串口发送给 STM32 并通过 PID 计算得到 PWM 调节舵机，从而控制激光笔的光斑在屏幕上按照设定程序进行移动。本系统实现了以激光笔的光斑作为运动控制目标的自动追踪系统，包括复位功能、沿屏幕（细铅笔线）运动、沿 A4 纸黑框边缘运动以及自动追踪光斑等功能。

关键词：K210、STM32、运动目标控制、目标检测、目标追踪

目录

一、 系统方案	1
1、视觉处理模块的论证与选择	1
2、单片机的论证与选择	1
3、电机的论证与选择	2
4、控制算法的论证与选择	2
二、理论分析与计算	3
1、矩形位置检测	3
2、激光位置检测	3
3、二轴云台控制分析	3
4、控制算法分析	4
5、斜线运动控制	错误！未定义书签。
三、 电路与程序设计	5
1、电路设计	5
(1) 系统总体框图	5
2、程序结构与设计	5
四、 测试方案与测试结果	6
1、测试方案	6
2、测试结果与分析	6
五、 结论与心得	6

运动目标控制与自动追踪系统（E 题）

【本科组】

一、系统方案

系统方案主要描述了针对研究的要求，采用软硬件结合的方法设计了一个运动目标控制与自动追踪系统。该系统由多个模块组成，包括 MAIX Bit K210 视觉处理模块、STM32 单片机控制模块、摄像头模块、二轴舵机云台和激光笔，构成一个闭环控制系统。摄像头模块负责采集图像信息，然后通过进行图像数据处理。处理后的图像数据用于控制 PID 算法调节舵机，从而实现对激光笔光斑在屏幕上按照设定程序进行移动的控制。下面分别论证这几个模块的选择。

1、视觉处理模块的论证与选择

可选方案一：采用 K210 嵌入式计算机视觉平台

MAIX Bit 开发板是 SIPEED 公司 MAIX 产品线的一员，基于嘉楠堪智科技的边缘智能计算芯片 K210(RISC-V 架构 64 位双核)设计的一款 AIOT 开发板。经典两侧排针设计，可以直接配合面包板使用，板载 Type-C 接口和 USB-UART 电路，用户可以直接通过 USB Type-C 线连接电脑进行开发，配置 128Mbit Flash、LCD、DVP、Micro SD 卡等接口并把所有 IO 引出，方便用户扩展。

可选方案二：K210 嵌入式人工智能（AI）计算平台

OpenMV 是一个基于 MicroPython 的嵌入式计算机视觉平台，使用 ARM 微控制器。开发者可以使用 Python 语言编写图像处理和计算机视觉应用，无需深入了解底层硬件编程。它专注于图像处理和计算机视觉任务，提供丰富的图像处理库和示例代码。OpenMV 配备了图像传感器和其他传感器，可以直接连接摄像头、显示屏、Wi-Fi 模块等设备。

综合考虑，视觉处理模块选择使用 K210 嵌入式人工智能（AI）计算平台，实现强大的目标检测等功能。

2、单片机的论证与选择

可选方案一：采用以 ARM Cortex-M3 为内核的 STM32F1 系列控制芯片

STM32 是一种基于 ARM Cortex-M 核心的单片机，采用 RISC 架构。它具有强大的计算能力和丰富的外设，适用于复杂的嵌入式应用。STM32 单片机有多个系列，不同系列的芯片有着不同的性能和功能，满足不同需求。它支持多种编程语言，包括 C 和 C++，也支持 RTOS 系统，适合中高级开发者。STM32 单片机在性能、功耗、稳定性等方面都有优势，适用于较复杂的控制任务和性能要求较高的应用。

可选方案二：采用 STC51 单片机

STC51 是一种基于 Intel 8051 核心的单片机，采用 CISC 架构。它在嵌入式系统中有着广泛的应用，历史悠久，生态丰富。STC51 单片机相对较为简单，易于学习和使用，适合入门级开发者。它拥有一些基本的外设和功能，但在计算能力和性能方面相对较弱。对于较简单的控制任务和低性能要求的应用，STC51 可以是一个经济实惠的选择。

综合考虑，选择使用性能更佳的 STM32 单片机控制舵机云台。

3、电机的论证与选择

可选方案一：采用带编码器的直流减速电机

直流电机是一种最常见的电机类型，它的工作原理是通过直流电流在电磁场中产生力矩，从而驱动电机转动。直流电机在没有反馈控制的情况下，不容易实现精确的位置控制。

可选方案二：采用舵机

舵机是一种特殊类型的直流电机，它与普通直流电机相比具有额外的反馈控制回路，通常是一个位置反馈传感器（如编码器）。舵机可以精确地控制电机的位置，通过控制脉宽信号来实现精确的角度调节，通常具有较高的角度分辨率。舵机适用于需要精确位置控制的场景，如机器人、摄像云台、航模等。舵机的结构也相对简单，成本较低，但由于加入了反馈控制，相比普通直流电机稍微贵一些。

综合考虑：选择使用舵机作为云台电机是较为合理的选择。舵机具有精确的位置控制能力和较低的成本，在实现云台旋转和角度调节时具有优势。

4、控制算法的论证与选择

可选方案一：采用开环算法

开环控制是一种简单的控制方法，其中输出信号不受系统反馈信息的影响。在开环控制中，输入信号直接作为控制器的输出信号，用于云台电机控制。开环控制没有对输出信号进行监测和调整的机制，因此无法纠正外部干扰和内部误差，导致系统的稳定性和精确性较差。在开环控制中，系统的性能高度依赖于模型的准确性和环境条件的稳定性。对于复杂系统或存在不确定性的环境，开环控制的性能可能会受到较大影响。

可选方案二：采用闭环控制

闭环控制是一种基于反馈的控制方法，其中输出信号受系统反馈信息的影响。在闭环控制中，输出信号被反馈给控制器，并与期望信号进行比较，然后根据误差来调整控制器输出，以实现输出信号的精确控制。闭环控制可以实时纠正外部干扰和内部误差，提高系统的稳定性和精确性，使系统能够更好地适应不确定性和变化的环境条件。在闭环控制中，采用合适的控制算法（如 PID 控制算法）可以优化系统的性能，使系统更快地响应控制信号，减少超调和稳态误差。PID 控制算法按比例、积分、微分的函数关系，进行运算，将其运算结果用以输出控制。优点是控制精度高，是控制系统非常普遍的运算方法。对于本系统的控制已足够精确。

综上所述，选择使用闭环控制，并采用 PID 算法控制激光笔是较为合理的选择。闭环控制能够实时纠正误差，提高系统的稳定性和精确性，而 PID 算法能够优化系统的性能，使激光笔具有快速响应和灵活性，适用于实现精确的运动控制。

二、理论分析与计算

1、矩形位置检测

使用 k210 进行模板匹配的方式识别矩形。是一种基于图像相似度的矩形检测方法。它先使用一个预定义的矩形模板，在图像中进行滑动窗口式的匹配，找出与模板最相似的位置，从而检测出可能的矩形。

具体实现方法：我们是在 maixpy 中采用内置 `img.find_rects()` 函数进行矩形的寻找，并尝试了很多参数的组合，第二步，由于上面得到的是一个检测到的矩形列表，不一定包含我们需要的矩形，所以我想到使用长宽比筛选，排除不符合要求的矩形。在本次方案中设置长宽比为 $\sqrt{2}:1$ 。第三步，对得到的坐标进行均值滤波，滤除识别过程中的噪声点，然后再进行求平均值，得到四个顶点相对于屏幕的位置点。

2、激光位置检测

组合使用 k210 中的 `img.find_blobs` 和 `img.find_rects`, 经过十几个小时的组合尝试和调参，最终在硬件条件十分困难（bit 板）的情况下，选择了一个较为折衷的办法：为了区别红绿激光，先找红色色块，再对色块的区域进行灰度变换，再用 `binary` 进行二值化，由于镜头中的激光位置中心是一个白色光点，所以再使用 `dilate` 对二值化的图像进行膨胀，使得原本在黑胶带上摄像头感知不到的小白点变大，再用寻找矩形找到这个放大的白光点。其中，对图像的灰度处理、膨胀操作、寻找矩形这三个步骤对内存的消耗极大，也极度地消耗时间。到最后，我们识别红色光点的帧率只有 2.6 帧左右。

3、二轴云台控制分析

二轴云台是指有水平和俯仰两个轴的云台，能实现水平（左右）和俯仰（上下）动作。二轴云台广泛应用于摄像机、激光雷达、传感器等设备的定向控制，以及机器人、无人机等需要精确转动的系统中。

4、控制算法分析

采用 PID 算法控制光斑在屏幕移动位置。开始工作后，实时检测屏幕上光斑的位置，并与设定的目标位置比较，进行 PID 控制。其 PID 结构原理如图 1，PID 分别表示光斑的位置比例（P）、位置误差（I）、位置积分（D）。

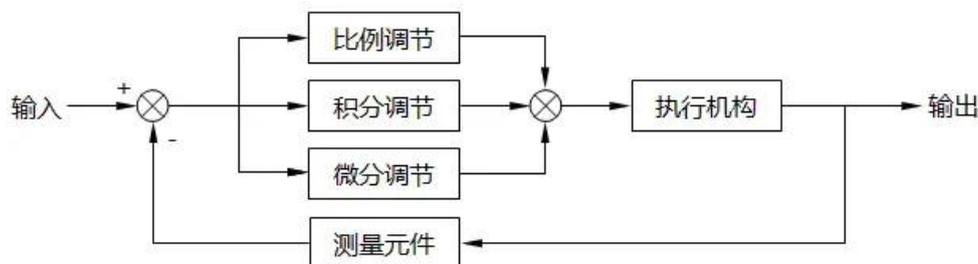


图 1 PID 原理图

P: 对目标位置与当前位置偏差 $e(t)$ 进行调整，系数越大调节速度越快，减小误差，但是过大的比例，会造成舵机速度状态的突变，从而导致云台状态不稳定。

I: 加入积分调节，可以消除系统的稳态误差，提高无误差度。系统的稳定性下降，动态响应变慢。

D: 微分调节反应的是光斑的角速度，可以预见偏差变化的趋势具有可预见性因而可以产生超前调节，加入微分调节可以改善系统的动态性能。

PID 控制器由比例单元（P）、积分单元（I）和微分单元（D）组成。其 PID 控制器的传递函数为：

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

其中， K_p , K_i 和 K_d 为 PID 控制器的比例，积分和微分参数。

5、斜线运动控制

设 $A(X_1, Y_1)$ 为起点， $B(X_2, Y_2)$ 为终点。设点 $C(X_3, Y_3)$ 为目标点。

现在对 AB 两点之间进行插值，插值数量为 N 。

$$dx = \frac{X_2 - X_1}{N}, \quad dy = \frac{Y_2 - Y_1}{N}$$

那么 C 的轨迹就是： $\{X_1 + 1dx, X_1 + 2dx, \dots, X_1 + Ndx\}$ 。一系列轨迹点设置好后，接下来识别到激光笔光斑，对比误差。设识别光斑到的点为 $P(X_4, Y_4)$ ，那么计算设置 PC 的欧氏距离为 $D = \|P - C\|_2^2$ 。然后进行 PID 控制。当 PC 足够近， D 小于设定阈值，就认为是重合了，目标点切换到下一个点。

三、电路与程序设计

1、电路设计

(1) 系统总体框图

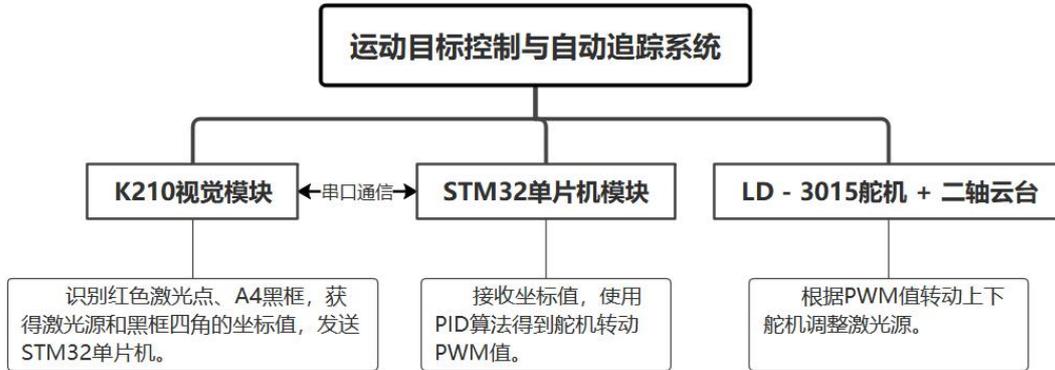


图 2 系统总体框图

2、程序结构与与设计

控制二轴云台控制激光笔在屏幕上精准移动时，程序结构如下：

初始化：在系统开机后，进行系统初始化，包括初始化搭载 K210 的开发板、Stm32 单片机、舵机等。

设定目标位置：在程序中设定激光笔在屏幕上的目标位置。目标位置通过 K210 识别到矩形后，获取矩形框四个角的平面坐标值。

主循环：进入主循环，程序会不断执行以下步骤：

a. 通过摄像头捕获当前激光红点实时位置以及 A4 纸黑色矩形框：K210 生成激光点位置坐标和矩形框四角的平面坐标值。

b. 计算误差：将目标位置与当前位置进行比较，计算出误差。即，目标位置与实际位置之间的差距。

c. PID 控制器计算：将误差输入 PID 控制器，根据 PID 算法计算出控制信号。PID 控制器会根据比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和导数系数 K_d 对误差进行加权计算，得到控制信号。

d. 控制信号输出：将 PID 计算得到的控制信号转换为 PWM 信号，并发送给舵机，控制云台的转动。

e. 限制和安全检查：对于舵机或电机的控制信号，进行范围限制，确保云台不超出安全转动范围，并避免碰撞。

f. 重复运行：以上步骤会在循环中不断运行，直到激光笔移动到设定的目标位置。在运动到目标位置后，控制器可以进入静止状态或继续接收新的目标位置。

中断程序：当按下复位按钮时，程序会进行中断，云台控制激光返回中心原点。

四、测试方案与测试结果

1、测试方案

- (1) 硬件测试：测试舵机云台能否正常工作，检查按钮电路焊接是否正确，k210 开发板与 stm32 单片机、stm32 单片机与舵机间接线是否正确。
- (2) 程序测试：用 keil、Maixpy ide 软件编程并通过单片机多次运行调试。
- (3) 硬件软件联调：用实现的编程算法控制硬件系统进行工作。检测整个系统是否实现各项要求。

2、测试结果与分析

1、基本要求的测试

(1) 设置运动目标位置复位功能。执行此功能，红色光斑能从屏幕任意位置回到原点。光斑中心距原点误差 $\leq 2\text{cm}$

表 B-1 基础部分 1 测试结果

次数	1	2	3	4	5
距离 (cm)	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1

(2) 启动运动目标控制系统。红色光斑能在 30 秒内沿屏幕四周边线顺时针移动一周，移动时光斑中心距边线距离 $\leq 2\text{cm}$ 。

表 B-2 基础部分 2 测试结果

次数	1	2	3	4	5
转动用时间 (s)	4.2	4.1	4.3	4.2	4.5

(3) 用约 1.8cm 宽的黑色电工胶带沿 A4 纸四边贴一个长方形，构成 A4 靶纸。将此 A4 靶纸贴在屏幕自定的位置。启动运动目标控制系统，红色光斑能在 30 秒内沿胶带顺时针移动一周。超时不得分，光斑完全脱离胶带一次扣 2 分，连续脱离胶带移动 5cm 以上记为 0 分。

表 B-3 基础部分 3 测试结果

次数	1	2	3	4	5
转动用时 (s)	27.7	28.2	27.9	28.4	28.3

(4) 将上述 A4 靶纸以任意旋转角度贴在屏幕任意位置。启动运动目标控制系统，要求同 (3)。

表 B-4 基础部分 4 测试结果

次数	1	2	3	4	5
转动用时 (s)	28.3	28.1	28.1	27.8	28.1

五、结论与心得

通过本次电子设计大赛的历练，小组成员的编程能力、硬件设计搭建能力、软硬结合调试能力、项目管理以及分工合作能力都得到了有效的培养和极大的提升。最后，衷心感谢学校以及老师的的支持，我们得到良好的实践环境。衷心感谢全国大学生电子设计大赛的组委会提供优秀的平台和机会。

摘要：针对本题目的各项要求，本研究采用软硬件结合的方法设计了一套运动目标控制与自动追踪系统。该系统由 MAIX Bit K210 视觉处理模块、STM32 单片机控制模块、摄像头模块以及二轴舵机云台和激光笔构成一个闭环控制系统。摄像头模块用于采集图像信息，经由 MAIX Bit 进行图像数据处理，得到实时红点坐标、A4 黑色边框四角坐标，通过串口发送给 STM32 并通过 PID 计算得到 PWM 调节舵机，从而控制激光笔的光斑在屏幕上按照设定程序进行移动。本系统实现了以激光笔的光斑作为运动控制目标的自动追踪系统，包括复位功能、沿屏幕（细铅笔线）运动、沿 A4 纸黑框边缘运动以及自动追踪光斑等功能。

关键词：K210、STM32、运动目标控制、目标检测、目标追踪