

第 37 届上海市青少年科技创新大赛

基于 Openmv 视觉识别和麦克纳姆轮
底盘的自动采摘番茄机器人

高中组 个人项目

二零二二年一月

基于 Openmv 视觉识别和麦克纳姆轮底盘的自动 采摘番茄机器人

摘 要

随着我国全面推动机器人产业发展，农业智能化进程不断提速，从国内外农业机器人的发展来看，研制智能农业机器人，利用智能农业机器人转变农业的生产方式，从而实现农业的可持续绿色发展是必然的趋势。当前国内外农业机器人仍然存在智能化程度不高、采摘效果不理想等问题。本课题秉承“智慧农业、科技创新、智能方案、机器物联”的发展理念，分析了采摘机器人特点及国内外采摘机器人的进展与现状，并基于此，研究基于麦克纳姆轮全向轮底盘和使用 Openmv 智能摄像头和机器视觉、人工智能技术以及六轴机械臂的智能番茄采摘机器人。本课题实现了麦克纳姆轮底盘控制、数字 PID 闭环速度控制、视觉识别和姿态解算算法等，并初步实现了番茄采摘机器人的智能控制、移动行走路径规划和其他基本功能，并初步验证了自动驾驶算法。它具有控制灵敏，动作灵活，便于操作的优点。

关键词： 机器人 麦克纳姆轮 Openmv 智能摄像头 番茄采摘 智能控制

目录

摘 要.....	1
第一章 前言.....	3
1.1 智能农业采摘机器人研究现状.....	3
1.2 智能农业采摘机器人发展趋势.....	4
1.3 本文主要研究内容.....	4
第二章 研究过程.....	6
2.1 底盘设计.....	6
2.1.1 底盘设计.....	6
2.1.2 电机转速读取与 PID 控制.....	10
2.1.3 遥控信号读取.....	11
2.1.4 电机控制.....	11
2.2 自动驾驶算法.....	12
2.3 机械臂.....	12
2.3.1 硬件设计.....	12
2.3.2 姿态解算.....	14
2.3.3 舵机控制.....	16
2.4 视觉识别.....	17
2.5 WIFI 无线通讯.....	19
第三章 测试过程与测试结果.....	20
3.1 底盘运动能力测试.....	20
3.2 遥控信号接受测试.....	21
3.2.1 取反电路测试.....	21
3.2.2 串口通信代码测试.....	22
3.3 六轴机械臂测试.....	23
3.3.1 姿态解算算法测试.....	23
3.3.2 机械臂摘取测试.....	23
3.4 Openmv 摄像头测试.....	24
3.5 WIFI 模块测试.....	25
3.6 TOF 光学测距传感器测试.....	26
第四章 结论与展望.....	27
4.1 结论.....	27
4.2 展望.....	27
第五章 参考文献.....	28
第六章 心得感受.....	29

第一章 前言

1.1 智能农业采摘机器人研究现状

“智慧农业”一词在近些年被频繁提起，各种自动化设备和监测系统也日渐代替传统农业生产中落后、繁杂的工作。例如极飞科技等专注研发农业科技的公司所推出的无人机产品，可以帮助农户完成打药、施肥、播种等工作，同时还能实现多种智能监测设备，帮助农户观察作业的生长状况。

智能机器人在现代农业生产中的广泛应用，可以帮助农户解决许多繁重且乏味的工作。以水果采摘机器人为例，每次一到果园收获时期，果场主就需要聘请大量的人力去完成采摘的工作。而水果采摘机器人就能够帮助农场主节省大量的时间和人力成本。

挪威环境与生命科学大学最近展出了一款名为 Noronn 的采摘机器人，这是一款能够分辨种植在塑料隧道上的草莓成熟程度，并根据大小分类的自动采摘机器人。这一款草莓机器人已经被欧洲的大型草莓种植园广泛采用。然而，这一款机器人虽然可以实现 24 小时工作，但他并不适用于国内常见的田间栽培的草莓。

美国 Abundant Robotics 公司，是近年来比较受关注的农业机器人初创科技公司。凭借其研发的苹果采摘机器人，该公司在 2017 年就得到了 A 轮融资。2019 年上半年，这个苹果机器人正式在新西兰投入商用。据悉，这款历时四年研发的苹果采摘机器人备受关注。该款机器人借助先进的计算机视觉技术，采取真空抽吸系统采摘苹果，可以准确绕开未成熟的苹果，而农场的工作人员只需在远处进行操控即可。

我国华南农业大学研发团队早在数年前就研发出荔枝采摘机器人。机器人效率为每小时采摘 40 斤荔枝，是人工采摘的两倍之多。这款机器人采用的是双目立体视觉系统，可以对荔枝进行定位，获得视野内多个目标，然后自主规划采摘作业路径进行，最后伸出机械臂末端的拟人夹指来剪断果枝，摘取果实。

除此之外还有其他各种 AI 水果采摘机器人的研发和推广都在进行当中，相信未来的农业生产过程中，它们会为我们大幅降低成本并提高农业生产效率。

1.2 智能农业采摘机器人发展趋势

随着城市化的发展和农业劳动力的不断减少，新型农业生产模式的应用和新技术的开发迫在眉睫，农业机器人将成为未来农业生产活动的核心。采摘机器人作为农业机器人的一个重要分支，具有极大的发展潜力。

随着农业生产模式和新技术的发展和应用，农业机器人将成为农业生产的主力军，采摘机器人作为农业机器人的重要类型具有很大的发展潜力。语音识别、图像识别、大数据分析、运动学、传感器技术、控制技术和计算信息处理等更多最新技术在农业机器人中的应用，使得农业数字化和智能化水平不断提高。

我国人口众多，幅员辽阔，农业是我国的支柱产业，随着智慧农业水平的提高，采摘机器人大有用武之地。

目前，蔬果采摘机器人研究中仍然存在一些问题，例如机器人的视觉识别能力不够，在复杂背景和夜间环境下的工作能力还不够理想等。今后应当将人机协作，开放结构和多传感器融合的方法不断应用在农业机器人的研究中，尤其是将人工智能、深度学习等新型技术应用于蔬果采摘机器人的技术开发之中。

1.3 本文主要研究内容

本课题首先对几种典型采摘机器人进行研究，分析了国内外采摘机器人的进展与现状以及发展趋势。在此基础上，本课题基于 Openmv 视觉识别和麦克纳姆轮底盘的自动采摘番茄机器人，机器人集可移动载体、机械手臂、夹持器、移动机构及智能控制模块于一身，采用视觉技术、避障技术等实现了水果采摘机器人的移动行走路径规划、果实成熟度自动判断及定位识别功能。

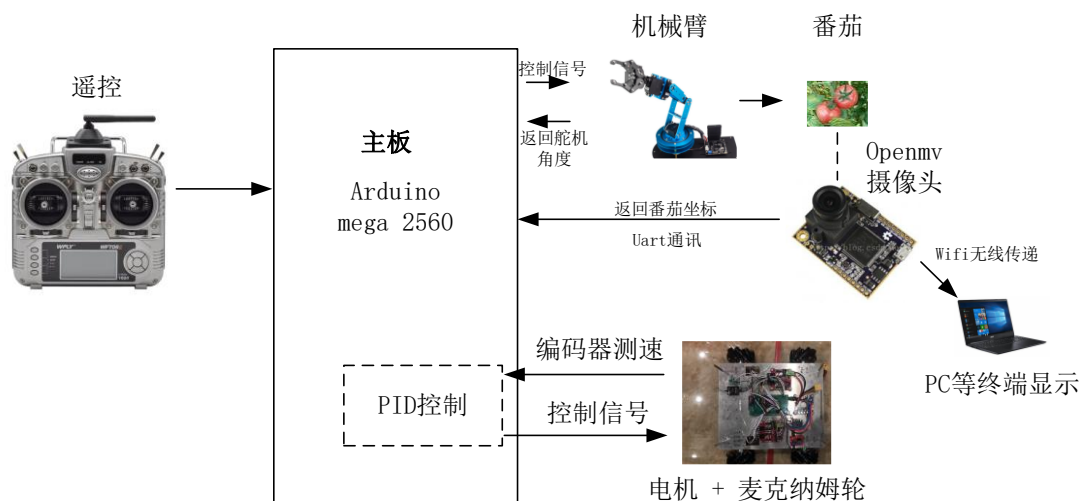


图 1 系统结构框图

系统架构如图 1 所示，本文的组织结构如下：

第一章智能农业机器人的研究现状和发展趋势，阐述了本文的主要研究内容。

第二章阐述了本文的研究内容，包括采摘机器人的底盘设计及控制算法、机械臂的设计和姿态解算、舵机控制，以及对于采摘机器人至关重要的视觉识别算法及其改进。

第三章阐述了本课题农业机器人的测试过程与测试结果。

第四章总结课题，并做出了技术展望。

第五章为本课题的参考文献。

第六章则为本课题开展过程中的心得感受。

第二章 研究过程

2.1 底盘设计

采摘机器人集多种技术与功能于一体，其底盘作为重要部件之一，它承载了机器人的定位导航及避障等多种功能。根据结构的不同，机器人底盘可分为轮式、多足式及履带式等。本课题采用轮式机器人底盘，它的底盘平稳性更好、运动噪音更低，且便于装拆及维护。本节将介绍底盘设计的具体过程，包括底盘结构设计、电机转速读取与 PID 控制、遥控模块及电机控制。

2.1.1 底盘设计

轮式结构采摘机器人以驱动麦克纳姆轮来带动机器人进行移动，工作底盘设计要实现控制麦克纳姆轮，完成各种前进、后退、左右平移、原地旋转、实物抓取等动作。麦克纳姆轮的运动原理如图 2 所示。

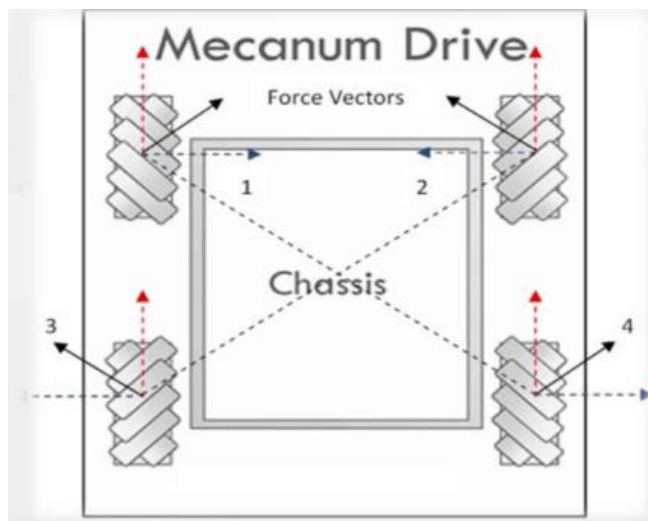


图 2 麦轮运动原理图

麦克纳姆轮的主要结构包括主体轮辋和回转辊子其基本结构如图 3 所示，回转辊子均匀排布，且一般与轮辋轴线呈现 45° 的夹角，这种轮子可以让机器人实现全方向运动，但缺点是会导致运动的效率下降。



图 3 麦轮结构图

因为本课题中的工作环境要求机器人在移动时精确且平稳，同时在执行工作时其底盘也要有相当的载荷能力和稳定性。所以在轮组布局上，本课题采用稳定性较高的四轮布局，并以铝合金材料为底盘材料。驱动方式则选择四轮驱动的方式，以提高稳定性和电机利用率。

基于此进行底盘的结构设计，并要求移动底盘能符合载荷和工作速度。底盘在 Solidworks 软件中的 3D 模型如图 4 所示。

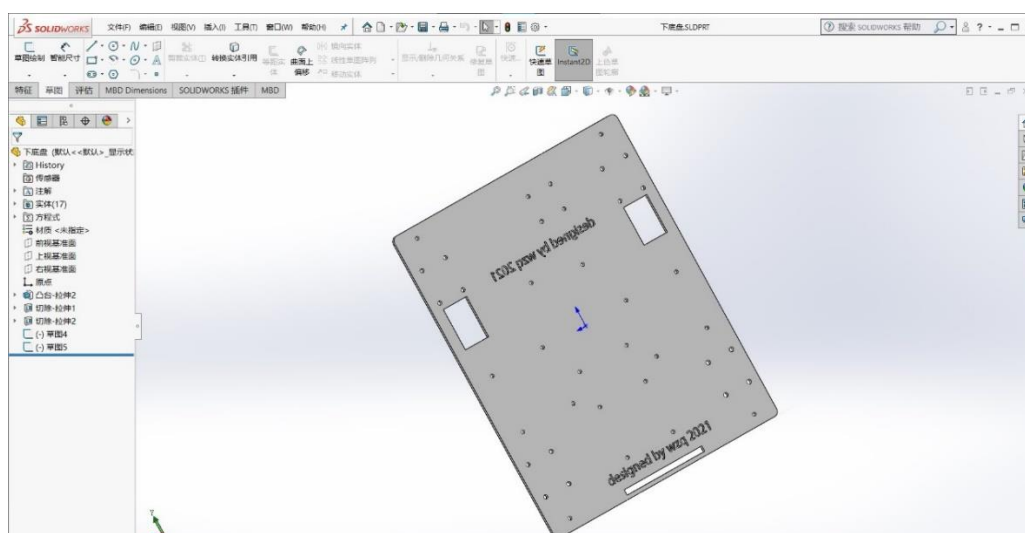


图 4 底盘 3D 模型

加工后的底盘如图 5 所示。

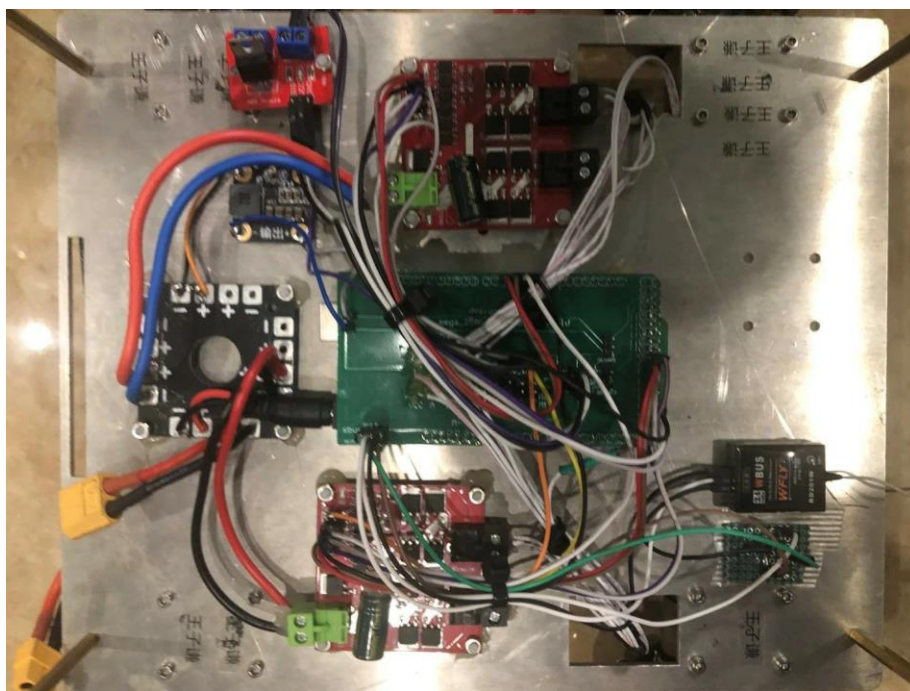


图 5 加工后的底盘

底盘控制板采用 Arduino mega 2560 芯片开发板，在上面设计了拓展板，拓展板集成了电机控制与通讯，供电，机械臂控制，遥控器通讯，降压电路等等。总模式图如图 6 所示。

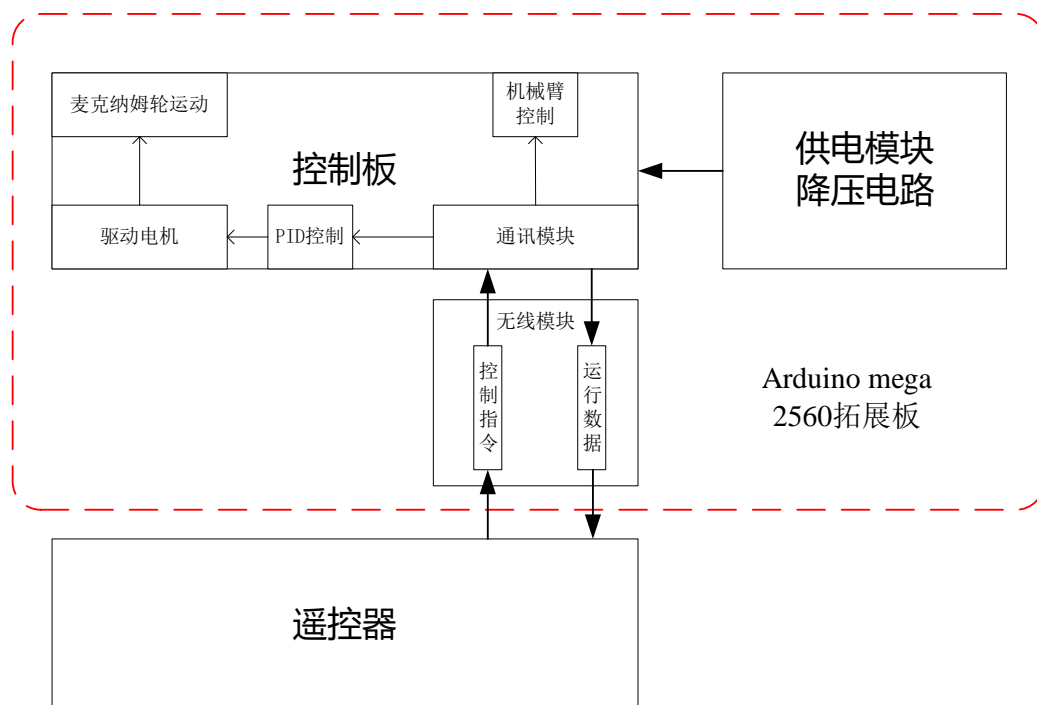


图 6 电路模式图

拓展电路板使用 Altium designer 设计，设计图纸如图 7 所示。

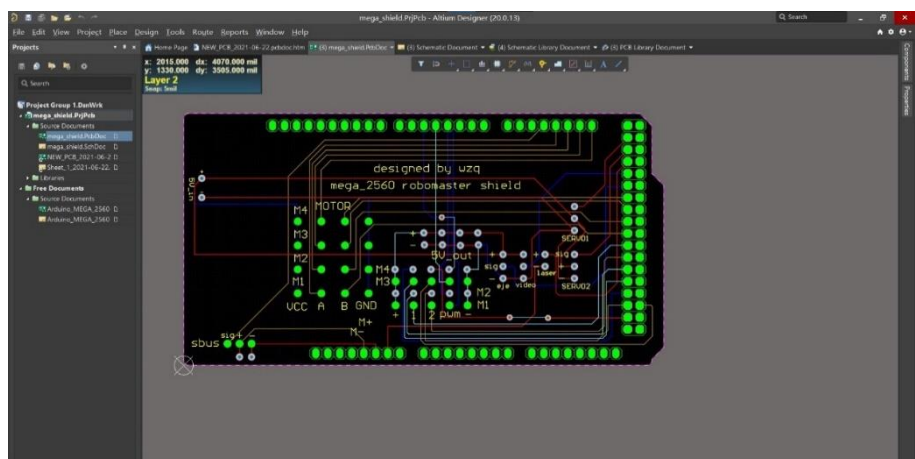


图 7 电路板设计图纸

加工后的 PCB（Printed Circuit Board，印制电路板）电路板如图 8 所示。

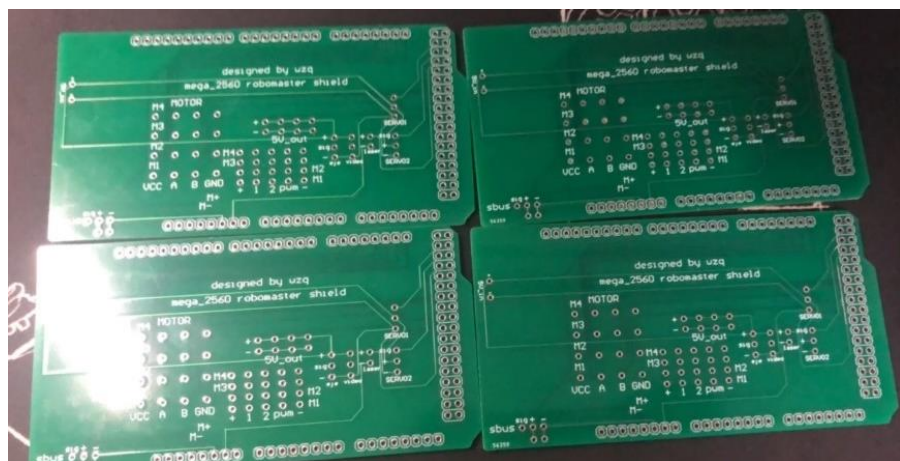


图 8 加工后的 PCB 电路板实物图

加工成型的底盘如图 9 所示。

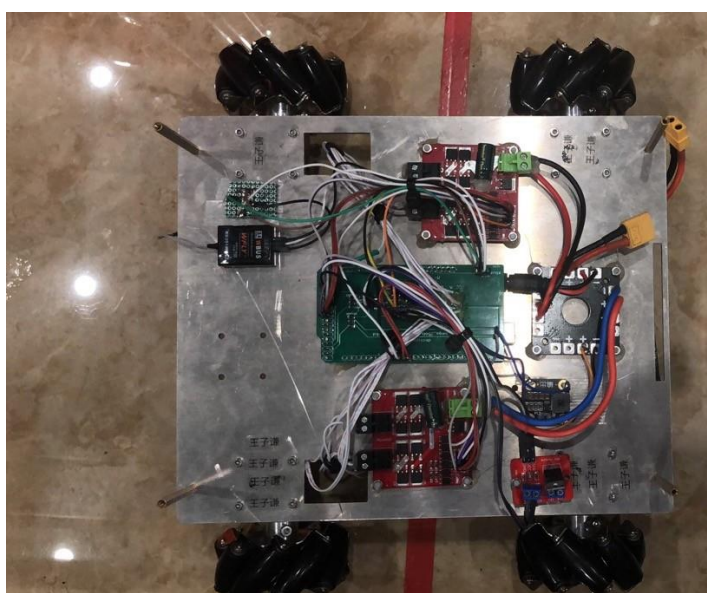


图 9 装配完成的底盘总体外观

2.1.2 电机转速读取与 PID 控制

本课题采用增量式霍尔编码器来测量电机转速，霍尔编码器是通过磁电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器，其原理如图 10 所示。增量式编码器是将设备运动时的位移信息变成连续的脉冲信号，通过在一定时间内对脉冲信号进行计数来测量电机位移量。

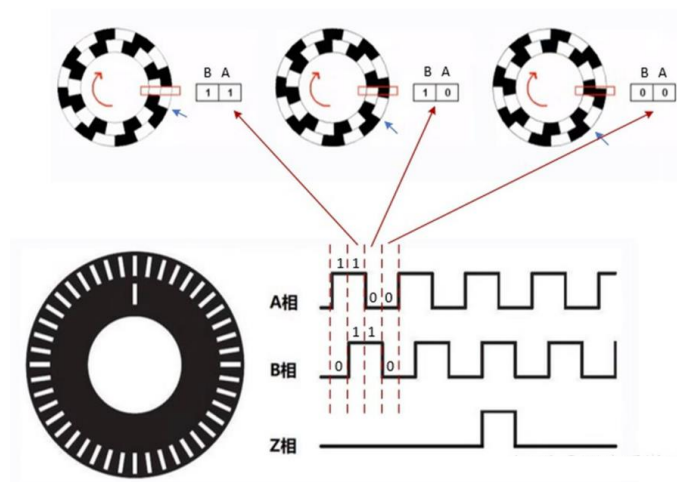


图 10 霍尔编码器工作原理

根据上图所示的原理，当 ABZ 相脉冲发生变化时，将会触发 MCU（Microcontroller Unit，微控制单元）中断响应，中断服务函数将为脉冲进行计数，计数周期为 30ms，每个计数周期结束，中断服务函数将脉冲数量 in1 赋值给速度变量 M1S，同时 in1 清零，并且开始下一周期的计数。得到的电机转速，将作为 PID（Proportion Integral Differential，比例积分差分）控制的输入反馈，实现电机转速的闭环控制。

电机转速的指令信号，也就是电机转速闭环控制的参考值来自于机器人的遥控器，指令信号必须映射到机器人的三个运动方向（偏航、平移运动、前后运动）才能实现对机器人的平滑控制，同时也让机器人能进行更加复杂的组合运动。但这种控制方法的缺陷在于，如何把霍尔编码器采集得到的数字信号，准确快速地反映到 PID 控制算法的实际程序中，其中一个比较重要的问题就是电机的转向。例如，当电机一开始是正转，而下一时刻的控制信号是反转时，如果程序中，转速只是一个无符号的标量值，则会导致 PID 的输出出现错误，如目前控制信号时正转 20，下一个控制信号是反转 30，PID 的误差输出理应是 $|30 - (-20)| = 50$ ，但如果如果没有事先判断这两个信号在方向上不同，则会导致 PID 的误差输出为 $|30 -$

20|=10，这显然是错误的。

利用霍尔编码器输出的 AB 两相脉冲出现的顺序可以很好地解决上面的问题，当 A 相计数脉冲超前于 B 相计数脉冲时，我们视为电机正转，B 相脉冲超前于 A 相脉冲时，我们视为电机反转，则可以在程序中增加一个转向判断标志位，通过监测编码器中传来的 AB 相脉冲的先后顺序，来对转向判断标志位进行置 0 或者置 1，由此完成对电机转向的判断。

2.1.3 遥控信号读取

本课题采用了天地飞 9 的遥控和 Sbus 接收机，Sbus 是一种协议,它与 Uart 类似,可以与单片机通过串口通信(Serial)。

Sbus 接收机相对于传统接收机有很多好处。传统的 PWM（Pulse width modulation，脉冲宽度调制）接收机读取速度慢,每一个读取周期大约需要 2ms,阻碍程序进行。并且 PWM 接收机精度低，还会被外部中断干扰。而 Sbus 接收机耗时少,精度高,不会受干扰。经过测试，Sbus 接收机的读取周期几乎可以忽略不计,并且信号很稳定,不易受外部干扰,有利于机器人的稳定和精准控制。

然而 Sbus 接收机的缺陷是其读取算法比较复杂,而且 Sbus 的原始信号需要经过取反电路才能被主板正确读取。取反电路如下图 11。

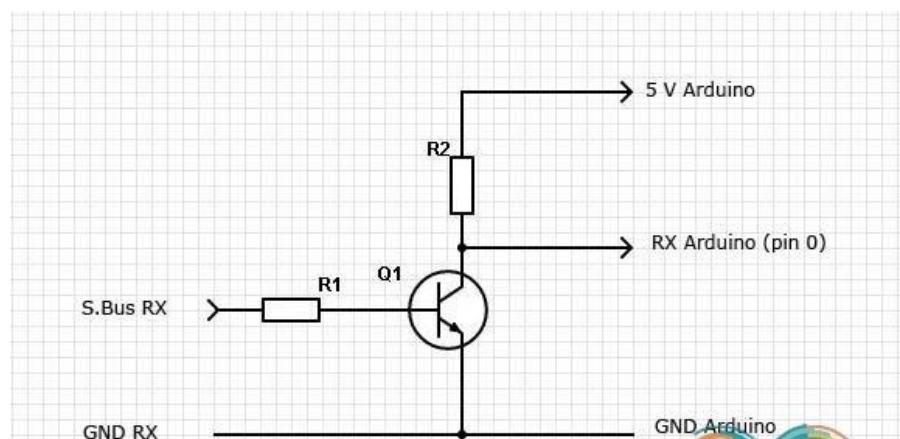


图 11 取反电路电路图

2.1.4 电机控制

电机的控制策略是机器人运动过程中的一个非常重要的环节，电机能否根据遥控器的指令进行平滑的运动，是衡量控制策略好坏的一个重要指标。传统的电

机控制策略是直接读取遥控器的指令输出值，直接根据遥控器信号开度来决定电机的转矩大小，这种控制策略简单快速，但如果操作人员操作不熟练，或者控制信号产生抖动，会导致电机转矩信号的剧烈抖动，反映到机器人的运动上的就是卡顿或突然加速等情况，这将导致控制的不顺滑。

本设计提出了一种新颖的控制策略，首先对遥控器的指令信号进行读取，根据指令信号，计算得出机器人整体需要的运动方向、运动加速度等信息，再对这些信息进行进一步的分解，得出机器人纵向运动、横向运动、旋转运动三个维度对应的参考值，为了让机器人的运动更加顺滑，四个轮子对应的电机将根据这三个参考值，在矢量控制法的基础上，给出四个相互独立的参考值，从而实现不同车轮之间的解耦控制，使得机器人的运动更加顺滑。控制的基本框图如图 12 所示。

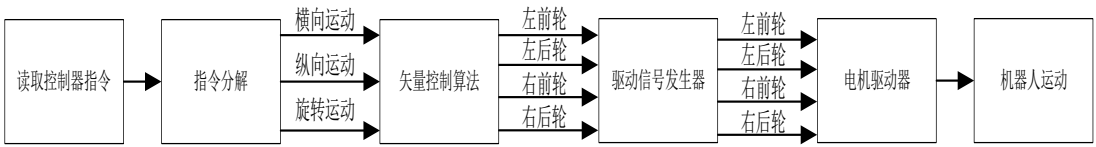


图 12 电机控制算法流程图

2.2 自动驾驶算法

在底盘控制算法的基础上，机器人可以进一步实现自动驾驶算法。将农田的地图和规划好的路线导入机器人的 MCU 中，机器人就可以实现自动收割。机器人在识别到番茄以后执行摘取程序并收获番茄，之后继续按照规划路线向前行驶，直到识别到下一个番茄。

2.3 机械臂

2.3.1 硬件设计

本课题使用如图 13 所示的六轴机械臂采摘番茄。

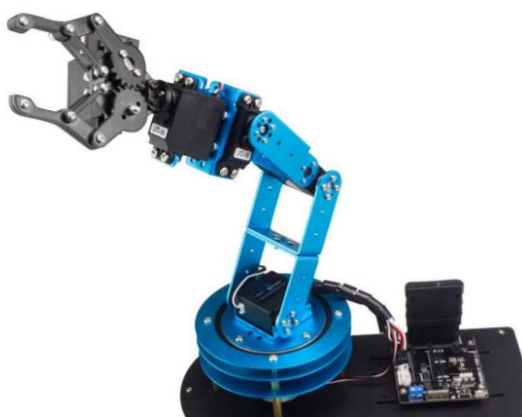


图 13 六轴机械臂

整套机械臂一共使用了 6 个高精度数字舵机 我们从上往下看。爪子部分使用的是具有防堵转功能的 LDX-335MG 数字舵机，当发生堵转时，舵机会自动计时，当发现堵转超过 4 分钟时，舵机会自动停止工作。接下来两个舵机是 LFD-06 防堵转低功耗的数字舵机，当发生堵转时，舵机内部会自动进行保护。在云台上的两个舵机是高精度的双轴数字舵机，它们采用插拔的连接方式，布线、更换都十分方便。最后底座上的舵机采用大扭力的 1501 舵机，它有 15KG 的扭力，能旋转 180°。六轴机械臂控制算法复杂，需要与主板进行实时通信，所以本课题设计了一块通信电路板，设计图如下图 14 所示。

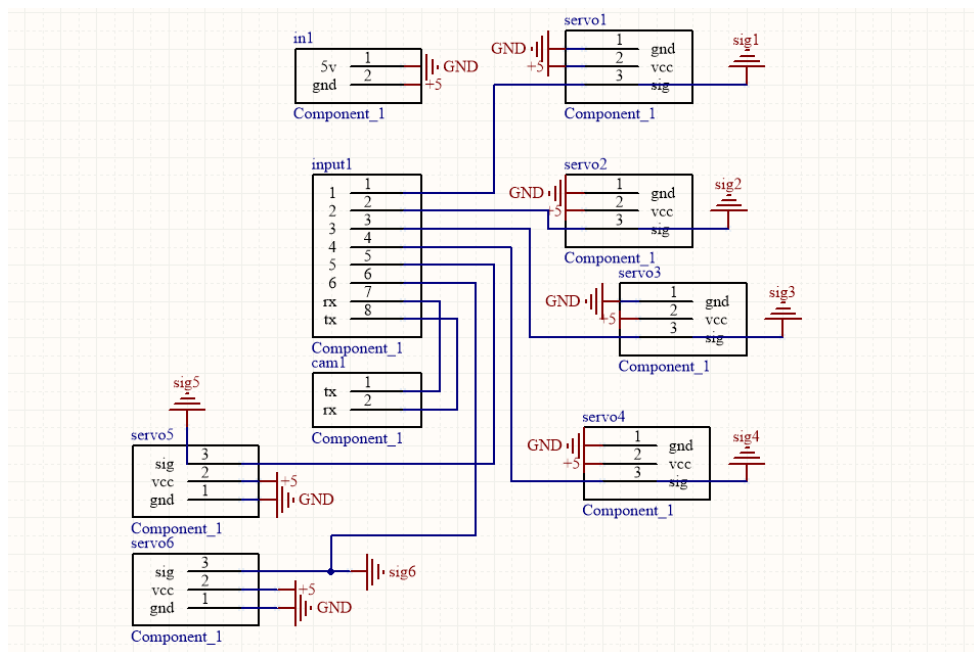


图 14 机械臂主控板通讯电路板原理图

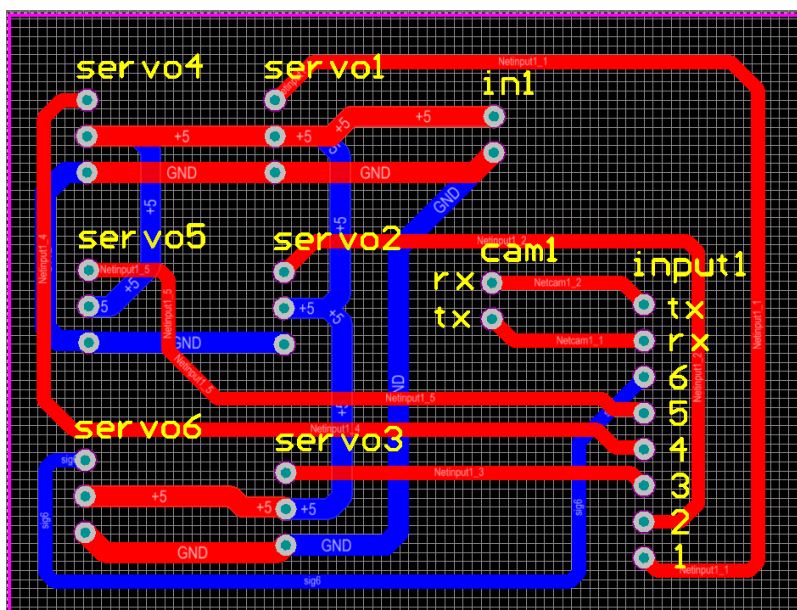


图 15 机械臂主控板通讯电路板电路图

2.3.2 姿态解算

姿态解算是采摘机器人的一个基础、重要部分，其作用是估计出来的姿态会发布给姿态控制器，控制机器人运动。姿态解算的关键是理解关于坐标系的概念、姿态角的几种描述方法，以及物体从一个姿态经过运动变化到另一个姿态，并把这个中间过程简化为一种变换关系。

首先对机械臂进行数学建模，如图 16 所示，取机械臂底部舵机作为原点，通过每个舵机当前的角度解算出机械剪刀当前的坐标，通过摄像头返回的数据算出目标物体(番茄)的坐标。然后通过方程解出机械臂要达到目标物体，每个舵机需要转动的角度。

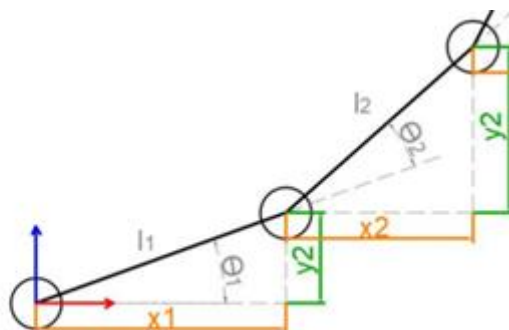


图 16 机械臂数学模型

根据上述模型采用几何画板软件进行仿真的过程如图 17 所示。


```

#include<bits/stdc++.h>

using namespace std;

const double pi=3.1415926;

double angle(double x)
{
    return x*pi/180;
}

int main()
{
    double xp,yp,t1,t2,T1,T2,X,Y,dx,dy,l1=10,l2=5,r;

    r=sqrt(X*X+Y*Y);

    xp=l1*cos(t1)+l2*cos(t1+t2);

    yp=l1*sin(t1)+l2*sin(t1+t2);

    X=xp+dx;

    Y=yp+dy;

    T1=atan(Y/X)+acos(l1*l1+r*r-l2*l2);

    T2=acos((l1*l1+r*r-l2*l2)/2*r*l1)+acos((l2*l2+r*r-
l1*l1)/2*r*l2);

    cout<<T1<<" "<<T2;

}

```

2.3.3 舵机控制

舵机内部包括了一个小型直流马达；一组变速齿轮组；一个线性反馈电位器；以及一块控制电路板。其中，高速转动的直流马达提供了舵机的原始动力，带动减速齿轮组，使之产生高扭力的输出，齿轮组的变速比愈大，舵机的输出扭力也愈大，也就是说越能带动更大重量的负载（受齿轮强度限制），但输出的转速（响应速度）也愈低。

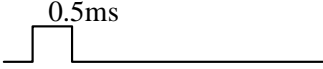





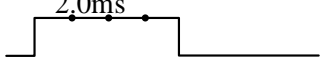

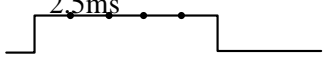

输入正脉冲宽度（周期为20ms）	舵机输出臂位置
	 $\approx -90^\circ$
	 $\approx -45^\circ$
	 $\approx 0^\circ$
	 $\approx 45^\circ$
	 $\approx 90^\circ$

图 18 舵机角度与脉冲关系

如图 18 所示，舵机的瞬时运动速度是由其内部的直流马达和变速齿轮组的配合决定的，在恒定的电压驱动下，其数值唯一。对于数字 PWM 舵机，其速度由其内部程序确定，一般但其平均运动速度可通过分段停顿的控制方式来改变，例如，我们可把动作幅度为 90° 的转动细分为 128 个停顿点，通过控制每个停顿点的时间长短来实现 0° — 90° 变化的平均速度。于多数舵机来说，速度的单位由“度数/秒”来决定。

2.4 视觉识别

本课题中采用如图 19 所示的 Openmv 摄像头识别番茄，OpenMV 是一个开源，低成本，功能强大的机器视觉模块。以 STM32F427CPU 为核心，集成了 OV7725 摄像头芯片，在小巧的硬件模块上，用 C 语言高效地实现了核心机器视觉算法，提供 Python 编程接口。本课题正是用 Python 语言使用 OpenMV 提供的机器视觉功能。



图 19 OpenMV 机器视觉模块

如图 20 所示，本课题中的机器视觉算法包括寻找色块、标志跟踪等，给采摘机器人提供环境感知和番茄识别功能等。并以大量数据和图片为基础，通过算法实现对于机器的训练。

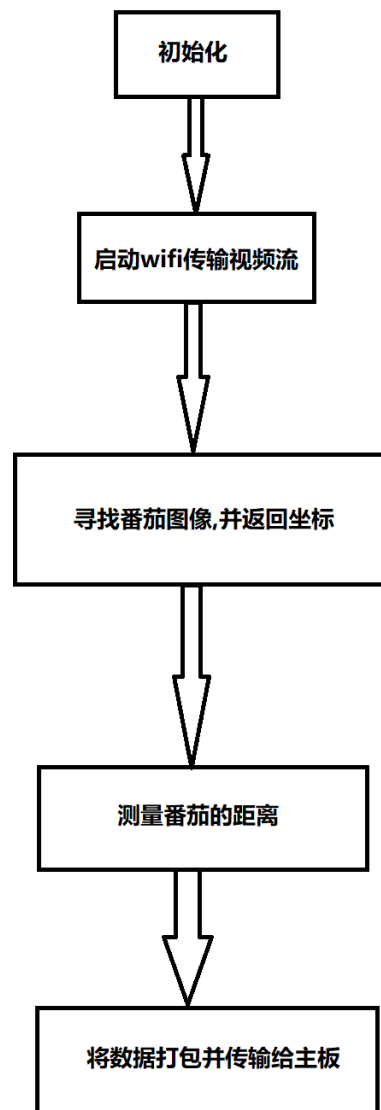


图 20 摄像头视觉识别算法流程

2.5 WIFI 无线通讯

本课题中除了使用遥控传递信号外，还使用了如图 21 所示的 WIFI 通讯模块通讯，两种通讯方式各有优缺点，相结合可以达到更好的通讯效果。WIFI 通讯有开发方便，传输数据量大的特点，可以传输实时视频图像。但是 WIFI 通讯距离较短，本课题使用 WIFI 模块传输视频流，使用电脑实时观看采摘过程。



图 21 WIFI 无线通讯模块

第三章 测试过程与测试结果

本课题搭建的自动采摘机器人外观如图 22 所示.



图 22 所搭建的自动采摘机器人外观

本章将分不同部分介绍本机器人测试过程与结果。

3.1 底盘运动能力测试

[调试视频](#)

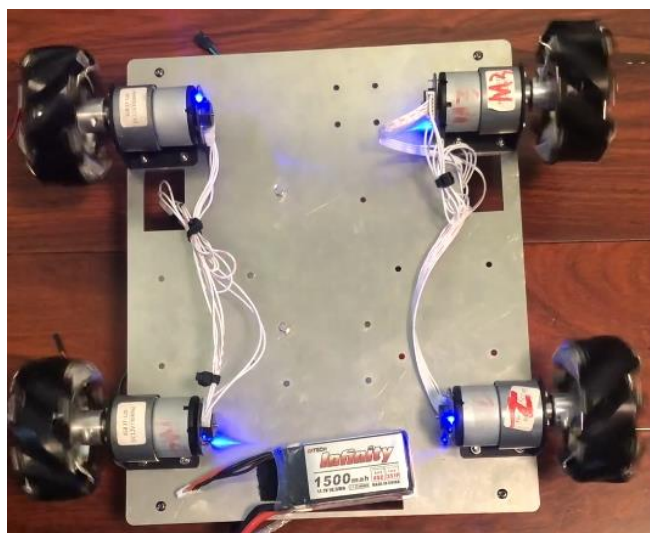


图 23 调节电机 PID 参数

首先要对 PID 参数进行调节，使电机的转速曲线尽量稳定。经过调节找到最优的参数后，底盘的运动轨迹非常趋近于直线。

[移动视频](#)

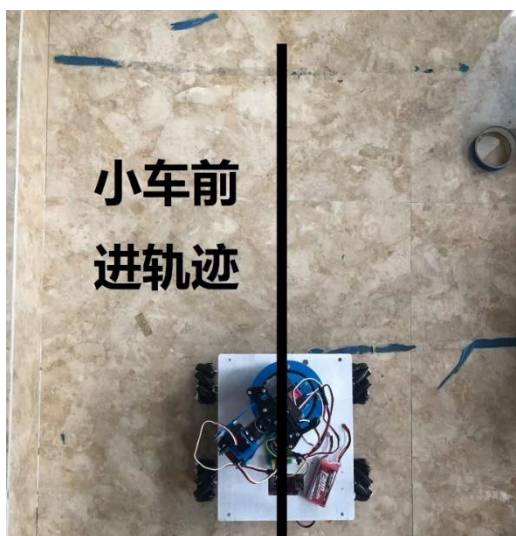


图 24 底盘走直线测试

3.2 遥控信号接受测试

3.2.1 取反电路测试

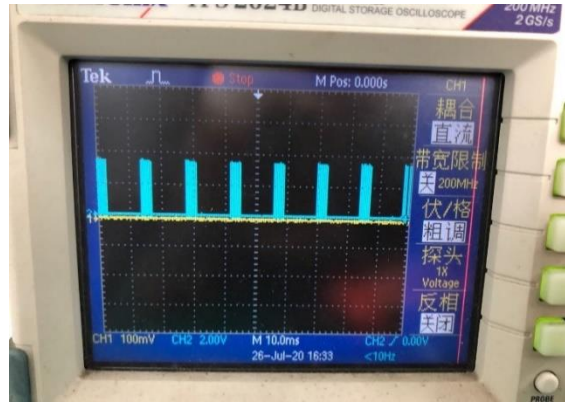


图 25 取反前的 Sbus 信号

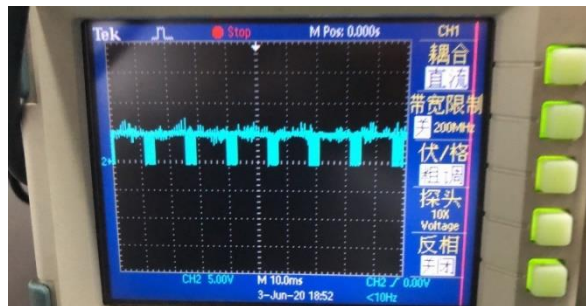


图 26 取反后的 Sbus 信号

经过测试,取反电路达到了预期功能。

3.2.2 串口通信代码测试

一开始串口通信无法工作，后来发现原因为 Arduino 主板的 Serial0 用于和电脑通讯，故更换为 Serial1 和 Sbus 接收机通讯，通讯成功。



图 27 Sbus 信号读取成功

3.3 六轴机械臂测试


3.3.1 姿态解算算法测试

本课题使用几何画板建立了动态模型，如图 28 为目标物体的坐标。

$$\begin{aligned} dx + (l1 \cdot \cos(\theta_1) + l2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)) &= 10.42 \text{ 厘米} \\ (l1 \cdot \sin(\theta_1) + l2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)) + dy &= 10.03 \text{ 厘米} \end{aligned}$$

图 28 几何画板中目标物体的坐标

下图为程序计算的舵机旋转角度。



```
C:\Users\lenovo\Desktop\arm.exe
54.6296 32.6148
-----
Process exited after 0.1424 seconds with return value 0
请按任意键继续. . .
```

图 29 程序计算的舵机输出角度

将该角度代入模型，得到的机械臂坐标与目标物体一致，计算正确

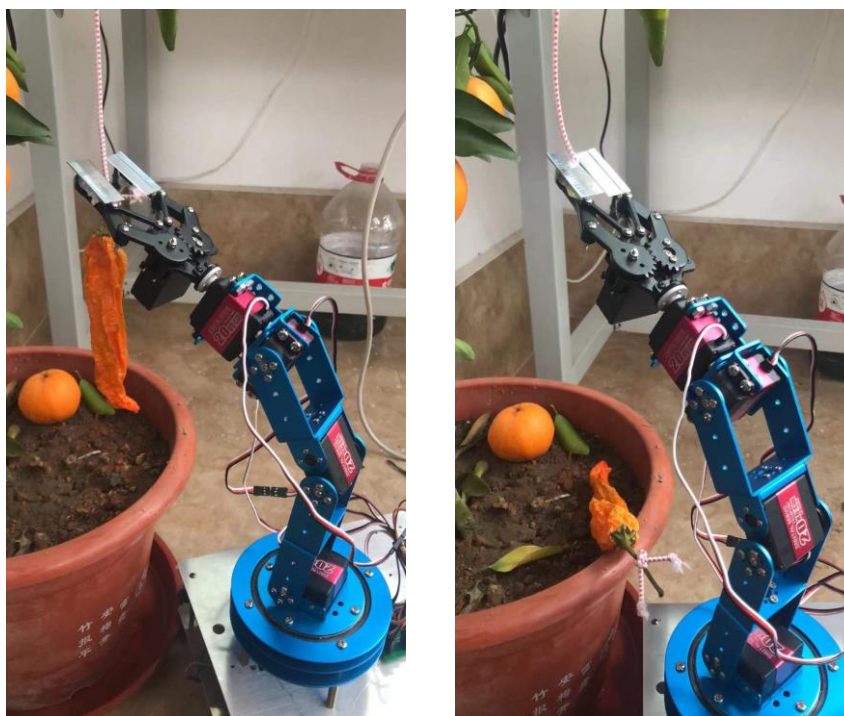
$$P \text{ 到 } y \text{ 的距离} = 10.42 \text{ 厘米}$$

$$P \text{ 到 } x \text{ 的距离} = 10.03 \text{ 厘米}$$

图 30 数据代入几何画板后的机械臂坐标

3.3.2 机械臂摘取测试

图 31 给出了摘取前后机械臂的动作，可以看到，机械臂可以将果蔬切下。



(a) 摘取前

(b) 摘取后

图 31 摘取前后的机械臂

3.4 Openmv 摄像头测试

测试表明，即使在复杂的环境中，摄像头还是可以准确地找出番茄的位置。



图 32 识别绿叶中的番茄



图 33 识别地上的番茄

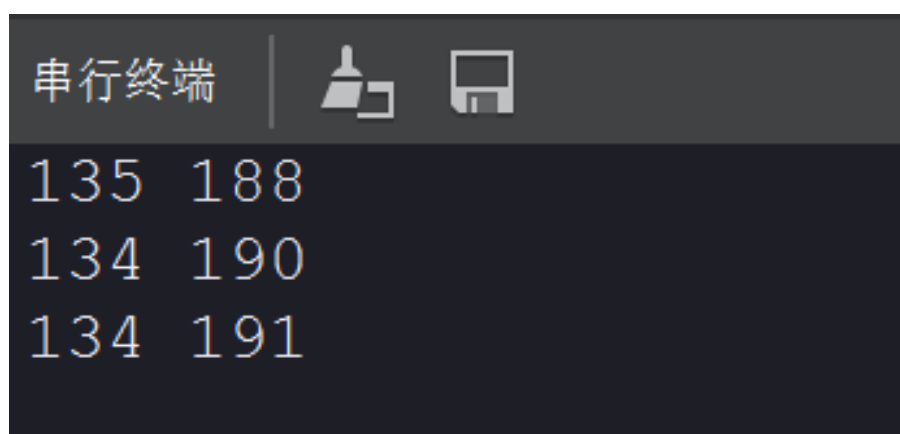


图 34 摄像头返回的番茄位置信息

3.5 WIFI 模块测试

经过测试，电脑或手机可以连接 WIFI，并通过特定地址查看视频流，延时很低。

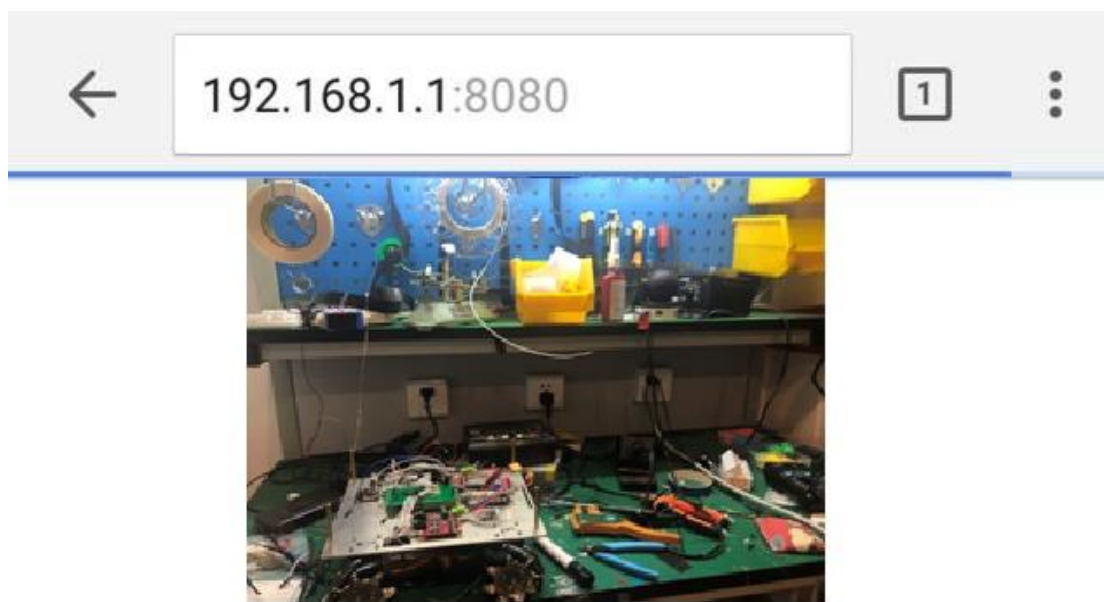


图 35 手机接收到的实时图像

3.6 TOF 光学测距传感器测试

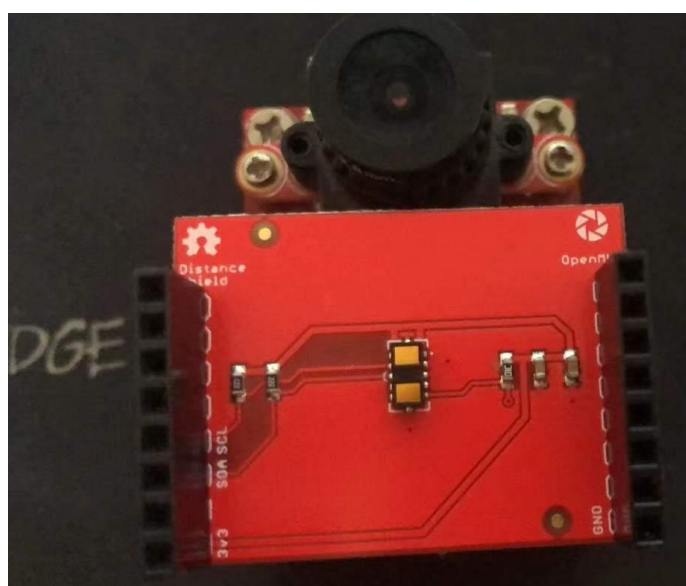


图 36 TOF 光学测距传感器

经过测试，TOF 传感器测距精度很高，可以达到 mm 级精度，并且延时很低，可以准确测量番茄的距离。

第四章 结论与展望

4.1 结论

本课题利用麦克纳姆轮底盘控制、数字 PID 闭环速度控制、视觉识别和姿态解算算法等初步实现了蔬果采摘机器人的智能控制和基本功能。它具有控制灵敏，动作灵活，便于操作的优点。下一步可以在图像识别等方面进行改进。由于时间限制，自动驾驶算法还很不完善，下一步将后续引入更先进的算法。

4.2 展望

今后可以在本课题已有成果基础上，增加机器人在复杂背景和夜间环境下的视觉识别能力。并融合多传感器，植入人工智能、深度学习等新型技术。

第五章 参考文献

- [1] 马瑛, 杨旭, 草莓采摘机器人成熟果实识别及避障控制系统研究—基于 ARM 与 FPGA [J]. 农机化研究, 2020, 40(1):1-18.
- [2] 谭涛, 蔬果采摘机器人的研究进展与展望 [J], 现代农业研究, 2020 (5) .
- [3] 王文杰, 贡亮, 汪韬等, 基于多源图像融合的自然环境下番茄果实识别, 农业机械学报, 2021 (9) .
- [4] 郭婷, 孙艺伟等, 全球农业传感器技术研发态势分析[J], 中国农业信息, 2020 (3) .
- [5] 李高铭, 聂卓赟等, 非平衡负载下轮式移动机器人的抗扰 PID 控制[J], 《控制理论与应用》, 2021 (3) .
- [6] 赖永林, 方建文等, 基于 Arduino 单片机的增量式编码器模拟装置设计[J], 工业控制计算机, 2021 (5) .

第六章 心得感受

本课题从最初的想法，到框图设计，图纸设计，到买物料，搭建实验系统，建模，编程和调试，我学习到了很多知识。我觉得要解决一个较为复杂的工程问题，需要在平时积累非常多的知识和能力。同时，在调试过程中，一些看似简单的问题，可能会有意想不到的困难，而解决这些困难，需要细致耐心，仔细观察和思考。

看着自己的想法从图纸和代码变成了现实，整个过程带给我成就感和快乐，我会在科创这条道路上继续前行！