

摘要

本实验主要由主控制器模块（ESP32）、位置检测模块（摄像头部分）、两个自由度的舵机驱动模块（带激光笔）、陀螺仪（MPU6050）、电源模块及降压模块等几部分构成。在摄像头部分完成了对小球三维位置的确定、以及绳长、周期的测量，通过绳长周期即可算得重力加速度。将小球位置映射为舵机应转动角度后，通过串口发送给 ESP32 单片机，再由单片机控制舵机转动，其中还采用了提前预测小球位置、利用陀螺仪实现闭环控制等方法，提高实验精确度和抗干扰能力。

关键词

单目测距、颜色识别、串口通信、ESP32 控制、陀螺仪 MPU6050、PID 闭环控制

一、方案选择与论证

1.摄像头型号

我们原本使用奥尼 C11L USB 摄像头进行视频画面输入，在实验中发现小球运动速度过快而摄像头帧率不足，导致数据输出延迟且精确度下降，于是更换了 LuoKe LRCP 1080 高速 120 帧摄像头，使得画面质量和流畅度得到提升。

2.树莓派与笔记本电脑

摄像头画面视觉与数据处理部分可采用树莓派 4b 或者笔记本电脑，前者较为轻便，成品易于封装，但性能不足且需要额外供电；笔记本较为笨重，但性能优越，且软件易于安装操控。综合考虑，我们采用笔记本电脑用于视觉与数

据处理。平台为 windows+opencv+python3

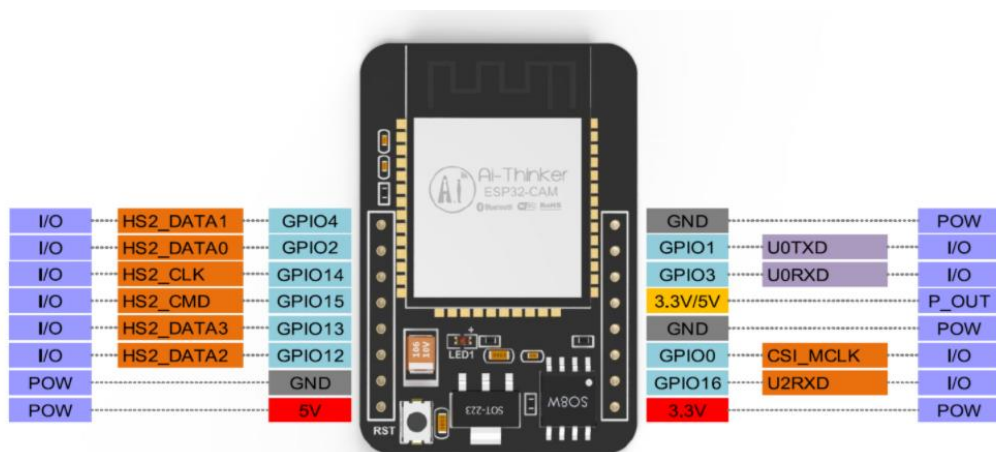
3. 单目测距与双目测距

本作品需要利用摄像头测距来得到某一维度的坐标，目前主流测距方式有单目测距和双目测距。单目测距优点在于简单易实现且成本较低，但其在测距范围和距离成反比，且需要提前知道摄像头焦距即被测物体实际大小；双目测距精度较高且不需要提前知道物体的实际大小，而缺点在于实现更为复杂，成本较高且两个摄像头难以做到完全一致。综合本作品实际情况，我们采用单目测距方法。

4 单片机选择

一开始在 STM32 与 ESP32 之间选择，但最终选择了 ESP32。

这个芯片最大的优势就是便宜，比较适合大学生，且易于开发，开发环境，可以在 Windows 下开发也可以在 Linux 环境下开发，并且有队员用过该单片机实现过类似项目，故选用此单片机。



CAM	ESP32	SD	ESP32
D0	PIN5	CLK	PIN14
D1	PIN18	CMD	PIN15
D2	PIN19	DATA0	PIN2
D3	PIN21	DATA1/闪光灯	PIN4
D4	PIN36	DATA2	PIN12
D5	PIN39	DATA3	PIN13
D6	PIN34		
D7	PIN35		
XCLK	PIN0		
PCLK	PIN22		
VSYNC	PIN25		
HREF	PIN23		
SDA	PIN26		
SCL	PIN27		
POWER PIN	PIN32		

5 舵机选择

本实验选用 MG996R 舵机，相对来说转动灵敏，角度精准。

下面是模块参数：

选用舵机：MG996R 舵机

扭矩：9kg/cm(4.8V)，11kg/cm(6V)

速度：0.19 秒/60°(4.8V)，0.18 秒/60°(6V)

转动角度：180°

工作电压：4.8 ~ 6V

重量：55g

尺寸：40.7mm × 19.7mm × 42.9mm



6 解决电压、电流与各模块的匹配问题

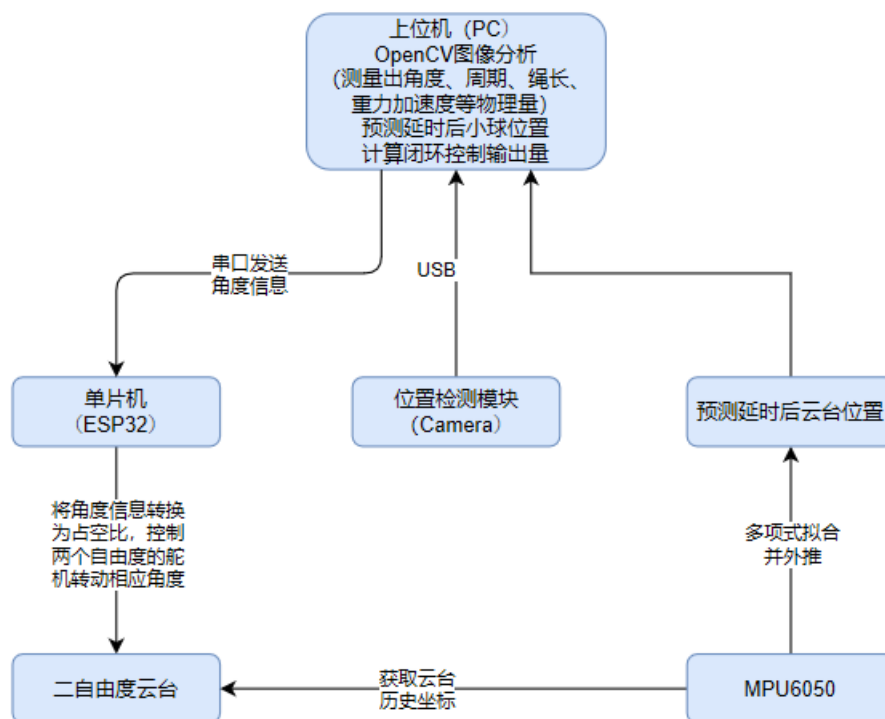
为解决电压、电流与各模块匹配问题，本实验采用 7.4V 航母电池与 5V 降压模块配合使用的方法来解决。

二、系统设计与模组原理介绍

总硬件设计结构：

总硬件电路结构框图如图所示，其硬件电路主要由主控制器模块（ESP32）、位置检测模块（摄像头部分）、两个自由度的舵机驱动模块（带激光笔）、陀螺仪（MPU6050）、电源模块及降压模块等几部分构成。电源模块负责系统各个模块控制电路的电源。姿态检测模块实时地对小球角三维位置信息进行采集，上位机（电脑）由摄像头模块采集的位置信息计算出角度、周期、绳长、重力加速度，并将角度信息通过串口发送给下位机（ESP32）。舵机驱动模块负责将主控制器输出的 PWM 信号转换为控制信号驱动 2 个自由度舵机的转动角度。MPU6050 负责测量舵

机的角度信息，将测量数据反馈给主控制器，从而形成闭环控制。

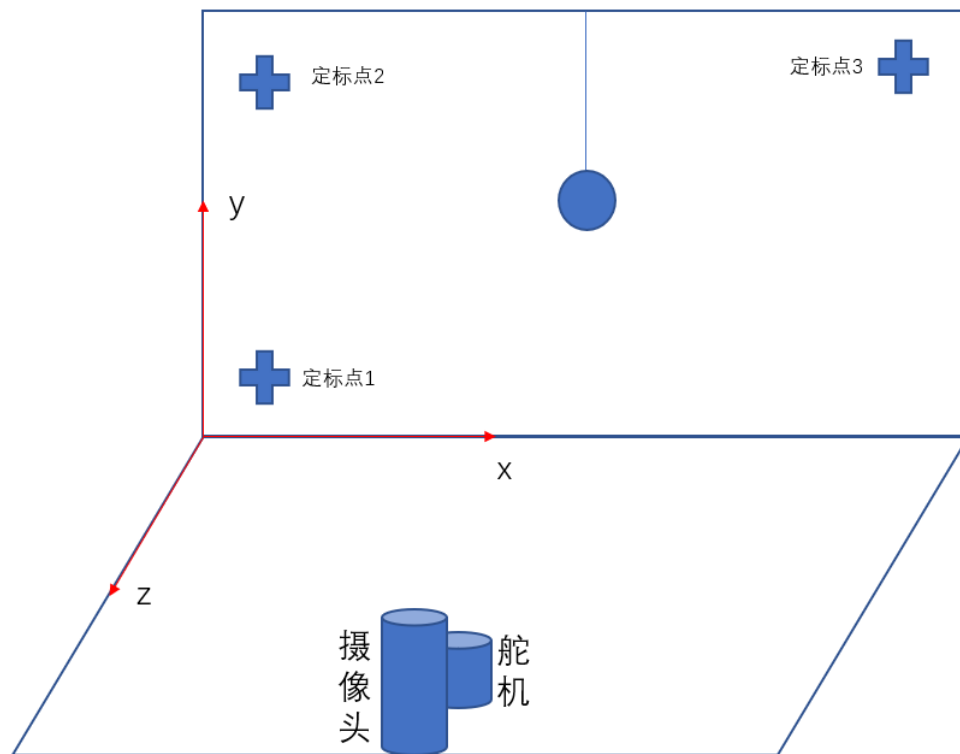


1、摄像头模组

1) 识别并标记小球

摄像头通过颜色识别小球，并作轮廓拟合得到球心坐标。

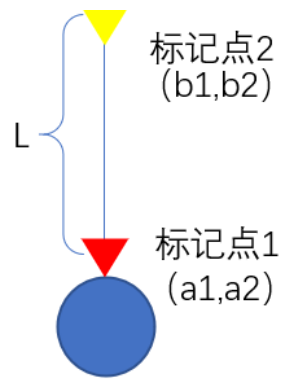
装置示意图：



摄像头原始返回坐标为小球相对于屏幕的原始坐标，我们增加三个标定
点，测量标定点原始坐标和球心的原始坐标，通过比例转换即可得到球心的相
对坐标，同理的到摄像头和舵机的相对坐标。

2) 绳长检测

示意图：



我们将两个颜色鲜明的标记点置于绳子的首端和末端，摄像头通过颜色检测识别标记点并计算出两个标记点的相对坐标，二者作差即可得到绳长

$$L=a_2-b_2$$

3) 周期计算

在小球初始垂直状态时，记录球心初始相对坐标 (x_0,y_0) ，随后小球开始摆动，测量小球每两次经过初始横坐标的时间差，即为周期 t 。这里为了减小误差，取每五次得到的 t 均值作为周期 T 。

4) 重力加速度 g 计算

由单摆振动周期公式

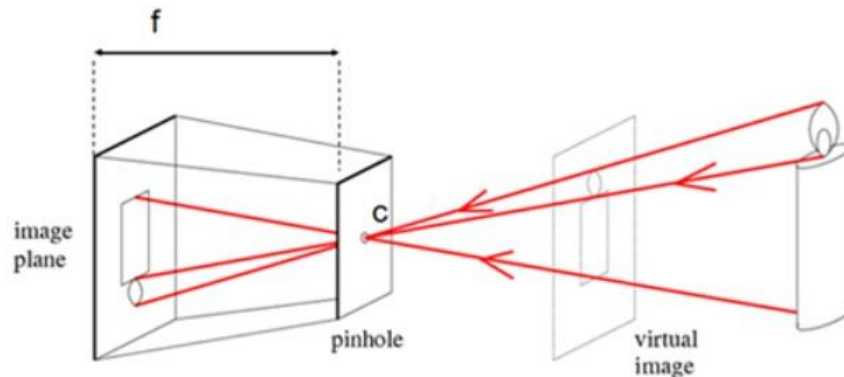
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

利用前面求得的 L 和 T ，可求出重力加速度公式为

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

4) 测距

单目测距原理：



令 f 为摄像头的焦距， c 为镜头光心。物体发出的光经过相机的光心，然后成像于图像传感器或者也可以说是像平面上，如果设物体所在平面与相机平面的距离为 d ，物体实际高度为 H ，在传感器上的高度为 h ， H 一定要是已知的，我们才能求得距离 d 。

假设有一个宽度为 W 的目标或者物体。然后将这个目标放在距离相机为 D 的位置。用相机对物体进行拍照并且测量物体的像素宽度 P 。这样就得出相机焦距的公式：

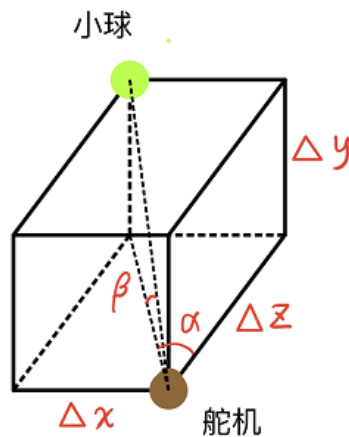
$$F = (P \times D) / W$$

移动物体，则物体的距离（即装置图中对应的 z 坐标值）

$$D' = (W' \times F) / P'$$

5) 角度计算

示意图



舵机水平旋转角度：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right)$$

舵机竖直旋转角度：

$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}}\right)$$

2、单片机与舵机模组

1) ESP32 通过串口接收并解码上位机传来的角度信息

上位机根据算得的角度信息，保留两位有效数字，编码后通过串口发送给 ESP32，ESP32 解码得到角度。

采用编码格式为：AXXXXBXXXXXD

两个五位数表示两个自由度角度乘上 100 后的值

2) ESP32 根据角度控制两个舵机转动

单片机算得角度后，映射为相应占空比，分别控制两个自由度的舵机转动相应

角度。

3) 使用 MPU6050 实现 PID 闭环控制

为了使实验结果更加精确可靠，本实验利用 MPU6050 实现闭环 PID 控制算法，即利用以小球当前姿态信息为反馈控制量构成闭环 PID 控制算法，再结合采用高性能 ESP32 作为主控制器，从而提高激光笔追踪小球运动的稳定性和抗干扰能力。

