

小型农业机械自动导航控制系统设计

吴浩基, 朱又敏, 冯智锐

(广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088)

✉ 3266469949@qq.com; gdouzhuyun@163.com; wangyi0601@163.com



摘要:丘陵耕地地块细碎、不平整、形状不规则,造成大型农业机械难以发挥作用,推进丘陵山区农机化极其艰难。设计一种基于树莓派(Raspberry Pi)微型电脑和 STM32 嵌入式单片机的小型农业机械自动导航控制系统。系统通过双频定位模块获取实时定位信息,利用双目摄像头、红外摄像头识别障碍物与耕地边界,采用惯性导航装置获取机械运动信息,树莓派综合分析各项数据以提供高精度导航,实现自动制动和转向。系统有效解决了地块不平整与地块形状不规则带来的自动导航精度不足的问题,推动小型农业机械的自动化,解放劳动力,更好地服务农业机械化率年增长超 2 个百分点的目标。

关键词:农业机械;树莓派;STM32;导航

中图分类号:TP399 **文献标志码:**A

Design of Automatic Navigation Control System for Small Agricultural Machinery

WU Haoji, ZHU Youmin, FENG Zhirui

(College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

✉ 3266469949@qq.com; gdouzhuyun@163.com; wangyi0601@163.com

Abstract: The hilly farmland plots are fragmented, uneven, and irregular in shape, making it difficult for large agricultural machinery to function effectively. Therefore, it is extremely challenging to promote agricultural mechanization in hilly and mountainous areas. This paper proposes to design an automatic navigation control system for small agricultural machinery based on the Raspberry Pi microcomputer and STM32 embedded microcontroller. The system acquires real-time positioning information through a dual-frequency positioning module, identifies obstacles and farmland boundaries with binocular and infrared cameras, and obtains mechanical motion information with an inertial navigation device. The Raspberry Pi comprehensively analyzes various data to provide high-precision navigation, achieving automatic braking and steering. The proposed system effectively addresses the issue of insufficient automatic navigation accuracy caused by uneven and irregularly shaped farmlands, promoting the automation of small agricultural machinery, liberating labor, and achieving an annual growth rate of over 2 percentage points in agricultural mechanization.

Key words: agricultural machinery; Raspberry Pi; STM32; navigation

0 引言(Introduction)

丘陵山区占我国国土面积的 2/3,我国丘陵山区耕地面积占总耕地面积的 1/3,是粮食经济作物的重要生产基地。丘陵

山区耕地的地理状况复杂,地理特征具有多样性的特点,地块细碎零乱、高低不平、坡多台多埂多、形状不规则,导致农机下地难、作业难、转运难。丘陵山区农业机械化是我国农业机械

化发展的最大短板所在。同时,大量青壮年劳动力外流、农耕人口老龄化、劳动力价格上涨和种粮收益下降,导致许多优质丘陵耕地出现撂荒现象。

近年来,西南诸省大力推广土地平整改造,推动农田地块小并大、短并长、陡变平、曲变顺和互联互通,提高农机适应性。同时,发展应对丘陵耕地特色的智能化农具,开发体型轻便、可精确导航及制动转向性强的小微型农业耕具,助力提升丘陵山区的农业机械化水平。推动小型农业机械自动化发展可以有效地解决丘陵耕地撂荒问题。本文设计的小型农业机械自动导航控制系统,旨在结合现有的小型化农业机械,为其提供高精度自动导航,实现对市场现有小型化农业机械的自动化升级和改造。

1 系统总体设计(Overall system design)

小型农业机械自动导航控制系统分为硬件设计、软件设计、控制平台3大部分。系统硬件结构如图1所示。

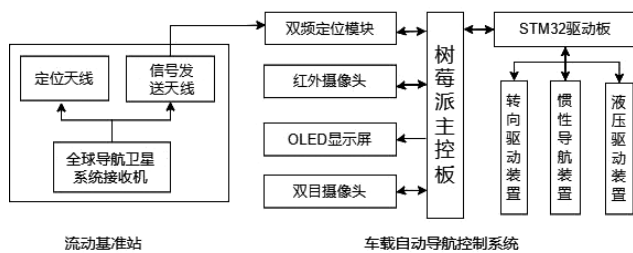


图1 系统硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of the system

系统硬件部分分为流动基准站、车载自动导航控制系统。流动基准站由全球导航卫星系统接收机、定位天线、信号发送天线等组成^[1]。车载自动导航控制系统的硬件部分由树莓派主控板、STM32驱动板、双目摄像头、红外摄像头、双频定位模块、惯性导航装置、转向驱动装置、液压驱动装置、OLED显示屏等设备组成^[2]。系统软件主要解决地块细碎、曲线边界、地块不平整和高度落差等导致的导航不精确问题。系统采用红外热成像图像增强技术,结合自适应视觉导航算法,能有效解决昼夜环境下障碍物与地块边界识别难的问题。同时,采用GNSS(Global Navigation Satellite System)+IMU(Inertial Measurement Unit)的定位方案,利用惯性导航解算算法实时推算运动姿态信息。控制平台则采用便捷的微信小程序进行开发。

2 硬件设计(Hardware design)

2.1 流动基准站

流动基准站由定位天线、全球导航卫星系统接收机、信号发送天线等组成。定位天线用于接收定位卫星发送的定位信号;全球导航卫星系统接收机用于记录卫星位置和信号到达时间等信息,处理并解算农具位置信息;信号发送天线用于发送接收机的记录信息。双频定位模块将采集到的卫星定位信息与流动基准站发送的记录信息相比较,经定位算法处理,计算位置误差,并修正其位置,从而实现高精度的定位^[3]。

2.2 车载自动导航控制系统

车载自动导航控制系统按组成设备功能可分为感知层、数据处理层和设备驱动层。

感知层主要由双目摄像头、红外摄像头、双频定位模块、惯性导航装置组成。双目摄像头可以拓宽视野感知范围,静止时可获取前方物体的距离信息,适合应用在地块细碎的耕地,可以捕捉耕地边界线、测量边界线距离。红外摄像头作为双目摄像头感知补充设备,用于解决夜间、雾天等光线昏暗、能见度低等问题。双频定位模块具备高集成度、低功耗、抗干扰和高灵敏度等特点,用于接收定位卫星发送的信息与流动基准站的记录信息,支持所有民用全球导航卫星系统(GNSS),自身集成解算芯片,能够实现片上实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)定位,为自动导航控制系统提供厘米级高精度的实时定位。惯性导航装置是由三轴陀螺仪、三轴加速度计、三轴磁力计和气压计等组成,可以实现三维运动姿态测量,通过高性能传感器和自身集成的姿态解算器,结合动态卡尔曼滤波融合算法,可获得高精度、高动态的三轴姿态角度。惯性导航装置与双频定位模块的信息相融合,实时推算速度、位置、转动角度等运动参数,为设备驱动层调整机械运动速度、偏转角度等运动姿态。

树莓派主控板负责完成数据处理层任务。树莓派主控板具备体积小、高运算速度、丰富外设接口等优点,自身集成2.4 GHz和5 GHz双频段的无线网卡和蓝牙5.0,同时该主板支持Python、C等编程语言进行开发^[4]。树莓派具备完整的电脑功能,树莓派安装Ubuntu18.04操作系统后,可通过OLED(Organic Light-Emitting Diode)显示屏显示交互界面,可操作键盘、鼠标等设备进行网络连接与命令行输入等操作。

设备驱动层由STM32驱动板、转向驱动装置、液压驱动装置构成。STM32驱动板拥有丰富的外设接口,连接转向驱动装置和液压驱动装置,可以测量设备电压并驱动电机转动。丰富的通信接口可以使其与树莓派、惯性导航装置相互通信。通过移植RT-Thread操作系统使STM32驱动板具备了实时处理多任务、控制多外设的能力。转向驱动装置连接机械的转向轮,STM32驱动板结合转向驱动装置与惯性导航装置的反馈信息,实时调控转向驱动装置的偏转角度。液压驱动装置连接机械供油装置,依据惯性导航装置测算的速度,STM32驱动板可调节液压驱动装置的伸展长度,实现对供油装置的控制。

3 软件设计(Software design)

3.1 红外热成像处理

红外热成像技术是一种波长转换技术,通过对外界场景中各物体辐射能量的探测,通过利用外界场景中各物体辐射强度大小的不同获得图像的背景和纹理细节。这使得设备不再受限于光照强度及光谱范围的约束,突破了人眼的视觉特性。虽然红外热成像设备能够较好地处理红外图像的非均匀性、盲元等问题,但仍存在图像对比度低、分辨率差的问题。

红外热成像图像增强技术是通过输入图像进行分层操作实现的。输入图像经双边滤波器滤波后获得图像的背景层,输入图像减去背景层信息后,获得图像的信息细节,作为细节层图像。对细节层图像进行细节增强处理,对背景层图像进行直方图均衡化处理,提高图像对比度,将处理后的细节层和背景层图像融合为一帧图像,从而达到红外图像增强细节、提高对比度的目的^[5]。红外热成像图像增强技术原理如图2所示。

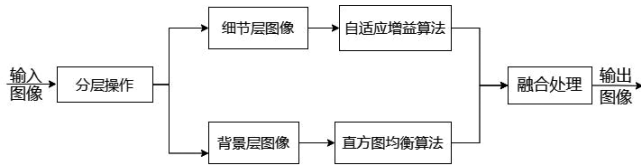


图2 红外热成像图像增强技术原理

Fig. 2 Principle of infrared thermal imaging image enhancement technology

3.1.1 输入图像分层操作

经典低通滤波器只能滤除图像中的高频分量,不能分离出高频分量中的有效信息,会导致高频分量的细节信息丢失,导致红外图像的纹理细节和边缘特征出现模糊。为保留红外图像中的边缘特征和纹理细节,本文采用双边滤波器对红外图像进行分层处理^[5-7]。双边滤波是一种非线性的滤波方法,是结合了图像的空间邻近度和像素值相似度的一种综合滤波方式,同时考虑空间域信息和灰度相似性,以达到保留边缘特征和抑制噪声的效果。

双边滤波器 MATLAB 核心代码:

```
function b=BF_Filter(img,r,sigma_d,sigma_r)
%% 输入参数:img(待滤波图像),r(模板半径)
%% sigma_d(空域矩阵标准差),sigma_r(值域矩阵标准差)
% 判断是否为灰度图像
if(size(img,3)>1)
img=rgb2gray(img);
end
[x,y]=meshgrid(-r:r);
% 空域权重矩阵
size=(2r+1)*(2r+1);
w_spatial=exp(-(x.^2+y.^2)/(2*sigma_d.^2));
[m,n]=size(img);
img=double(img);
% 扩展图像
size=(m+2r)*(n+2r);
f_temp=padarray(img,[r r],'symmetric');
% 滑动窗口并滤波
b=zeros(m,n);
for i=r+1:m+r
for j=r+1:n+r
Temp=f_temp(i-r:i+r,j-r:j+r);
w_value=exp(-(tempimg(i-r,j-r)).^2/(2*sigma_r.^2));
w=w_spatial.*w_value;
s=temp.*w;
b(i-r,j-r)=sum(s(:))/sum(w(:));
end
end
end
```

3.1.2 细节层图像处理

细节层图像含有场景物体的纹理细节和随机噪声信息。普通线性增强处理在增强图像细节信息的同时,也会放大随机噪声,影响图像成像效果。研究表明,人眼视觉系统对复杂的纹理区域中的噪声敏感度相对较弱,对平坦区域的噪声敏感度较高^[8],由此可以通过建立噪声模板的可见性函数,反映图像

不同部位噪声的可见程度^[5]。结合自适应增益算法调整图像中不同区域的增益系数^[9],可实现细节层图像抑制噪声增强细节的目的。

自适应增益算法 MATLAB 核心代码:

```
function agcsig=agc(inputSig,gainFac)
inputPower=sum(abs(inputSig).^2);
% 计算输入信号的平均功率
averagePower=inputPower/length(inputSig);
% 根据增益因子计算目标功率
targetPower=averagePower*gainFac;
% 计算需要应用的增益
inputGain=sqrt(targetPower/inputPower);
% 应用增益到输入信号
agcsignal=inputSig.*inputGain;
end
```

3.1.3 背景层图像处理

由于背景层中含有丰富的场景信息,滤波不充分会使部分细节信息残留。对背景层图像的处理主要是对背景信息采用合理的算法来提高对比度。直方图均衡算法是以图像各灰度级概率的累积分布函数作为变换函数,将原图像映射为一幅灰度级分布较均匀的图像,以增大图像灰度级的动态范围,从而增强图像的对比度。直方图均衡算法可使图像中像素个数多的灰度值进行展宽,对像素个数少的灰度值进行归并,处理后的图像对比度增大、清晰度提高,起到增强图像的效果^[10-12]。

直方图均衡算法 MATLAB 核心代码:

```
% I为需处理图像的灰度图
[R,C]=size(I);
% 统计每个像素值出现的次数
cnt=zeros(1,256);
for i=1:R
for k=1:C
cnt(1,I(i,k)+1)=cnt(1,I(i,k)+1)+1;
end
end
f=zeros(1,256);
f=double(f);
cnt=double(cnt);
% 统计每个像素值出现的概率,得到概率直方图
for g=1:256
f(1,g)=cnt(1,g)/(R*C);
end
% 求累计概率,得到累计直方图
for i=2:256
f(1,i)=f(1,i-1)+f(1,i);
end
% 用f数组实现像素值[0,255]的映射
for i=1:255
f(1,i)=f(1,i)*255;
end
```

3.2 惯性导航解算

3.2.1 定位和姿态解算原理

本系统采用 GNSS+IMU 的定位方案,利用惯性导航装置测量设备运行的加速度、角速率等物体运动变化信息,结合给

定的初始条件,与双频定位模块提供的位置信息相融合,通过惯性导航解算算法实时推算速度、位置、姿态等参数。惯性导航解算是指利用惯性测量单元(IMU)的三轴陀螺仪、三轴加速度计、三轴磁力计和气压计,通过积分运算得到目标物体的位置、速度和姿态信息的过程。系统设计中,结合双频定位模块和IMU进行精确的运动姿态解算,以适应丘陵耕地地理环境。首先对数据进行预处理,将双频定位模块和IMU数据进行时间对齐和同步,确保两者采样率和时间戳一致。其次进行定位解算和姿态解算,利用双频定位模块数据进行定位解算,可以采用MATLAB内置的函数如pos2lla将定位坐标转换为经纬度;使用IMU数据实现姿态解算,解算方法为四元数法,采用euler2quat函数将欧拉角转换为四元数表示姿态。最后融合双频定位和IMU数据,将定位解算的位置信息与姿态解算的姿态信息进行融合,得到最终的姿态解算结果。可以使用四元数法将定位位置信息转换到IMU坐标系下,再根据姿态解算的结果进行补偿。此外,姿态解算还可能受到传感器噪声、漂移等因素的影响,需要进行滤波和校正,设计中采用卡尔曼滤波算法融合两种传感器的数据进行滤波与误差补偿,以提高定位的准确性和稳定性。卡尔曼滤波是一种利用系统动态方程和观测方程估计系统状态的优化方法,通过不断地更新状态估计值,可以有效地抑制传感器数据的噪声和误差,从而提高定位的精度和稳定性^[13-14]。定位和姿态解算流程如图3所示。

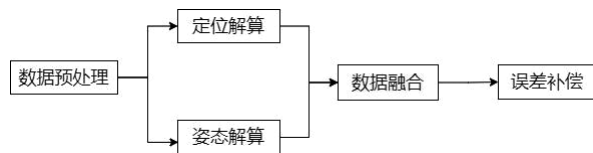


图3 Positioning and posture solution flow chart

3.2.2 姿态解算

由于丘陵山区的地形复杂,机械耕具必须实现小型化,并且具备精确导航、制动反应快速和转向灵敏的特点,因此系统设计对耕具的姿态解算提出了较高的要求。系统利用惯性导航装置内置的加速度计与陀螺仪测量运动物体的加速度、三轴姿态角度等数据。本文的设计采用的加速度计是利用具有压电效应的晶体在受力时会发生晶体形变而产生电压的特性,计算获得产生电压和所施加的力之间的关系,将加速度转化成电压输出。陀螺仪运动时,受到的科里奥利力会把角速率转换成一个感测结构的位移,感测结构的位移会产生电容变化,通过感测结构电容变化测量产生的位移,因为位移大小与所施加的角速率大小成正比,所以可以获得角速度和角加速度量。加速度计、陀螺仪测量的数据通过姿态解算得出物体实时位置、速度、姿态信息。姿态解算流程如图4所示。

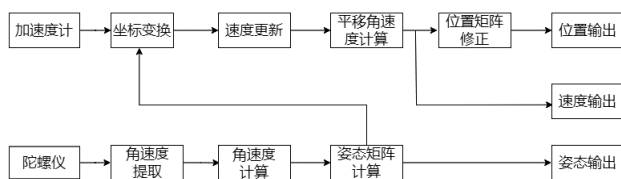


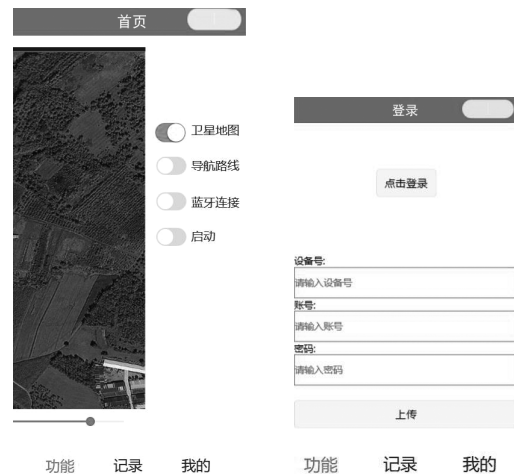
图4 Posture solution flow chart

```

    惯性导航解算算法 MATLAB 核心代码:
    % 初始化卡尔曼滤波器参数
    A=eye(3);% 状态转移矩阵
    C=eye(3);% 测量矩阵
    Q=eye(3);% 系统噪声协方差
    R=eye(3);% 测量噪声协方差
    P=eye(3);% 初始估计误差协方差
    % 初始化状态估计和协方差矩阵
    x_est=zeros(3,1);% 状态估计
    P_est=P;% 估计误差协方差
    % imu_data 为 IMU 采集数据;gps_data 为 GPS 采集数据
    for i=1:length(imu_data)
        % 预测步骤
        x_pred=A * x_est;
        P_pred=A * P_est * A' + Q;
        % 更新步骤
        y=gps_data(i,:)-C * x_pred;
        S=C * P_pred * C'+R;
        K=P_pred * C' / S;
        x_est=x_pred + K * y;
        P_est=(eye(3) - K * C) * P_pred;
        % 输出当前位置估计值
        disp(['当前位置估计:',num2str(x_est')]);
    end
  
```

4 控制平台(Control platform)

系统控制平台采用微信小程序进行开发。微信小程序的特点是方便易用,占用空间较小。丰富的API接口方便接入并调用第三方数据平台,节约了开发周期和成本。微信的广大用户群体也方便了小程序的推广和应用。系统通过API接口接入第三方数据平台,为系统运作提供电子地图、规划自动导航线路等各类信息。微信小程序控制平台通过与车载控制系统的树莓派主控板的蓝牙模块相连,实现两者的通信交流。小程序操作界面如图5所示。



(a) 首页界面 (b) 登录界面

图5 小程序操作界面 Fig.5 The applet operation interface

微信小程序设置了3个功能页面:功能、记录、我的。功能页面设置有卫星地图、导航路线、蓝牙连接、启动4个功能按键,卫星地图能够获取终端设备的定位信息,调取定位位置的卫星地图显示于页面左侧,地图下设有缩放滑动杆,用于放大和缩小地图。导航路线用于在卫星地图上划定耕作地块,并生成地块的耕作路线。蓝牙连接使用终端主控板设备的蓝牙,连接车载控制系统树莓派主控板的蓝牙模块,用于传输耕作路线的坐标信息与设备控制命令。启动按键用于启动设备按照耕作路线自动导航。记录页面可以查询设备使用信息。我的页面用于用户输入设备号、账号、密码等登录信息,账户与设备是一对多的映射关系,方便一个账户同时管理多台设备。

5 市场调研(Market survey)

调查数据显示,我国丘陵山区的耕地面积占总耕地面积的1/3,是我国粮油糖和特色农产品的重要生产基地,涉及农业人口近3亿。因此,提升丘陵山区的机械化率迫在眉睫。2010—2017年,我国农业机械化率从52%增长到66%,平均每年增长2个百分点。2017—2022年,平均每年增长1.6个百分点,平均每年增长率在不断下降。

对国内外购物平台和搜索网站的调查显示,随着科技的发展,全球农业生产已从主要依靠人力、畜力转向主要依靠机械动力,进入机械化为主导的新阶段。小型智能农业机械操作简单、方便,并且作业效率高,因此深受广大农民的喜悦。在农业机械化全面发展的背景下,全球小型智能农业机械产品需求持续增长,市场规模随之攀升。我国高原、丘陵及山地地区受地形限制,机械化水平低,而小型智能农业机械产品主要解决了高原、丘陵、山地地区农业机械化水平低的问题。因此,我国对小型智能农业机械产品的需求也日益增长。

6 结论(Conclusion)

本文设计了一款小型农业机械自动导航控制系统,系统由硬件设计、软件设计、控制平台3个部分组成。系统硬件部分包括流动基准站和车载自动导航控制系统;软件设计着重介绍了红外热成像图像处理技术和惯性导航解算应用于丘陵耕地的精确导航;控制平台采用微信小程序,实现了电子地图、路径导航和蓝牙连接等功能。对该系统的应用需求进行市场调研后发现,随着我国农业机械化的发展,对小型智能农业机械产品的需求会持续增长。本文以较低的成本设计了一款小型农业机械自动导航控制系统,与现有的小型农业机械产品融合,满足了丘陵耕地的需求。

参考文献(References)

[1] 刘慧,刘宾. 智慧农机的自动导航辅助驾驶系统设计[J].

单片机与嵌入式系统应用,2023,23(1):76-79.

[2] 袁勋,汤兵兵. 基于ARM的农机无人驾驶系统硬件设计[J]. 南方农机,2018,49(19):76.

[3] 朱清山,高广智,牛文祥. 农机自动导航驾驶系统及其应用[J]. 现代化农业,2016(5):65-67.

[4] 王鹏,罗全珍. 基于无人车自动构图导航系统的设计与实现[J]. 物联网技术,2020,10(5):77-79.

[5] 苏庆旦. 红外热成像系统实现及其图像增强技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2015.

[6] 陆善婷,杨敏红. 双边滤波器在X射线图像平滑滤波中的应用[J]. 机电一体化,2013,19(1):77-80.

[7] 刘尚旺,郜刘阳,王博. 联合双边滤波器和小波阈值收缩去噪算法研究[J]. 国土资源遥感,2018,30(2):114-124.

[8] SUN L M, WANG J T, LI S S. A new infrared image enhancement algorithm [C]//IEEE. Proceedings of the IEEE: IEEE. 2017 29th Chinese Control And Decision Conference, Piscataway: IEEE, 2017:422-425.

[9] 金永奇,李太君,邓家先,等. 模糊集与非线性增益相结合的自适应图像增强算法[J]. 计算机应用研究,2016,33(1):311-315.

[10] 完颜丹丹. 红外图像对比度增强算法研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2012.

[11] 邓超迪,李川,李英娜. 基于直方图均衡化和双边滤波的变压器红外图像增强[J]. 电力科学与工程,2020,36(11):38-44.

[12] 吕侃徽,张大兴. 基于自适应直方图均衡化耦合拉普拉斯变换的红外图像增强算法[J]. 光学技术,2021,47(6):747-753.

[13] 徐辛超,姜姗姗. 鲁棒无迹卡尔曼滤波组合导航定位方法[J]. 测绘科学,2023,48(1):16-22.

[14] 唐伏乾. 车载组合导航系统卡尔曼滤波模型误差研究[D]. 长春:吉林大学,2022.

作者简介:

吴浩基(2000-),男,本科生。研究领域:通信技术,嵌入式系统开发。

朱又敏(1966-),男,硕士,工程师。研究领域:无线通信,通信系统设计。本文通信作者。

冯智锐(2002-),男,本科生。研究领域:通信技术,软件设计。