

基于 ROS 的大棚除草机器人设计

彭雪斌, 易 艺, 周联浩, 陈得日, 梁 军

(桂林信息科技学院 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了解决人工除草效率低下的问题, 设计了一种基于 ROS (robot operating system) 的大棚除草机器人系统; 以英伟达 Jetson Xavier NX 和 STM32 分别作为主控制器和从控制器, 将激光雷达、深度相机和三轴陀螺仪/加速度传感器分别安装在除草机器人的正前方、顶层中部和底层中部, 获取机器人行进路线周围的信息和机器人的姿态信息, 然后进行分析、处理、3D 建图和导航; 主控制器与从控制器通过串口通信方式交互命令和数据, 协同工作; 从控制器通过 PID 控制算法控制除草机器人运动和机械臂动作进行喷药除草; 实验结果表明, 在正常的光线环境下, 除草机器人能够以 0.3 m/s 的速度进行喷药除草, 除草效果好, 系统运行稳定。

关键词: ROS; 激光雷达; 深度相机; 喷药除草

Design of Greenhouse Weeding Robot Based on ROS

PENG Xuebin, YI Yi, ZHOU Lianhao, CHEN Deri, LIANG Jun

(College of Electronic Engineering, Guilin Institute of Information Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency of manual weeding, a greenhouse weeding robot system based on robot operating system (ROS) was designed. Nvidia Jetson Xavier NX and STM32 were used as the master controller and slave controller respectively. The laser radar, depth camera and three-axis gyroscope/acceleration sensors were installed in the front, middle of the top and middle of the bottom of the weeding robot respectively, and the information of the robot's traveling path and the robot's post was obtained. Then the 3D mapping and navigation the robot were analyzed and processed. The master controller and slave controller worked together to interact the commands and data through serial communication. The slave controller controlled the movement of weeding robot and the movement of mechanical arm through the PID control algorithm to spray and weed. The experimental results showed that the robot could spray weed at a speed of 0.3 m/s under the normal light environment, the weeding effect was good, and the system ran stably.

Keywords: ROS; laser radar; depth camera; spraying weed

0 引言

目前, 在我国主要的除草方式是人工除草和化学除草, 人工除草主要是通过人力或简单的农具进行人工除草, 其效率极为低下, 且工作量巨大, 大大消耗了农业生产中的劳动力。而化学除草主要是通过化学除草剂进行除草, 农民在除草过程中往往采用大面积喷洒的方式进行除草, 该方法的缺点是对地面杂草目标没有识别能力, 大面积的施药导致农药污染^[1]。此外, 没有针对性的大面积除草, 除草效率不高。近几年, 我国第一产业劳动力大大下降, 虽然我国人口基数很大, 但劳动力大多分布在其它产业, 而且由于我国人口老龄化问题的产生, 农业生产成本也不断提高, 所以研究农业机器人具有重要的意义^[2]。

农业机械化, 智能化是国家农业发展的必然趋势。近年来, 中央下发文件中明确指出, 现代化农业的发展对于我国的新农村建设是必不可少的重要环节, 更是提出了精

准农业的新概念, 而精准农业中重要之一就是利用现代先进的技术条件减少对自然环境的污染和破坏, 智能除草机器人的研究可以大大降低劳动成本, 同时避免了大面积使用化学药剂对环境造成的污染和对人类健康的危害。将精准农业应用在了农业生产中, 可以提高农产品的质量和产量, 成为近年来科研人员研究的热点课题^[3-12]。

为了精准地喷洒农药进行除草, 减少农药对环境的污染和农药在农作物的残留, 提高除草效率, 设计了一种基于 ROS 的大棚除草机器人。除草机器人采用 Jetson Xavier NX^[13] 和 STM32F103 作为控制器, 辅以激光雷达、深度相机和三轴陀螺仪/加速度传感器进行路径规划和导航, 通过相机采集大棚中的杂草和农作物图像, 经过分析、算法处理后获取杂草的位置信息, 然后控制机械臂上携带的喷头喷洒农药, 进行除草, 从而达到除草的目的。

1 系统组成和原理

除草机器人系统由顶层控制模块和底层控制模块组成,

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-05-10。

基金项目: 2020 年国家级大学生创新训练项目(202013644010)。

作者简介: 彭雪斌(1998-), 男, 四川宜宾人, 大学本科, 主要从事嵌入式系统与传感器应用方向的研究。

通讯作者: 易 艺(1983-), 男, 广西防城人, 硕士, 教授, 主要从事测控技术、传感器技术方向的研究。

引用格式: 彭雪斌, 易 艺, 周联浩, 等. 基于 ROS 的大棚除草机器人设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 199-203, 212.

其系统组成框图如图 1 所示。

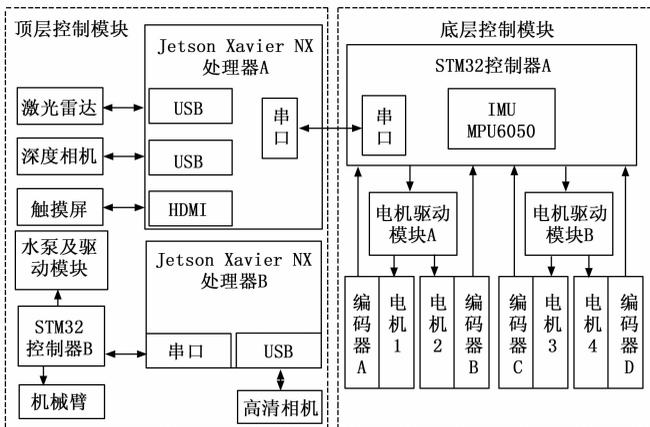


图 1 系统组成框图

顶层控制模块是除草机器人系统的主控制中心，主要负责除草机器人系统的功能控制、信息采集和处理等工作，Jetson Xavier NX 处理器 A 主要控制激光雷达模块和深度相机模块进行工作，分别获取机器人行进路线上的二维平面扫描数据和三维深度图像数据。

底层模块中的 STM32 微控制器 A 通过电机驱动模块 A 和电机驱动模块 B 控制机器人上的 4 个电机进行工作。霍尔编码器分别用来检测 4 个电机的转速，获取机器人运行的速度，经过处理后得到除草机器人的里程计定位坐标。MPU6050 三轴陀螺仪/加速度传感器用来获取除草机器人的姿态信息，然后通过 STM32 微控制器 A 的串口将除草机器人的姿态信息和里程计信息发送给 Jetson Xavier NX 处理器 A。

Jetson Xavier NX 处理器 A 将除草机器人的姿态信息、里程计信息、二维平面扫描数据和三维深度图像数据进行处理，从而完成除草机器人对大棚的建图和导航功能，可以进行巡垄行驶。

在巡垄的过程中，通过 Jetson Xavier NX 处理器 B 控制高清相机工作，不断获取大棚内垄间的图像信息，然后进行图像处理得到杂草的位置信息。Jetson Xavier NX 处理器 B 通过串口发送指令给 STM32 微控制器 B，STM32 微控制器 B 收到指令后控制机械臂工作，使机械臂上携带的喷头到达杂草位置上方，然后控制水泵工作，进行喷药除草。

2 系统硬件电路设计

系统的硬件电路设计主要包括顶层控制模块，底层控制模块的电机驱动电路、MPU6050 传感器电路、编码器电路和系统电源电路设计。

2.1 顶层控制模块的硬件设计

顶层控制模块由 Jetson Xavier NX 处理器、激光雷达、深度相机、高清相机、触摸屏、STM32 微控制器、高清相机、水泵及其驱动模块和机械臂组成。其部分硬件设计框图如图 2 所示。

主处理器采用的是英伟达 Jetson Xavier NX 处理器，它采用 Volta 架构的 384 核 GPU，且加入 48 个 Tensor Core，

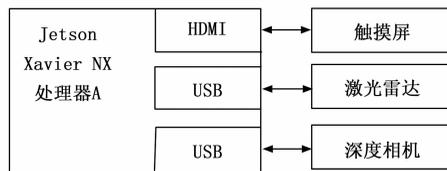


图 2 顶层控制模块部分电路设计框图

拥有 21TOPS 的 INT8 运算能力，它还拥有 Carmel 架构的 6 核 CPU，带有 10MB 的缓存，64 位运算能力，最高可以达到 1 900 MHz 主频，可以同时处理来自多个传感器的高分辨率数据^[14]。因此，选用 Jetson Xavier NX 处理器，可以满足整个除草机器人系统的需求。

深度相机采用奥比中光 Astra Pro 实感深度相机，深度范围能达到 0.6 m 至 8 m，延迟在 45 ms 以内，采用 USB2.0 进行数据传输，主要用于获取垄间的深度图像信息。深度相机能够将具有一定结构特征的光线投射到被拍摄物体上，再由专门的红外摄像头进行采集。它具备一定结构的光线，会因被摄物体的不同深度区域反射，而采集不同的图像相位信息，并能够通过运算单元将这种结构的变化换算成深度信息，以此来获得三维环境信息，深度相机的深度视觉利用 RGB 图像和深度图像来感知机器人周围空间的三维信息，获得的环境信息丰富。但是深度相机是通过深度图像来感知周围环境的信息，由于图像会受环境光照变化的影响，当环境光照不理想时，深度相机难以获得足够的图像特征匹配点数目，从而导致获取环境图像信息不够准确^[15]。

激光雷达采用思岚 RPLIDAR A1 型激光雷达，主要用于获取机器人行进路线上的二维平面数据。激光雷达通过旋转的反射镜将激光发射出去，利用接收反射光和发射光的时间比较从而完成距离的测量任务，因此激光雷达是通过激光感知机器人周围的环境信息，其单次测量准确，受外界的环境变化影响小，但是数据稀疏，并且只能获得与激光雷达同一高度的二维信息，而对于不在同一高度的障碍物束手无策^[15]，因此，除草机器人系统采用激光雷达和深度相机来获取除草机器人行进路线的环境信息，将激光雷达和深度相机结合，可以弥补各自的不足，取长补短，解决了在除草机器人行进过程中垄间环境信息的感知问题，提高了除草机器人对垄间环境信息的感知能力，以及同步定位和建图的准确度^[15]。

在人机交互方面，除草机器人采用了一块 IPS 电容触摸高清屏。电容高清触摸屏通过 HDMI 接口和 Micro USB 接口与英伟达 Jetson Xavier NX 处理器连接，完成画面的显示和触摸功能。

2.2 电机驱动模块的硬件设计

电机驱动模块采用东芝半导体公司生产的直流电机驱动芯片 TB6612FNG 来实现。该芯片采用大电流 MOSFET-H 桥结构，具有双通道电路输出功能，可同时驱动 2 个电机，TB6612FNG 每通道输出最高连续驱动电流为 1.2 A^[16]。

该芯片可以驱动 12 V 直流减速电机, 满足除草机器人的需要。底层微控制器采用的是意法半导体公司 32 位增强型的 STM32F103 微控制器作为核心控制器, STM32 具有片上资源丰富、功耗低和性能高等优点, 最高工作频率能够达到 72 MHz, 拥有 64 k 的 SRAM, 可以满足除草机器人底层控制的功能需求, 电机驱动模块直接与 STM32 控制器连接, STM32 控制器通过 PID 算法调节 PWM 的占空比, 通过 TB6612FNG 电机驱动模块, 达到精确控制各个电机转速的目的, 其电路原理如图 3 所示。

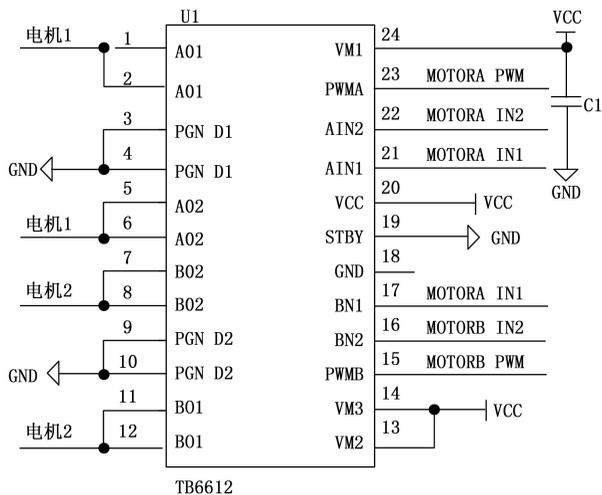


图 3 TB6612FNG 电机驱动模块电路原理图

2.3 IMU 加速度/陀螺仪模块的硬件设计

IMU 加速度/陀螺仪模块采用的 Invensense 公司的 MPU6050 芯片来实现^[17]。该模块用来获取除草机器人的姿态信息。在实验过程中得知: 如果仅使用一种里程计信息, 其存在累计误差, 随着时间的推移和轮子打滑等问题, 会导致除草机器人在位姿的估算定位中, 存在较大的误差。通过将 IMU 加速度/陀螺仪模块的数字运动处理器实时输出机器人的角速度, 经过积分得到姿态信息, 然后结合轮式里程计、视觉里程计^[18]等多种里程计信息, 可以更准确地得到机器人位置和姿态^[19]。IMU 加速度/陀螺仪模块的电路原理图如图 4 所示。

在除草机器人上安装霍尔编码器, 用来实现电机转速的测量。设电机测速编码数为 M , 在一个时间周期 t (单位为 s) 内, 测量得到的脉冲数为 N , 则由公式 (1) 可以计算得到除草机器人上每个电机的转速^[20]。

$$n = \frac{60N}{Mt} \text{ r/min} \quad (1)$$

将除草机器人的轮子半径 r 和电机的减速比 (1 : 50) 代入公式 (2) 进行计算, 得到除草机器人每个轮子的速度。

$$v_r(v_l) = 100 * n * (2 * \pi * r) / 50 \quad (2)$$

式 (2) 中左车轮速度为 v_l , 右车轮速度为 v_r 。

除草机器人采用 4 个车轮差速运动的模型, 左侧前后两个车轮的速度相同, 右侧前后两个车轮的速度相同, 因此将除草机器人左侧车轮速度为 v_l , 右侧车轮速度为 v_r ,

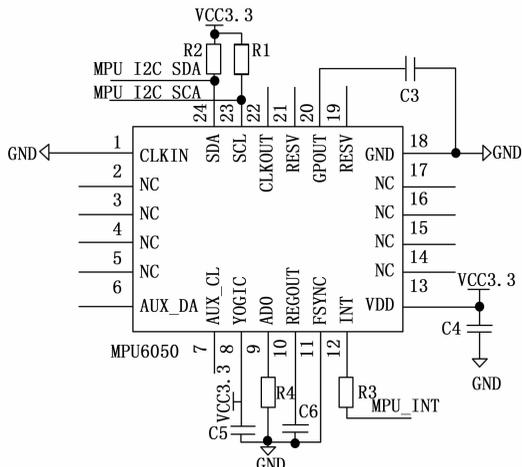


图 4 IMU 加速度/陀螺仪传感器电路原理图

左右车轮间距为 L , 代入公式 (3)、公式 (4) 和公式 (5) 可以分别求得除草机器人的线速度 v 、角速度 ω 和旋转半径 r 。

$$\text{线速度: } v = \frac{v_r + v_l}{2} \quad (3)$$

$$\text{角速度: } \omega = \frac{v_r - v_l}{L} \quad (4)$$

$$\text{旋转半径: } r = \frac{L(v_l + V_r)}{2(v_r - v_l)} \quad (5)$$

将除草机器人的角速度 ω 、线速度 v 对时间进行积分, 求得机器人的移动距离, 进而得到机器人的位置信息。

3 系统软件设计

系统的软件设计主要由顶层控制模块的处理器程序设计和底层控制模块程序设计组成。

3.1 顶层控制模块的处理器程序设计

在 Jetson Xavier NX 处理器中安装了 ROS 机器人操作系统, 即 Robot Operating System 它是一种适用于移动机器人、无人驾驶等领域的开源操作系统。它是衔接在真正操作系统和诸多实体传感器之间的一个特殊的中间平台。ROS 有一套标准信息定义格式, 包括集合概念信息定义 (如: 位姿、变换、矢量等) 和传感器信息定义 (如: 激光雷达、深度相机等)。

ROS 操作系统包含进程消息传递、底层控制和包的管理等基本服务。在除草机器人研发中, 可以利用 ROS 包含的开源功能包, 像搭建积木一样搭建功能模块^[19]。ROS 包含了服务、话题和参数服务器等通信方式^[21]。

ROS 操作系统主要处理来自激光雷达、深度相机、底层控制模块反馈的轮式里程计信息、高清相机等数据信息, 从而进行位置的测算、建图和导航, 以及杂草图像的处理和识别, 进而控制机械臂喷洒农药。其软件系统架构图如图 5 所示。

激光节点在建图、定位和导航过程中负责提供和发布雷达数据, 相机节点主要负责在定位和建图过程中读取和发布图像数据, 为机器人提供丰富的周围环境观测数据。

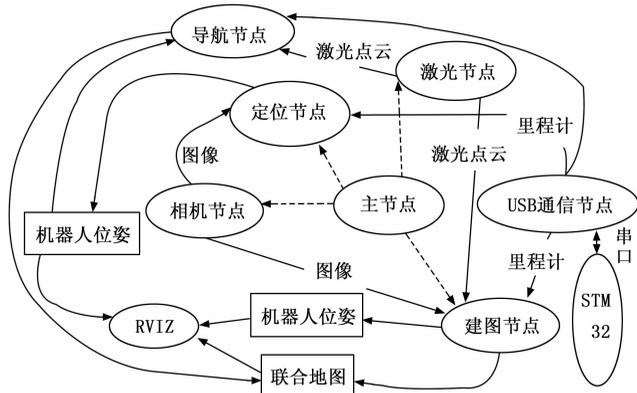


图 5 上层软件系统架构图

USB 通信节点通过与 STM32 底层控制器进行里程计等数据的交换，建图节点通过订阅里程计、图像、深度相机等数据完成二维栅格—三维点云地图的构建，同时输出机器人的位置状态，主节点主要负责管理其他各个节点的运行，为方便软件调试，采用了 Rviz（三维可视化工具）^[22] 作为可视化界面进行软件的调试。

除草机器人系统在进行建图时，激光节点和相机节点分别发布激光点云数据话题和图像的数据话题，建图节点会订阅激光点云数据话题和图像的数据话题并在节点内部进行处理，主要为了激光点云的特征提取和匹配以及根据标定的信息将激光点云映射到相机坐标系下，同时会在节点内部进行图像深度信息的提取和匹配特征点获得其位置和映射的关系，并同时订阅 USB 通信节点发布的里程计数据话题，利用匹配好的激光视觉数据进行位置姿态的测算，随后进行大范围的点云建图以及回环检测。启动 ROS 系统中的 Rviz（三维可视化工具）节点，Rviz 节点通过订阅机器人位姿数据和地图数据，为软件的调试提供效果展示^[23]。

除草机器人通过高清相机采集作物茎间杂草的图像数据，随后将图像数据传送给 Jetson Xavier NX 处理器 B 进行图像处理，在图像处理过程中，首先是将图像数据进行归一化处理，随后将图像数据的颜色空间转化为 HSV 颜色空间，利用阈值分割与滤波处理提取出绿色的像素数据，然后绘制出绿色像素数据矩形边框并计算其面积大小，滤除不符合面积阈值的矩形，计算出符合面积阈值的矩形空间中心坐标，即为杂草的像素坐标，接着再转化为世界坐标下的三维坐标点，并利用三维立体空间中的两点间距离公式计算出除草机器人与杂草间距离，然后控制机械臂定点喷洒农药。图像处理程序流程图如图 6 所示。

3.2 底层控制模块程序设计

底层控制主要由 STM32F103 微控制器作为核心控制器来完成控制工作。在底层控制模块中，STM32 采用片内定时器产生不同占空比的 PWM 信号送给电机驱动模块驱动除草机器人电机进行工作，然后使用片内的定时器来获取霍尔编码器输出的脉冲信号，经过处理得到除草机器人电机的转速。同时控制 IMU 加速度/陀螺仪模块工作，获取

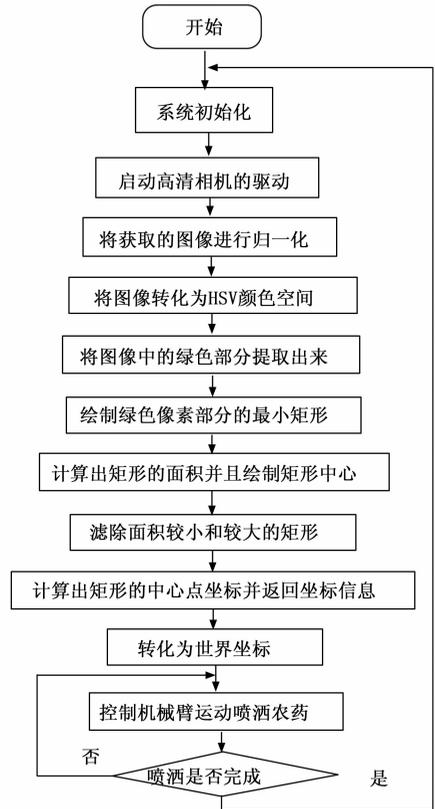


图 6 图像处理流程图

IMU 加速度/陀螺仪模块的数据，然后通过串口发送给 Jetson Xavier NX 处理器 A。STM32 微控制器通过串口接收来自 Jetson Xavier NX 处理器 A 的命令。底层控制软件实现流程图如图 7 所示。

在底层控制模块程序中，程序首先进行系统的初始化，比如定时器、串口中断、编码器和 MPU6050 模块的初始化等，然后程序在定时器的定时下以 100 Hz 的频率执行，读取 MPU6050 模块中的数字运动处理器 DMP（digital motion processor）解算的俯仰角、横滚角和航向角等数据，然后再以 50 Hz 的频率将编码器采集到的数据结合机器人的运动学模型，经正向运动学解析，计算出机器人的运动线速度和角速度，并对其在时间上进行积分，计算出机器人里程计坐标系下的坐标位置，接着通过串口向 Jetson Xavier NX 处理器 A 发送陀螺仪角速度、加速度、姿态角度、里程计坐标、里程计坐标变化量和编码器的当前值和目标值等数据，当 Jetson Xavier NX 处理器 A 通过串口向底层控制模块中的 STM32 微控制器 A 发送数据时，底层控制程序会先判断串口接收的数据是否符合命令格式，如果符合，就将接收到的数据进行存储，然后结合除草机器人的运动模型，经逆向运动学结算，计算出每个电机的速度，接着在通过 PID 算法调节控制 4 个电机的 PWM 信号的占空比从而实现控制除草机器人达到预期的速度。其 PID 算法的框图如图 8 所示。

图 8 中， $r(t)$ 为设定状态量， $y(t)$ 为实际状态量，

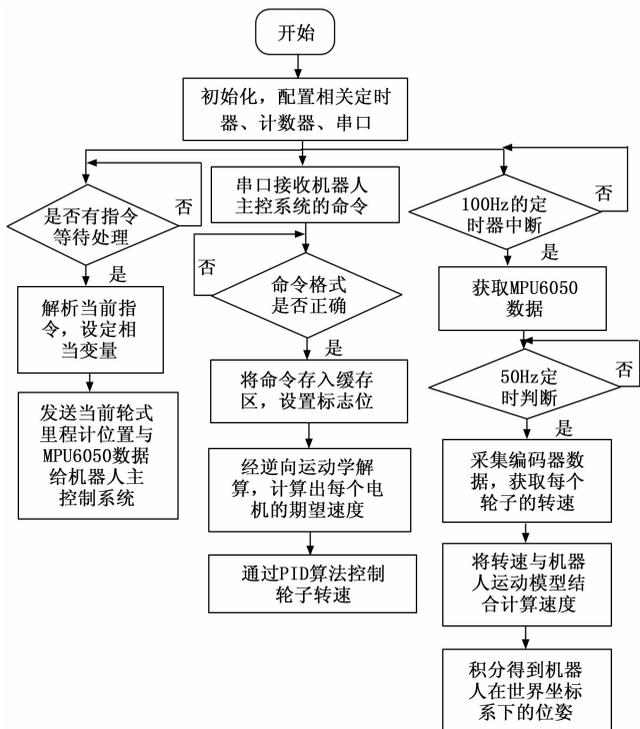


图 7 底层控制软件流程图

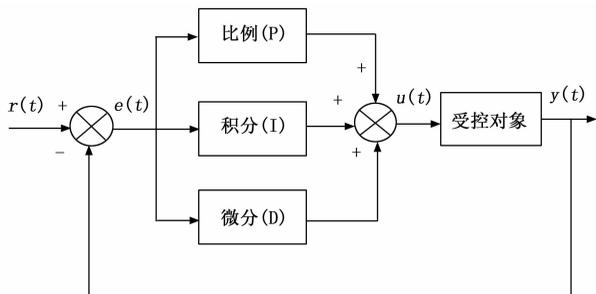


图 8 PID算法框图

$e(t)$ 为当前误差, $u(t)$ 为控制器输出。PID 是一个作用于闭环系统的控制算法, 由比例环节 (P)、积分环节 (I)、微分环节 (D) 共 3 个部分组成^[24]。

$$u_p(t) = K_p * e(t) = K_p * [r(t) - y(t)] \quad (6)$$

$$u_i(t) = K_i * \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

$$u_d(t) = K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t) dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

式 (6) 为比例环节公式 (P), 比例环节有误差存在时才会产生输出 $u_p(t)$ 。比例调节的过程是成比例地反应控制系统的偏差信号 $e(t)$, 偏差一旦产生, 通过 $K_p * e(t)$ 产生控制作用以减小偏差。

式 (7) 为积分环节 (I) 公式, 积分环节的输出 $u_i(t)$ 与系统的误差累加和有关。当系统存在误差时, 积分环节将误差累加后起调节作用, 直到误差为 0 后控制器稳定输

出。积分环节可以消除系统比例环节稳态误差, 一般常用 PI 调节, 即 $u_p(t) + u_i(t)$, 使得实际状态量等于设定状态量。

式 (8) 为微分环节 (D) 公式, 微分环节的输出 $u_d(t)$ 与系统的误差变化率有关。根据现在的趋势去判断未来, 可以阻碍未来可能出现过度的调节, 微分环节可以反应偏差信号的变化规律。

式 (9) 是整个 PID 控制器的输出, 即 3 个环节的输出求和^[25]。

4 系统功能实验测试

为了验证除草机器人系统的除草效果以及其工作的稳定性, 在现有的实验室条件下, 在实验室构建模拟测试环境, 选用白菜作为垄间作物植株, 白菜的总数量为 30 颗, 排列成 3 列即两垄的形式, 白菜排列的行间距为 60 cm, 株距为 60 cm, 垄长为 5.4 m, 适合机器人在行间行走, 杂草的株高在 2~10 cm 不等。为验证除草机器人喷药作业的实际喷药效果, 采用水分检测试纸进行测试观察。在测试过程中, 除草机器人系统调用事先建好的离线地图, 在除草机器人的操作界面规划好路径, 除草机器人沿着垄间行走。在正常光照条件下, 除草机器人进行喷药作业, 随后通过统计与分析水分检测试纸的颜色变化情况, 计算出除草机器人的喷药成功率, 实验结果如表 1 所示。

表 1 除草机器人的喷药作业实验结果

测试序号	行驶速度/(m/s)	喷药成功率/%
1	0.30	75.2
2	0.35	71.6
3	0.45	63.3
4	0.50	59.7

5 结束语

本文基于 Jetson Xavier NX 处理器搭载 ROS 系统, 结合激光雷达、深度相机和高清相机等外部设备, 采用图像识别处理技术、建图和导航技术、多传感器融合技术, 设计了一种大棚除草机器人。本文介绍了除草机器人的系统组成原理, 软硬件实现方法, 并对除草机器人进行功能测试, 实验结果表明, 在正常的光线条件下, 该除草机器人喷药除草效果良好。

参考文献:

[1] 丁 巍. GPS 组合模糊控制除草机器人导航系统研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
 [2] 侯学贵. 除草机器人杂草识别与视觉导航技术研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
 [3] 吕沐华, 丁珠玉. 基于机器视觉的果园喷药除草机器人视觉系统设计 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42 (5): 42-48.
 [4] 傅雷扬, 李绍稳, 张 乐, 等. 田间除草机器人研究进展综述 [J]. 机器人, 2021, 43 (6): 751-768.

(下转第 212 页)