

平板球控制实验系统的设计

李真, 余善恩, 孙伟

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了满足自动化等相关专业的实践教学需求, 设计了一种基于 STM32 单片机的平板球控制系统。该系统结合了摄像头 OV7620、编码器、电机驱动 BTN7971、减速电机等各类模块, 通过摄像头来识别出小球和它所处的位置, 通过角度传感器 MPU6050 来验证平板平衡, 通过操作红外传感器来使小球停在平板九个区域中的任意位置。系统的软件程序主要负责将采集回来的图像进行运算并通过算法算出电机的控制量。实验结果表明, 该系统完成了对小球位置的准确检测, 可用来进行控制类实验教学, 验证多种控制算法, 实用性强。

关键词: 平板球系统; ;STM32; ;摄像头; ;电机; ;图像处理

Design of flat ball control experiment system

Li Zhen, Yu Shanen, Sun Weihua

(College of automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to meet the practical teaching needs of automation and other related majors, A flat ball control system based on STM32 is designed. The system combines the camera OV7620, encoder, motor-driven btn7971, deceleration motor and other modules, identifies the ball and its position through the camera, verifies the plate balance through the angle sensor mpu6050, and stops the ball at any position in the nine areas of the plate by operating the infrared sensor. The software program of the system is mainly responsible for the calculation of the collected image and the control amount of the motor through the algorithm. The experimental results show that the system has completed the accurate detection of the ball position, and can be used for control experiment teaching, verifying a variety of control algorithms, with strong practicability.

Keywords: flat ball system; STM32; camera; motor; image processing

1 引言

平板球控制系统是一个典型的多变量、不稳定、存在死区、具有迟滞的非线性二维系统。小球在板中的运动是非线性的, 板和小球之间的摩擦力不均匀, 会存在死区, 同时小球

的惯性问题会对系统的响应造成迟滞，这些都是平板球系统控制的难点。正因为此，平板球系统可以验证多种控制理论，可以和自动控制原理、运动控制等专业课程有机结合，是一个非常不错的理论与实践相结合的实验平台，在验证多种控制理论方面有很高的实用价值^[1-2]。

2 系统总体设计方案

平板球实验系统主要是基于 STM32 单片机搭载的实验平台，包括硬件和软件两个部分。硬件是由主控芯片、电源模块，摄像头 OV7670 模块，TFT-LCD 显示模块，角度传感器 MPU6050 模块，红外通信传感器模块等组成的。软件部分包括：单片机底层程序的编写、摄像头程序的调试、PID 程序的调试等。

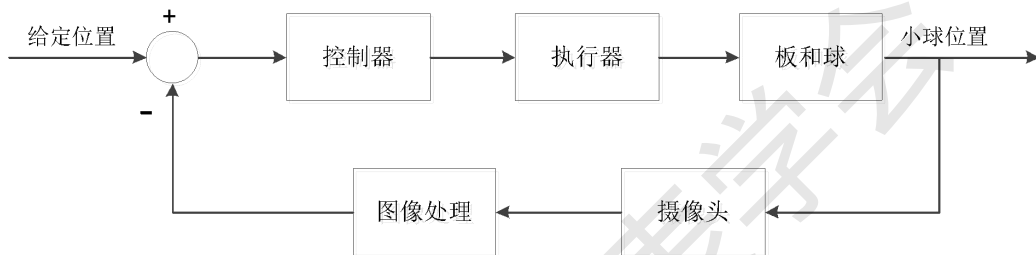


图 1 平板球系统框图

图 1 是平板球整体系统的框图。系统工作时，首先通过红外遥控按键设定小球的位置，比如平板的中点。然后单片机通过摄像头采集平板和小球的数据，进行颜色识别，找出小球所在的位置，与小球当前的位置进行比较，算出偏差，经过 PID 算法得出电机转动的角度，电机带动平板转动以改变小球的当前位置。这样就形成了一个闭环控制系统。

3 系统硬件设计

3.1 机械结构设计

机械部分包括底座，支架，减速电机（带编码器），小球，球盘，摄像头安装架，角度传感器，红外通信模块，电动机的驱动 BTN7971 等。

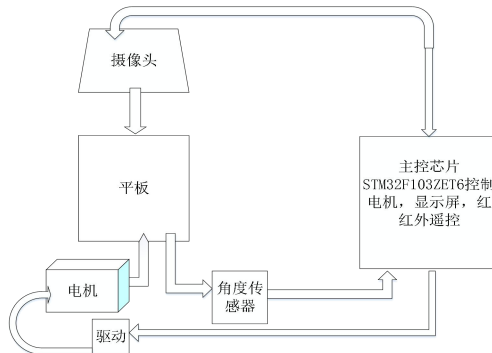


图 2 平板球机械结构示意图

如图 2 所示, 本设计实现的平板球实验系统采用的是二维平面的机械架构, 在 X 轴和 Y 轴方向上分别安装一个电机, 通过电机驱动可以让平板在 X 轴和 Y 轴方向上运动, 从而带动小球运动。小球的信息由平板上方的摄像头进行采集并做出反馈, 单片机将采集回来的信息进行处理并在程序中通过算法算出电机的控制量, 转动平板, 这样就构成了一个闭环反馈系统, 从而可以在平板上控制小球的位置和运动的轨迹。该系统还可以通过 LCD 触摸屏观察小球运动的轨迹, 并且可以通过红外遥控器设定小球运动的轨迹。^[3]

角度传感器需水平粘贴在平板下方, 这样才能尽可能减少人为误差, 进而得出理想的结论和实验效果。减速电机自身带有编码器, 用起来较为方便。同时编码器是一个增量式编码器, 可以检测出电动机实际的角度偏转值。

在设计的时候, 考虑到系统采用减速电机作为动力的来源, 所以在减速电机的轴承上安装了一个转动轴, 然后用一根铁棒将转动轴和平板固定, 这样既可以使小球拥有动力, 也可以使平板有一个支撑点, 减少中心轴上的压力, 使平板保持平衡。中心轴是与底座相连的, 这样是为了给平板一个支点, 让平板围绕这个点在 X 和 Y 轴上运动。同时为了不让小球离开设定的区域, 在平板四周安装了四个围栏。

3.2 系统硬件模块化设计与实现

本设计的主控芯片选用 STM32F103ZET6 控制芯片, 它是一款以 Cortex-M3 为内核的单片机, 具有强劲的性能, 更好的代码密度, 拥有 16 位带操作, 可以嵌套中断, 有低成本, 低功耗等优势^[4]。同时 STM32 还有 FSMC、TIMER、SPI、IIC、USB、ADC、DAC、DMA 等众多的外设功能, 并且还有极高的集成度。它有 84 个中断, 16 级可编程优先级, 所有的引脚都可以作为中断的输入脚。它的每一个外设口都有自己独立的时钟开关, 可以进行通用软件设置, 来关闭对应的外部设备的时钟, 从而可以降低系统板的功耗问题。此外, 该芯片底层资源丰富, 处理数据速度快, 最高可以达到 72MHz 的工作频率, 可以较快较好的处理和分析摄像头反馈回来的数据并得出结论, 同时可以精确的显现在 TFT-LCD 显示屏上, 这样方便实时观察小球的位置和运动轨迹^[5]。

本设计选择减速电机作为该系统的电机。减速电机是编码器、减速器、以及电机的组合体。减速电机的精简设计与制造既节约了成本, 也节约了空间, 使电机在使用上具有可靠地耐用性。并且减速电机的扭矩很大, 满足了本实验系统所需要的扭矩大这个重要指标。同时它的加速度也很大, 能在短时间内快速的做出反应。这样在控制小球的运动过程中可以做到快速及精确的同时减小本实验的误差。所以减速电机是非常适合平板球系统硬件设计要求的。

本系统采用了 BTN7971 模块集成电机驱动，这样可以将电机和单片机的 5V 电源分隔开，有效的保护了单片机的安全。在设计 BTN7971 电机驱动的时候，考虑到系统需要两个电动机，所以在设计时采用 4 个 PWM 输入口，1 个 VCC 接口和 1 个 GND 接口。每一个 BTN7971 都可以单独的稳定输出，这样使用减速电机的时候就比较方便，电机之间的链接就变得简单。BTN7971 的工作电压是 7V 到 14V，它的电压范围恰好满足减速电机 12V 的工作电压，输出的电流也比较大，不需要担心电动机因为负载电流过大而导致驱动模块烧坏，可以直接通过电源来调节输出电压，并且可以直接用单片机的 I/O 口来提供信号。BTN7971 模块的电路图如图 3 所示^[6]。

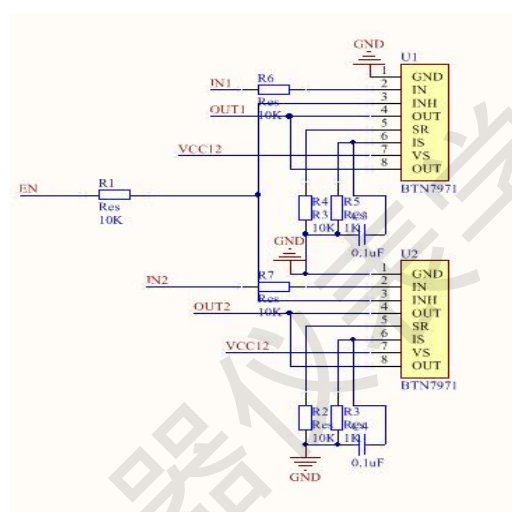


图 3 BTN7971 模块电路图

本系统的核心硬件是摄像头和显示模块。其中摄像头采用 OV7670，此款摄像头自带 FIFO 模块，可存储一帧的数据，并且支持 YUV 和 RGB 两种格式转换，还可以根据需求更改白平衡、饱和度、对比度等图像显示效果。同时为了能够更加精准的显示摄像头采集的图像，本设计选择 TFT-LCD 即薄膜晶体管液晶显示器。考虑到摄像头的像素点和成像大小，选择了 2.8 寸液晶屏，像素点大小为 240*320，带有 16 位真彩色显示。在显示屏模块上，集成了触摸屏模块，并且和显示屏引脚独立，不需要触摸屏时引脚悬空，不影响显示屏显示。显示屏总共支持 65K 色显示，在调试程序时，可以通过不同颜色来标定特殊点，增加调试效果。因为彩屏的数据量比较大，因此设计选择显示屏的接口为 16 位的并口与单片机进行连接^[7]。

在系统的设计中，需要精确的知道平板在偏转时候的角度，并且对数据进行收集和处理，才能实现更好的控制。该实验选择的角度传感器 MPU6050 带有加速度计、陀螺仪、姿态测量、倾角仪等功能。该模块中的姿态精度为 0.01 度，稳定性高，性能比一般的倾角仪

好。MPU6050 模块具有合理的 PCB 布局和焊接技术，同时具有较强的抗干扰能力。该模块的通信是靠 IIC 来传送数据到单片机的，就像一个 USB 数据线一样可以传送数据，从而在该系统中也替代了数据线的功能。

红外通信模块的设计主要运用了红外接收头和红外遥控器两个器件。电路的设计比较简单，只需要一个信号输入口，一个 VCC、一个 GND，就可以了。如图 4 所示^[8]。

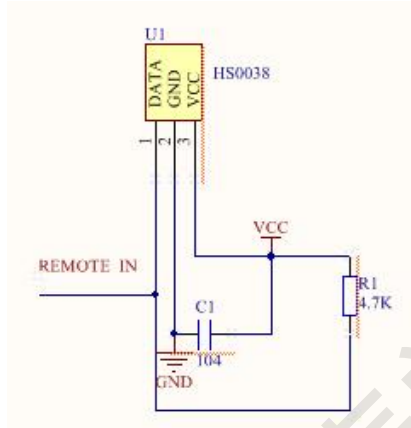


图 4 红外通信模块电路图

4 系统软件设计

4.1 软件总体设计

本设计的目的是让小球停止在平板任意位置。其中 TFT-LCD 液晶显示屏可以显示小球的位置和运动轨迹。系统软件设计总体流程如图 5 所示。该系统的程序编写中主要涉及到的有摄像头程序设计、红外通信程序设计、编码器程序设计、图像处理程序设计、PID 程序设计等^[9]。

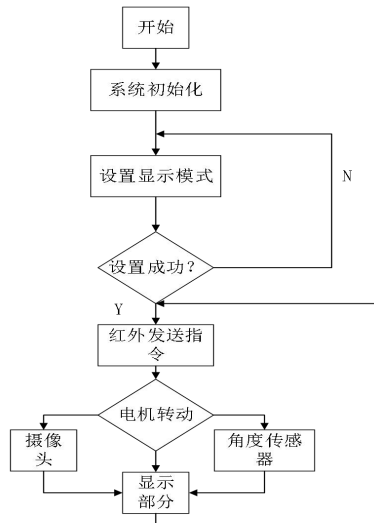


图 5 软件总体流程图

4.2 摄像头模块程序设计

在摄像头数据采集和处理的程序设计中，为了能够时刻收集到小球的数据和信息反馈到单片机，从而在 TFT-LCD 上实时显示小球的图像，在程序设计时必须时刻将每一个点的像素值直接传入 TFT-LCD 中的 GRAM 上，然后直接对这个像素值进行处理，后面传进来的数据将覆盖前面传进来的数据，这样就可以快速准确地处理和分析小球的数据和信息。

4.3 红外遥控程序设计

红外遥控器采用的是 NEC 协议。NEC 码就是用占空比来表示 0 和 1。起止位，也就是同步码，是红外接收的标志。在一个周期为 1.125ms 的脉冲里，高电平占 49.7%，这就是逻辑 0；在一个周期为 2.25ms 的脉冲里，低电平占 24.8%这就是逻辑 1。需要注意的是，无论是哪种脉冲，都是低电平在前，高电平在后。在定时器中断里，用输入捕获高电平脉冲，同时进行协议解码，并存储解码结果，传递给全局变量。红外遥控上面一共有 20 个按键，虽然只有一个全局变量，但是不同的按键会有不同的值，只要实时更新全局变量的值就可以，也就是说只要调用这个全局变量，就知道按了哪个键。

4.4 编码器程序设计

系统设计中采用的是自带编码器的电机，这个编码器其实就是光电门，在转轴上接有光栅，转过光电门的时候会有脉冲产生。电机的减速比是 64:1，编码器的象限是 12P。编码器测速其实就是检测脉冲的个数，转一圈的脉冲个数是 $12 \times 64 \times 4 = 3072$ 。在设计中可以通过输入捕获来检测脉冲的个数，但更好的办法是用定时器的编码器模式。

这个模式的实质就是定时器的计数器，将定时器通道的引脚作为定时器的外部时钟源，每过一个脉冲计数器加 1。但与定时器不同的是，外部时钟源是由两路信号正交得到的，这两路信号的增减顺序就决定了计数是向上计数还是向下计数，通过计数器向上计数还是向下计数就可以判断电机是正转还是反转。电机转一圈计数刚好记了 3072 个数。如果想测电机的速度，可以在定时器中断里计算一下，每两个中断里，记了多少个数，就知道电机的速度了。同样，用这个方法可以计算出电机转过的角度，3072 个脉冲代表一圈，那么只要知道记了多少个数就知道电机转了多少角度。表 1 表明了信号与计数的关系。

表 1 计数方向与编码器的关系

有效边缘	相对信号的电平 (TI1FP1 对应 TI2, TI2FP2 对应 TI1)	TI1FP1 信号		TI2FP2 信号	
		上升	下降	上升	下降
仅在 TI1 计数	高	向下计数	向上计数	不计数	不计数
	低	向上计数	向下计数	不计数	不计数
仅在 TI2 计数	高	不计数	不计数	向下计数	向上计数
	低	不计数	不计数	向上计数	向下计数
在 TI1 和 TI2 计数	高	向下计数	向上计数	向上计数	向下计数
	低	向上计数	向下计数	向下计数	向上计数

4.5 图像处理程序设计

常见的图像格式有 RGB 和 YUV。RGB 又分为 RGB565 和 RGB555。R、G、B 就是通常说的三原色，有这三种颜色总共可以构成 1600 万种不同的颜色，是一个非常庞大的数量，这也是用的最多的一种颜色表示方法。

摄像头的输出格式可以在寄存器中配置。COM15 端口的地址是 0X30，它的[5:4]位决定了输出格式是 RGB565 还是 RGB555。摄像头模块输出的数据是 QVGA 格式，分辨率是 240*320，而 LCD 显示屏的分辨率也正好是 240*320，也就是说摄像头中的每一个像素点都对应着 LCD 显示屏上的每一个像素点。因此只需要按照顺序操作 FIFO，就能读出摄像头 FIFO 中的数据，读取一个像素点，就在 LCD 显示屏上画一个像素点。采用逐行扫描的方法，先把一行写满，再进行下一行，一共进行 240*320 次^[10]。

在显示摄像头画面的基础上，将平板放置在一个合适的位置，使显示屏上能显示整个平板，然后平板手动调平衡。此位置算作零点位置。用其他颜色标出平板的轮廓，记下边界的位置，为方便控制，通过调节摄像头的焦距和平板的位置，将平板的一边正好与显示屏的边界平行，这样就大大减少搜索小球位置的范围，避免单片机运行在小球不在的区域浪费时间，大大提高了程序的利用效用。区域一共分为九块，是 3*3 的，经过标定，每一个区域所占的坐标大小是 60*60，识别小球就是在这些区域中进行的。

接下来是在这些区域中找到小球的位置。摄像头采集信息后，将像素点以 16 位数字的形式存在 FIFO 中，读取的值也是 16 位的，这 16 位代表了 RGB 三种不同的像素点。每种颜色的像素点是不一样的。这款摄像头对光的感应比较敏感，不同光线下同一种颜色像素点

有较大的差别，但是不同的颜色之间差别更大。为了区分平板和小球，将平板用红色的纸覆盖，而球用银色的。这样在白天的情况下平板的像素为 23000-25000，晚上为 25000-27000，而小球的像素点，因为存在反光点，白天为 45000-47000，晚上为 47000-50000，显然，相同颜色白天晚上都存在差异，但是不同颜色之间的差异更大。这就是区分平板和小球的方法。只要找到颜色差异最大的那一点，就是小球所在的位置^[11]。

小球在显示屏上显示的是个圆形，占据了很多像素点，实验中需要找到小球的圆心，也就是最能代表小球位置的那一个像素点。为了实现这个要求，采取了平均值滤波法。设四个变量 $R.x_min$ 、 $R.y_min$ 、 $R.x_max$ 、 $R.y_max$ ，分别代表扫描到银色像素点的四个坐标值。这样，在第一次找到白色的像素点的时候，将此时的 X、Y 轴坐标值传递给 $R.x_min$ 和 $R.y_min$ 。这就是小球的起始坐标。然后写一个比较函数，找到比起始像素点大的像素点的坐标，再从屏幕上找到最大像素点的坐标，将值传递给 $R.x_max$ 和 $R.y_max$ 。再进行平均值滤波，此时的坐标就近似看成是圆心。实验证明，根据找到的点来看，能较为准确地代表小球的位置^[12]。

4.6 PID 程序设计

在检测到小球的位置后，需要让电机带动平板使小球到达指定位置。平板分为 X、Y 两个轴，其中 X 轴由电机 1 控制，Y 轴由电机 2 控制。可以通过两个电机的正反转来控制平板的倾斜方向，同时选择 PID 算法来闭环控制电机。

为了防止电机转的太多，在本实验中采取串级 PID。外环 PID 控制电机转的速度，内环 PID 精确控制电机转的角度。调试的时候先调电机内环 PID，使电机能转过所设定的角度，再来调电机速度使小球运动到达指定的区域^[13]。

平板是分为 X 轴和 Y 轴，所以两个电机可以单独来调。调电机的时候，先给定设定值。角度 PID 的输入值是当前电机转过的角度。调角度的时候，先调 P 一个参数，I 和 D 给 0，逐渐加大 P。调试过程中将当前的角度参数传递给上位机得到一个直观的曲线，这样就可以根据曲线震荡情况与设定值的偏差来决定 P 的值。从 0 开始逐渐加大 P，直到曲线不振荡，这样得到一个最大值 P，此时的曲线是平稳，且和设定值有一定的静差，这种静差无法通过调节 P 来减少，所以就开始调节 I。加入 I 之后，静差在慢慢减少，继续加 I，使曲线在刚开始有一小段超调，最终逐渐达到设定值。这种曲线在响应速度和抗干扰能力上是最佳的。最后加入 D，积分的作用就是在电机的角度发生剧烈的变化后能很快的回到原来的设定值。

角度 PID 调好之后接下来就调小球的位置 PID 了。先让一个电机保持平衡位置不动，通过红外遥控控制另外一个电机运动，在运动的过程中观察小球的轨迹。经过多次观察，发现在只有一个电机运动的情况下，小球的轨迹到达底端之前都只是沿电机倾斜的方向直线运

动, 两个电机参数、所带负载相差不多, 所以调试的时候, 可以同时调两个电机的 PID。电机 1 负责 X 轴, 电机 2 负责 Y 轴。先将平板的中点坐标 (100,120) 设为设定值, 也就是电机 1 位置 PID 的设定值为 100, 电机 2 位置 PID 的设定值为 120; 电机 1 位置 PID 的输出值做为电机 1 角度 PID 的设定, 也就是电机转过的角度。电机 2 位置 PID 的输出值做为电机 2 角度 PID 的设定值, 而它们的当前值则分别是两个电机已经转过的角度。这样不仅可以两个电机的转动控制在一定的范围内, 还能根据偏差很快的转动电机, 响应小球的位置^[14]。

5 结语

该平板球实验系统实现了利用红外遥控发送指令, 利用摄像头来识别小球, 观察小球的位置和运动轨迹, 利用角度传感器反馈平板的倾斜程度, 并将这一系列的信息反馈到控制系统中, 判断是否按照指令来运动。如果不是, 就会通过驱动电机的转动, 让平板的倾斜发生改变, 使小球的运动也发生改变, 从而达到理想的运动轨迹, 最终到达实验设定的位置。

该仪器操作便捷、实用性强, 可用来进行控制类的实验实践教学。目前该系统已经投入教学使用, 反应良好, 并且对后续进行自动化及相关专业的实验仪器研制与开发具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Awtar S, Bernard C, Boklund N. Mechatronic design of a Ball-on-Plate balancing system [J]. *Mechatronics*, 2002, 12(2): 217-228.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第6版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [3] 肖云博. 板球系统的定位控制和轨迹跟踪[D]. 大连理工大学 2010.
- [4] 刘静. 基于ARM嵌入式教学实验平台的设计与开发[D]. 电子科技大学 2014.
- [5] 陈志丹, 郝卫东, 闫伟, 邓子信, 李君, 徐彪. 基于STM32遥控数字音量功放系统设计[J]. *微型机与应用*. 2014, 37(04): 67-72.
- [6] 王艳华. 基于FPGA控制的步进电机细分驱动器的设计与现实[D]. 内蒙古大学, 2013
- [7] 李真, 余善恩, 倪红霞. 球杆控制实验系统的设计与实现[J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(11): 99-102.
- [8] 叶林俊. 单片机I/O口的红外遥控软件调制技术[J]. *单片机与嵌入式系统应用*. 2011, 67(12): 57-63.
- [9] S. Pan, L. Shi, S. Guo, P. Guo, Y. He and R. Xiao, "A low-power SoC-based moving target detection system for amphibious spherical robots," 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, 2015, 2(2): 1116-1121.
- [10] 邓睿. AMOLED显示屏图像显示的研究[D]. 电子科技大学 2015.

- [11] Shi Z , Liu F . An Accuracy Indicator of Control System and Its Application in Ball&Plate System[C]// 2015 Fifth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2015,25(23):116-121.
- [12] Ker Cheng Chang, Lin Chin E, Wang Rong Tyai. Tracking and Balance Control of Ball and Plate System[J]. Chinese Institute of engineers, 2014, 30(3): 459-470.
- [13] 陶永华等编著.新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [14] 王旭芳. 板球系统的反步滑模自适应控制[D].大连理工大学,2013.

中国仪器仪表学会