

# 苹果采摘机器人控制系统设计

王琪<sup>a,b</sup>,丁柏文<sup>a</sup>,陈萍<sup>a</sup>

(江苏科技大学 a. 苏州理工学院; b. 机电与动力工程学院,江苏 张家港 215600)

**摘要:**针对苹果采摘机器人控制系统制造及维护成本较高、功耗大、便携性差等问题,对其控制系统进行优化设计。该系统可分为视觉系统和主控系统,视觉系统采用 Open MV3 视觉模块,通过颜色识别成熟苹果;主控系统包括 TB6612 电机驱动模块、PCA9685 舵机驱动模块和 LM2596 电源模块。实验测试表明,该控制系统在室内及室外测试下均工作稳定。

**关键词:**控制系统;苹果采摘;机器人;农业自动化

**中图分类号:**TP242.6; S24 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0150-03

## Design of Control System in Apple Harvesting Robot

WANG Qi<sup>a, b</sup>, DING Baiwen<sup>a</sup>, CHEN Ping<sup>a</sup>

(a. Suzhou Institute of Technology and b. School of Mechatronic and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China)

**Abstract:**The control system of apple harvesting robots is optimized, which is used to solve the high fabricating and maintenance cost, high power consumption and poor portability. The control system can be divided into visual system and master control system. The vision module of Open MV3 is used to recognize ripe apples by color. The master control system is made up by motor driving module of TB6612, servo driving module of PCA9685 and power module of LM2596. The test result shows that the optimized control system smoothly operates under lab testing and outdoor testing.

**Keywords:**control system; apple harvesting; robot; agricultural automation

## 0 引言

为解决苹果采摘作业消耗大量劳动力等问题,对苹果采摘机器人控制系统的研究已成为当前热点<sup>[1]</sup>。苹果采摘机器人是一种可鉴别果实成熟度,帮助或代替人类完成苹果采摘等任务的智能化机电产品,其控制系统设计属于农业自动化研究范畴<sup>[2]</sup>。现有苹果采摘机器人控制系统多由摄像机和 PC 机构成<sup>[3-9]</sup>,但在实际运用中存在制造和维护成本较高、功耗大,对操作及维护人员的技术要求较高、携带不便等问题。针对上述问题,本文设计了一款苹果采摘机器人控制系统,其优点主要表现为:工作稳定、性能可靠、制造及维护成本较低、功耗小、便携性好。

## 1 系统设计原理

苹果采摘机器人控制系统需依照其机械本体进行设计,本设计中其机械本体可以分为 3 个部分:存储机构、移动机构和抓取机构,如图 1 所示。

苹果采摘机器人控制系统分为视觉系统和主控系统,视觉系统通过感光元件获取外部环境信息,并转换为电信号传输给单片机,经单片机处理后,发出相应控制指令;主控系统根据指令控制电机驱动模块和舵机驱动模块完成

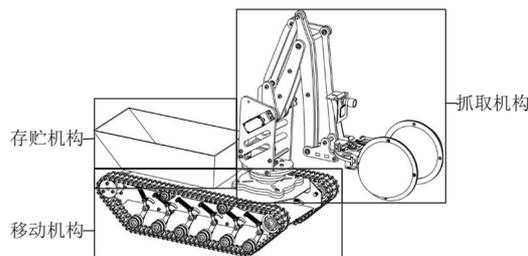


图 1 机械本体

相应动作,控制系统总体结构如图 2 所示。

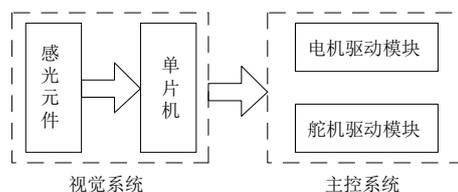


图 2 控制系统结构

## 2 视觉系统

视觉系统作为苹果采摘机器人的“眼睛”,需实时获取当前环境信息,识别环境中的成熟苹果,获取其位置信

基金项目:国家重点研发计划重点专项项目(2016YFD0700900)

作者简介:王琪(1962—),男,江苏盐城人,教授,博士,研究领域为机械工程/数字化设计与制造,车辆工程/特种车辆设计与制造技术。

息,并返回主控系统<sup>[9]</sup>。

本设计中视觉系统选用基于 STM32F7 单片机的 Open MV3 视觉模块,其体积小、价格低廉、易于拓展;模块内部搭载 Micro Python 解释器,可识别并执行 Python 语言,并且提供 Python 语言视觉库,简化视觉算法编程。

## 2.1 感光元件

感光元件选用 OV7725 视觉传感器,是一款 1/4" 的 COMS(互补金属氧化物半导体器件),相较于 CCD(电荷耦合器件),具备低成本、低功耗、高集成度等优点。其包含单芯片 VGA 相机和图像处理的全部功能;正常工作温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ,满足各种复杂环境工作要求;具备 640×480 感光阵列,可实现每秒最高 60 帧 VGA 图像输出,满足图像处理要求;内置串行控制总线接口(SCCB),可连接主控芯片 I<sup>2</sup>C 接口,配置视觉传感器的寄存器,完成图像质量、数据格式和传输方式的控制;还可通过配置寄存器完成曝光、白平衡、色调控制等图像处理功能;可实现自动曝光(AEC)、自动白平衡(AWB)、自动带通滤波(ABF)等功能。

## 2.2 主控芯片

主控芯片选用以 Cortex-M7 为内核的 STM32F7 单片机,相较于 PC 机,其具备低成本、低功耗、小体积、便携性较好等优点。

STM32F7 单片机内部搭载自适应实时加速器和一级高速缓存,程序执行速度快;216 MHz 主频,数据处理性能优越;大容量内置闪存(2 MB),程序存储性能优越;高达 512 KB 通用数据存储,满足数据存储要求;具备 I<sup>2</sup>C 总线接口,便于外设拓展。

## 3 主控系统

主控系统作为苹果采摘机器人的“大脑”,根据视觉系统所获得的信息,控制苹果采摘机器人各机构完成采摘作业等任务<sup>[10]</sup>。

主控系统根据苹果采摘机器人控制要求,主要可分为电机驱动模块、舵机驱动模块和电源模块。电机驱动模块完成移动机构的控制,舵机驱动模块完成抓取机构控制,而电源模块则完成视觉系统和主控系统供电需求。

### 3.1 电机驱动模块

移动机构动力输出装置选用 ZYTD520 直流电机,加装齿轮减速器,工作电压最高 12 V,空载转速 200 r/min,输出转矩 0.35 N·m,满足工作要求。

电机驱动芯片选用双直流电机驱动器 TB6612FNG,可输出频率范围高达 100 Hz 的可调 PWM 波,具备 4 种电机控制模式,满足控制需求;具备低功耗待机模式,芯片内置过热自动关断电路和低压检测保护电路,可保证芯片安全运行;芯片内部集成 MOSFET-H 桥结构,如图 3 所示。场效应管分为 N 沟道和 P 沟道两种,当 N 沟道场效应管栅极(G)输入电压大于开启电压时,源极(S)和漏极(D)导通形成导通沟道;当 P 沟道场效应管栅极(G)输入电压

小于开启电压,源极(S)和漏极(D)导通形成导通沟道。IN<sub>1</sub>输入高电平,N 沟道场效应管(N<sub>1</sub>)和 P 沟道场效应管(P<sub>2</sub>)形成导通沟道,O<sub>1</sub>处电压为 V<sub>M</sub>,IN<sub>2</sub>输入低电平,P 沟道场效应管(P<sub>4</sub>)与 N 沟道场效应管(N<sub>3</sub>)形成导通沟道,O<sub>2</sub>处电压为 PGND,电流从 O<sub>1</sub>流经 O<sub>2</sub>形成回路,电机正转;反之,IN<sub>1</sub>输入低电平,P 沟道场效应管(P<sub>1</sub>)与 N 沟道场效应管(N<sub>2</sub>)形成导通沟道,O<sub>1</sub>处电压为 PGND,IN<sub>2</sub>输入高电平,N 沟道场效应管(N<sub>4</sub>)与 P 沟道场效应管(P<sub>3</sub>)形成导通沟道,此时 O<sub>2</sub>电压为 V<sub>M</sub>,电流从 O<sub>2</sub>流经 O<sub>1</sub>形成回路,电机反转。

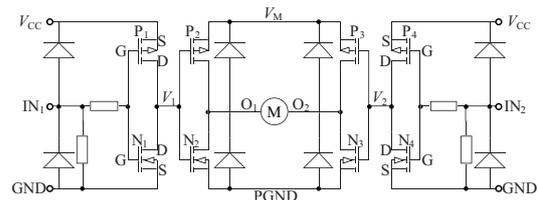


图3 MOSFET-H桥结构

电机供电引脚(VM1、VM2、VM3)连接锂电池正极(V<sub>BAT</sub>),芯片供电引脚(V<sub>CC</sub>)连接经电源模块稳压后 5 V 电压(V<sub>CC</sub>),电机供电引脚和芯片供电引脚均设有滤波电容,100 pF(C<sub>2</sub>、C<sub>6</sub>)瓷片电容可消除高频干扰;10 μF(C<sub>1</sub>、C<sub>5</sub>)电解电容可消除低频干扰,且在一定范围内电解电容值越大滤波效果越好。STBY 引脚接高,芯片默认使能,具体设计方案如图 4 所示。

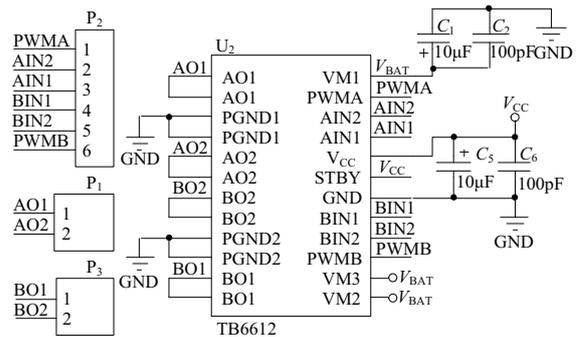


图4 电机驱动模块外围电路

### 3.2 舵机驱动模块

抓取机构动力输出装置选用转角为 300° 的 MG995 数字舵机,工作电压最高 7 V,输出转矩 1.96 N·m。数字舵机相较于模拟舵机,其控制方式简便,仅需发送 1 次 PWM 信号即可保持规定转角;控制信号频率高达 300 脉冲/秒,响应频率高,“信号死区”小。

舵机驱动芯片选用 PCA9685,其为 I<sup>2</sup>C 总线通信的 16 路 PWM 输出控制芯片,可节省主控芯片控制引脚。具备 6 位硬件地址引脚,同一 I<sup>2</sup>C 总线上可挂载多块 PCA9685 芯片,易拓展;每个 PWM 输出端口内部均自带 12 位分辨率的控制器,其输出频率可达 24 ~ 1 526 Hz,满足舵机控制需求;内部自带 25 MHz 振荡器,无需外接,简化电路;其正常工作温度范围 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ ,满足复杂环境工作要求。

舵机供电引脚( $V_{SS}$ )连接电源模块稳压后的5V电压,芯片供电引脚( $V_{DD}$ )连接经电源模块稳压的 $V_{CC}$ ,供电引脚处均设有滤波电容;外部硬件地址引脚未作处理,地址默认为0;PWM0到PWM3输出引脚外接限流电阻,保证正常工作;时钟总线引脚(SCL)和数据总线引脚(SDA)外接上拉电阻,保证I<sup>2</sup>C总线正常工作;外部时钟使能引脚(EXTCLK)接低,使用内部时钟;芯片使能引脚( $\overline{OE}$ )接低,默认使能,具体方案如图5所示。

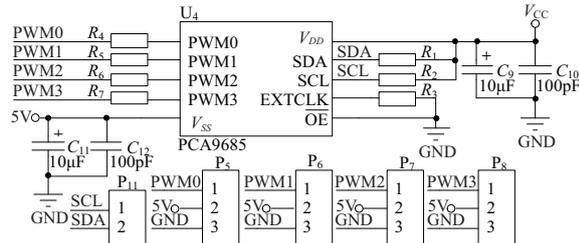


图5 舵机驱动模块外围电路

### 3.3 电源模块

能源输出装置选用锂电池(3S 800mAh 15C)正常工作电压可达12.6V,最大放电电流12A,满足苹果采摘机器人各机构正常工作要求。

电源模块芯片选用LM2596SX-5.0/NOPB,输入电压可达40V;输出电流可达3A;芯片内部集成度较高,仅需4个外部器件,便可稳定输出5V电压;且具备低功耗待机模式,过热关断和限流保护功能,满足使用需求。

抓取机构含有4个数字舵机,工作状态下瞬时电流较大,故将舵机供电与各芯片供电分开,具体设计如图6所示。采用2块LM2596SX-5.0/NOPB芯片,其输入引脚(IN)连接锂电池正极,外接680 $\mu$ F电解电容,可防止输入端电压突变;开关引脚( $\overline{ON}/OFF$ )接地,默认芯片使能;输出引脚(OUT)外接肖特基整流二极管(IN5824)和33 $\mu$ H电感,保证电源关断瞬间输出电流连续;220 $\mu$ F电解电容,可防止输出电压突变;稳压反馈引脚(FB)接输出端,实时调节输出端电压。

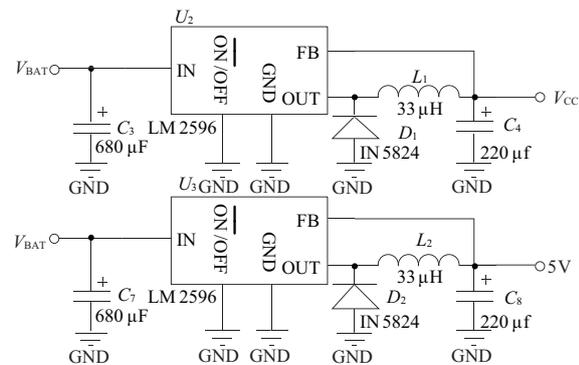


图6 电源模块外围电路

## 4 系统程序设计

程序开发环境为OpenMV IDE,语言为Python,程序采

用模块化编写,主要可以分为1个主程序、3个功能子程序(包括:PID子程序、电机驱动子程序、舵机驱动子程序)。

系统上电后对视觉系统及主控系统各模块初始化,而后移动机构执行旋转指令,此时视觉系统实时检测周围环境,并依据颜色区分苹果成熟度。若检测到成熟苹果,则反馈成熟苹果位置信息,包括空间三维坐标( $x, y, z$ )及目标图像像素点数, $x$ 轴向偏差及像素点数偏差作为PID函数的入口参数,其输出值为电机调速的PWM波占空比,从而控制移动机构向成熟苹果靠近。当 $x$ 轴向偏差及像素点数偏差小于一定值,PID函数停止运作,移动机构停止运作,抓取机构动作。依据 $y$ 轴向偏差,控制抓取机构向目标靠近,当视觉系统检测到抓取机构运动到相应位置后,则执行采摘作业命令。采摘成功后,视觉系统停止工作,并执行存放指令,存放成功后,抓取机构复位。重复上述动作。直到完成成熟苹果的全部采摘,具体过程如图7所示。

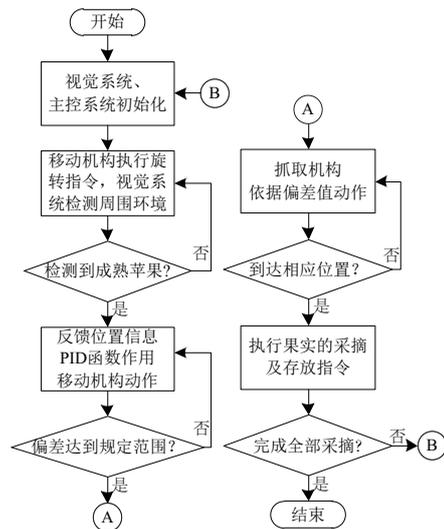


图7 系统程序流程

## 5 系统测试

苹果采摘机器人控制系统实物如图8所示,完成苹果采摘机器人搭建,在光线可控的室内环境及光线不可控的露天环境下分别进行100次采摘实验。每次实验放置2棵植株,每棵植株上悬挂1个红色成熟果实,1个绿色非成熟果实,测试数据如表1所示。

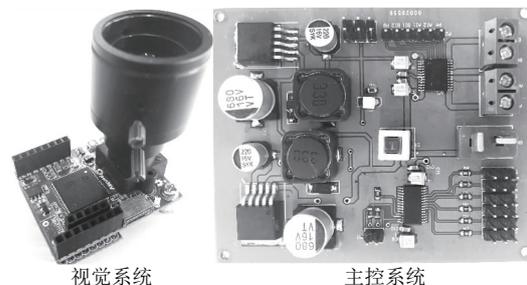


图8 控制系统实物