

株间锄草机器人刀苗信息优化系统设计与试验*

陈子文 张春龙 李伟 李涛 李南 张宾

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为提高株间锄草机器人机器视觉刀苗信息获取精度, 提出采用里程信息和视觉信息融合的刀苗距优化方法, 设计了基于 C8051F020 单片机的刀苗距优化系统, 分析了优化系统构成, 为提高里程精度和系统抗振动干扰能力, 设计了精准里程采集逻辑电路对测速脉冲进行倍频、辨向及逻辑处理。根据里程信息与视觉信息相对误差的分布规律提出了双阈值权重判断算法对刀苗距进行优化, 并给出了软件实现流程。刀苗距优化试验发现该系统可有效过滤机器视觉出现的错误和不稳定信息, 静态测试刀苗距误差达 6.7 mm, 误差减小 10.3%。模拟锄草试验表明, 在动态下该系统可降低锄刀多转可能性, 提高系统的稳定性。

关键词: 株间锄草机器人 刀苗信息 机器视觉 优化 传感器融合

中图分类号: TP242.6; S224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0062-06

Design and Experiment on Hoe-crop-positioning Optimization System for Intra-row Weeding Robot

Chen Ziwen Zhang Chunlong Li Wei Li Tao Li Nan Zhang Bin

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The accurate location information of crop and grass provides the basis for intelligent intra-row weeding robot and influences the effects of weeding directly. This work describes the development of hoe-crop-positioning optimization system based on the fusion of machine vision and accurate odometry sensing techniques for intra-row weeding robot. The hoe-crop-positioning optimization system consists of two subsystems: machine vision system and information optimization system. The machine vision system is able to identify a single crop among weeds based on color camera. The information optimization system is able to calculate the accurate distance from crop seedling to weeding actuator. The optimization principle was analyzed. C8051F020 microcomputer was used as the core processor of hoe-crop-positioning system. In order to improve the accuracy of velocity measurement and anti-vibration interference, an accurate odometry collecting logical circuit was designed for frequency multiplication, phase demodulation and the other logic processing of the speed pulses. A double threshold optimization algorithm was used to judge the weights of real-time odometry data and forward distance from vision system, and to predict the discrete forward displacement of the machine in time. System assessment experiment was carried out based on a mobile hydraulic power pack platform. The experiment results show that the hoe-crop-positioning optimization system can effectively filter the error and instability information of machine vision. Under the static experiment the crop-positioning error was 6.7 mm, 10.3% less than that in earlier time. The weeding simulation experiment showed that the system can reduce the possibility of redundant rotation of hoe and improve the stability of weeding system.

Key words: Intra-row weeding robot Hoe-crop-positioning information Machine vision Optimization Sensor fusion

收稿日期: 2015-06-11 修回日期: 2015-07-09
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102406)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013X1004)和北京高等学校青年英才计划资助项目(31056101)
作者简介: 陈子文, 博士生, 主要从事农业机器人及液压控制研究, E-mail: chenziwen_0309@163.com
通讯作者: 张春龙, 讲师, 博士, 主要从事计算机视觉技术及农业机器人研究, E-mail: zcl1515@cau.edu.cn

引言

苗草信息获取是智能株间机械锄草的重点和难点,其包括对单个作物或杂草进行识别和定位以及对作物行的识别和定位技术。苗草信息获取可通过机器视觉、地理种子地图及近距离传感器实现^[1],前2种方法应用较为广泛且精度较高。相比GPS,机器视觉具有应用简单、成本低等特点^[2],虽然机器视觉技术已经相对成熟,但在农业生产中,自然光线和周围环境的多变性会影响视觉系统正常工作^[3]。如作物苗形状、阴影、作物丢失以及杂草密度等都会影响机器视觉对作物识别定位的精度,特别是在作物丢失或杂草侵扰严重的情况下还会输出错误的定位信息,降低机器人的株间锄草效果,增加伤苗率。此外由于图像处理速度的限制,机器视觉输出位置信息的频率还达不到控制器的要求^[4]。为提高系统定位精度、稳定性和可靠性,还需要将视觉信息和其他传感器信息进行融合^[4]。

英国西尔索研究所 Hague 等^[5]在机器人沿作物行导航策略中通过扩展卡尔曼滤波器将里程信息与视觉信息相融合,预测机器人的运动位置,试验表明,在1.8 km/h 速度下,机器距作物行的横向偏差小于15 mm。卡耐基梅隆大学机器人研究所 Pilarski 等^[6]为自动收获机开发了一种推算定位(Demeter)系统,通过差分GPS位置信息和车轮编码器脉冲信息相融合,为收获机提供较为准确的收获路径。日本北海道大学 Masaki 等^[7]研制了一种甜菜自动锄草机,采用CCD彩色相机对作物进行识别,并配合里程值信息对单个作物进行精确定位,控制液压缸推动锄草刀进行开合运动,室内试验表明控制锄刀开闭精度小于40 mm。西班牙塞维利亚大学 Pérez-Ruiz 等^[8]研制了基于GPS株间锄草自动控制系统,通过将RTK-GPS信息与地轮上光电编码器的脉冲信号相融合,提高对作物定位更新频率,并控制锄刀避苗锄草,由于地轮变形或与土壤产生相对运动等原因,定位误差在0.3~1.3 cm之间变化。国内研究主要将里程值的融合技术用于农用车辆的路径导航控制。周俊等^[9]基于卡尔曼滤波思想对机器视觉、里程传感器和导向轮转角传感器进行融合,给出预测跟踪控制方法对农用拖拉机进行导航。并提出了GPS组合导航控制方法,基于卡尔曼滤波器将GPS定位信息和里程计信息相融合进行导航控制,试验表明直线和曲线目标路径的最大跟踪误差分别为0.15 mm和0.3 mm^[10]。罗锡文等^[11]通过比对差分全球定位系统(DGPS)、航位推断(DR)与已知航线的定位误差,来确定其可信度,用可信度作为加

权值生成新的定位数据点,试验表明,该方法在一定程度上提高了定位数据精度。

本文引入精准里程技术对机器视觉采集的刀苗信息进行优化,采用精准里程采集逻辑电路对里程轮脉冲进行采集并实时计算离散里程,采用双阈值权重算法对里程和视觉位移的可信度进行判断,通过可信度计算优化后的刀苗距。

1 工作原理

智能株间锄草机器人主要通过前置摄像头识别杂草和作物信息,实时对作物进行定位,获取株间锄刀与作物的距离,即刀苗距 D ,将刀苗距作为控制输入量控制锄刀遇到作物时进行躲避,没有作物时进行株间锄草,从而实现智能化株间锄草。

实际试验过程中,机器视觉获取的刀苗距信息易受周围环境光线、盲区等因素的影响:①由于机械振动,刀苗距会在真实值上下波动。②由于光线变化或阴影遮挡等原因,作物无法被识别。③由于机器视觉存在盲区,在盲区范围内作物信息将丢失。图1示出2种盲区,视觉盲区 d_1 是相机视场下边缘到锄刀的位置,盲区大小等于机器视觉可检测到最小的刀苗距,通过调整相机的倾斜角度可以改变视觉盲区的大小,如图1a。遮挡盲区 d_2 是由于机械结构或其他因素造成作物遮挡,使作物距锄刀还有一定距离时便无法检测到,如图1b。作物位于盲区内,指示作用丢失,刀苗位置处于未知状态。

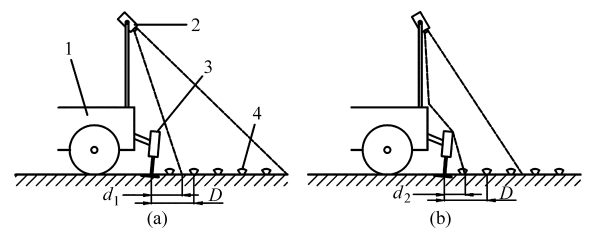


图1 株间锄草机盲区示意图

Fig.1 Diagram of fade zone about intra-row weeding machine

(a) 视觉盲区 (b) 遮挡盲区

1. 搭载平台 2. 相机 3. 株间锄草单元 4. 作物

图2为里程对机器视觉获取的刀苗距优化原理图。由于机器相对作物处于运动状态,图中虚线部分表示上一时刻的位置,实线表示当前位置。其中上一时刻位置图像采集的刀苗距为 $D(i-1)$,当前刀苗距为 $D(i)$,在此时间段内,通过视觉传感器检测到的机器位移为 ΔL_v ,则有 $\Delta L_v = D(i-1) - D(i)$,在该段时间内通过里程轮编码器检测到的机器位移为 ΔL_o ,即为里程。假设传感器均检测准确,则有理想状态: $\Delta L_v = \Delta L_o$ 。实际情况下 ΔL_o 与 ΔL_v 会有一定的误差,通过刀苗优化算法,将 ΔL_o 和 ΔL_v

进行可信度判断,得较为准确的前进距离 ΔL_T ,从而得到当前优化刀苗距 $D_o(i)$,则有 $D_o(i) = D_o(i-1) - \Delta L_T$,其中 $D_o(i-1)$ 为上一时刻的优化刀苗距。

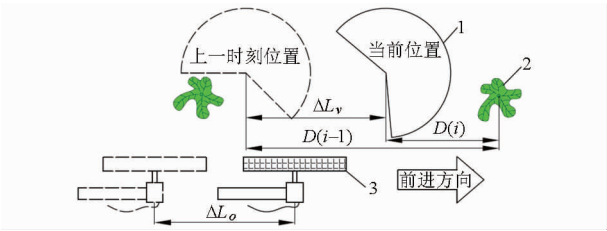


图2 刀苗距优化原理图

Fig. 2 Basic diagram of crop-positioning optimization
1. 株间锄草刀 2. 作物 3. 里程轮

2 刀苗距优化系统

2.1 硬件系统结构

刀苗距优化系统由相机、上位机、2 个通信模块、里程轮编码器和核心处理器组成。图 3 为刀苗距优化株间锄草系统硬件及接口示意图。选用 Silicon Laboratories 公司研发的高性能 C8051F020 单片机作为刀苗优化系统的核心处理器,该款单片机不区分时钟周期和机器周期,执行指令期间可预处理下一条指令,效率较高^[12]。选用度申公司的 USB 彩色工业相机 CFM036 进行图像采集,该相机具有 36 万像素,自带 32 MB 帧存,图像传输稳定,镜头选用浩蓝 AZURE-0420MM 型定焦距手动光圈镜头。上位机选用工业平板计算机,基于 VC++ 在度申公司提供的 DVP_SDK 开发包上进行二次开发,实现图像采集、处理等功能。通信模块为 TTL 转 RS232,通过该模块将上位机采集的刀苗距实时发送给处理器。机器运动过程中,里程编码器产生脉冲信号输入到处理器管脚。处理器中分为测速单元、位移检测单元和刀苗距优化单元,测速单元和位移检测单元通过采集脉冲信号分别计算得到当前车速和里程,将里程和刀苗距输入到刀苗距优化单元获得优化刀苗距,最后将车速和优化刀苗距通过通信模块发送给锄刀运动控制系统,控制锄刀避苗

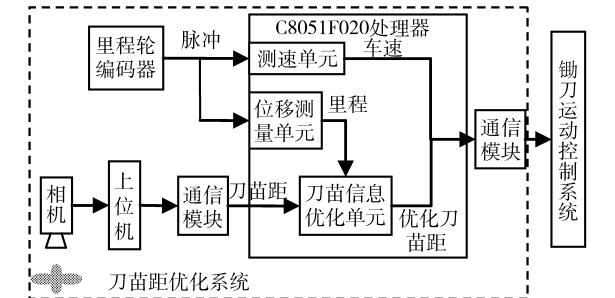


图3 刀苗距优化系统硬件及接口示意图

Fig. 3 Hardware and interface of hoe-crop-positioning optimization system

运动。

2.2 精准里程采集

采用装有增量编码器的里程轮装置进行测速和测距,通过脉冲数与距离的对应关系得到机器相应的前进位移,在已知时间内进行位移检测,可获得当前机器的运动速度。里程轮安装在平行四边形仿形机构上,确保里程轮可紧贴地面工作。

设机器工作速度为 v ,上位机采集并处理一幅图像之间所需时间为 t ,编码器的分辨率为 m ,测速轮的直径为 d ,则采集到的脉冲数 x 为

$$x = \frac{v t m}{\pi d}$$

试验表明图像处理平均耗时 $t = 40 \text{ ms}$,选用 $d = 250 \text{ mm}$ 的测速轮,编码器分辨率 $m = 1\,000 \text{ P/r}$ 、相位差为 90° 的两相脉冲输出,前进速度在 0.7 km/h 以下时, t 时间内采集到的测速脉冲小于 10 个。故行驶速度低时,高分辨率编码器在 t 时间产生的脉冲仍过少,测距和测速的准确性低,且由于机械振动使编码器产生正反转的抖动,易输出错误脉冲信号。

为此设计了精准里程采集逻辑电路,如图 4 所示,该电路可实现对测速编码器脉冲整形、倍频和辨向功能。采用 7413 施密特触发器对编码器原始两相脉冲信号进行脉冲整形,将 2 路脉冲通过 RC 延时电路得到 2 路延时脉冲,延时时间由 $t \approx 0.7RC$ 估算(R, C, t 的单位分别为 $\Omega, \text{F}, \text{s}$),当 $R = 120 \Omega, C = 10^4 \text{ pF}$ 时,延时时间 $t \approx 0.84 \mu\text{s}$,AB 相输入支持的最大频率为 100 kHz 。4 路脉冲信号输入逻辑异或滤波器,得到 2 倍频信号,再通过 7474 双上升沿 D 触发器实现对测速轮的辨向。将方向信号与 2 倍频脉冲信号共同输入到逻辑与滤波器,得到测速轮单向旋转脉冲信号。2 倍频脉冲可增加测速系统的准确性,单向脉冲输出可减少由于振动等原因对编码器测距的影响。

脉冲采集后,通过脉冲数计算出里程值

$$\Delta L_o = \frac{n \pi d}{k m}$$

式中 ΔL_o ——里程值
 n ——采集脉冲数 k ——倍频系数

2.3 刀苗距优化算法

本文采用双阈值优化算法对里程信息与机器视觉信息进行可信度判断,并根据相应权重计算得到较为真实的当前刀苗距 $D_o(i)$,优化离散方程为

$$D_o(i) = D_o(i-1) - (A \Delta L_o + B \Delta L_v) \quad (1)$$

其中 A, B 分别为 ΔL_o 和 ΔL_v 的权重,且 $A + B = 1$ 。 A 和 B 的取值根据 2 种传感器检测到的离散位移误差 e_r 决定。

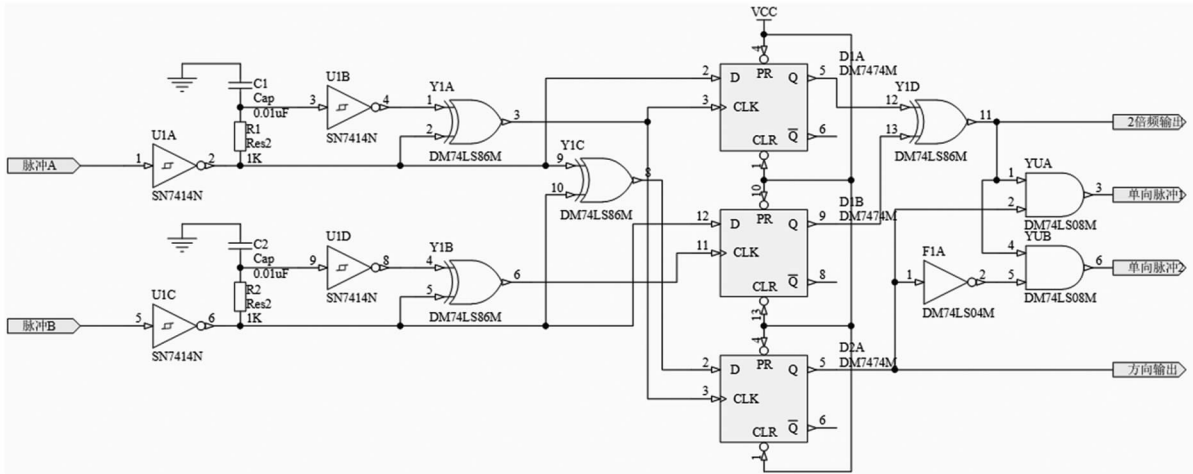


图4 精准里程采集逻辑电路图

Fig.4 Logical circuit for collecting accurate odometry

$$e_r = |\Delta L_o - \Delta L_v| \tag{2}$$

$$\begin{cases} A = 1, B = 0 & (e_r \in [a, \infty)) \\ A = 0.5, B = 0.5 & (e_r \in (b, a)) \\ A = 0, B = 1 & (e_r \in [0, b]) \end{cases} \tag{3}$$

其中, a 、 b 为阈值, 通过判断 e_r 的取值范围, 确定 A 和 B 权重值的大小。

图5 为对一行作物计算到的离散位移误差数据, 图5a 为采集次数与 e_r 的关系图, 里程在一段时间内与测得的位移基本一致, 但当一棵作物从机器视觉视野中消失时, 发送的刀苗距将变为下棵作物与锄刀的距离, 视觉检测到的位移会发生一个突变, 图中尖点位置即为突变位置。图5b 为 e_r 在不同取值范围内所占的比例, 可见 e_r 在 $[0, 10)$ 范围的比例最大, e_r 较小, 此时可判断视觉检测较为准确; $[10, 40)$ 范围内, e_r 较大, 可综合考虑 2 种传感器的信息; $[40, \infty)$ 范围内, 可判断由于作物突然消失或出现等情况, 视觉信息产生突变, 此时判断视觉信息错

误, 可采用里程值计算当前刀苗距。具体计算公式参照式(1) ~ (3), 通过试验数据分析给出阈值, $a = 10, b = 40$ 。

2.4 软件实现

刀苗优化程序主要分为主程序和 2 个中断程序: 一个为串口多字节数据接收中断程序, 由于上位机发送数据较为稳定, 为提高多字节数据接收的效率, 采用中断与查询接收嵌套的方式进行多字节数据接收。另一个为定时器中断, 用于速度计算, 由于机器视觉处理每幅图像的时间不定, 试验验证视觉最小的处理时间为 40 ms, 为不干扰测速的准确性, 在每次图像处理过程中取前 30 ms 进行速度脉冲的采集和计算。图6 为主程序的流程图, 为保证机器视觉的位移检测和里程计位置检测的同步性, 均采用一幅图像的处理时间作为基准时间。

3 测试试验

3.1 试验材料

将刀苗距优化系统搭建在轮式液压泵站平台上, 该平台支撑在 4 个万向轮上, 可通过人工沿作物行推动模拟锄草工作时机器的前进, 同时该平台可提供 40 L/min 的液压流量输出, 可同时对 4 路液压马达转速进行控制, 并配有流量和压力调节系统, 可进行模拟锄草试验。平台如图7 所示, 由锄刀单元、里程轮装置、液压泵站、上位机、相机及刀苗距优化与锄刀运动控制系统组成。

3.2 刀苗距优化算法验证试验

选用模拟作物, 按 300 ~ 600 mm 不等株距沿直线摆放 15 棵, 推动液压泵站沿作物行前进, 并采集视觉刀苗距和优化后的刀苗距, 绘制刀苗距变化曲线, 图8 为刀苗距变化曲线局部图。刀苗距随机器前进而减小, 当作物在视场中消失后, 开始发送下一

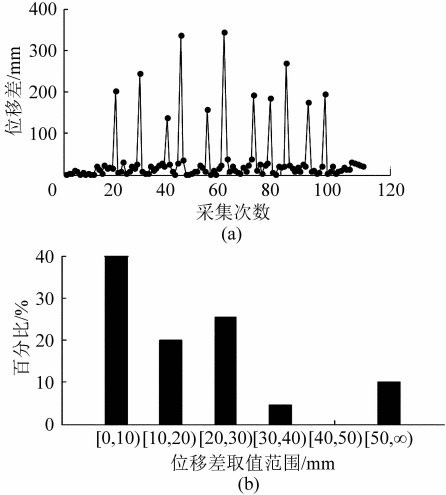


图5 位移误差 e_r 分析图

Fig.5 Analysis chart of displacement error e_r

(a) 离散位移误差 (b) 位移误差取值范围所占比例

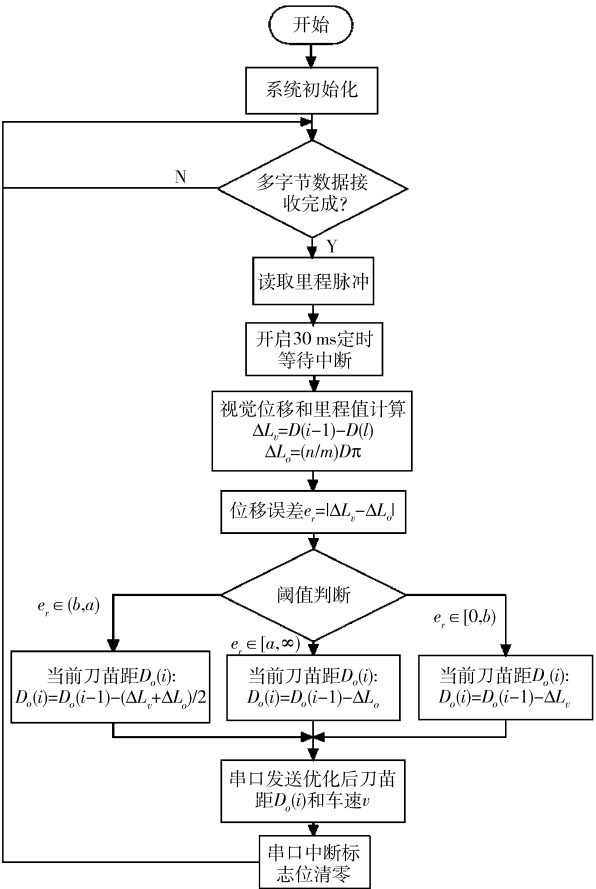


图 6 控制流程图
Fig. 6 Control program flowchart

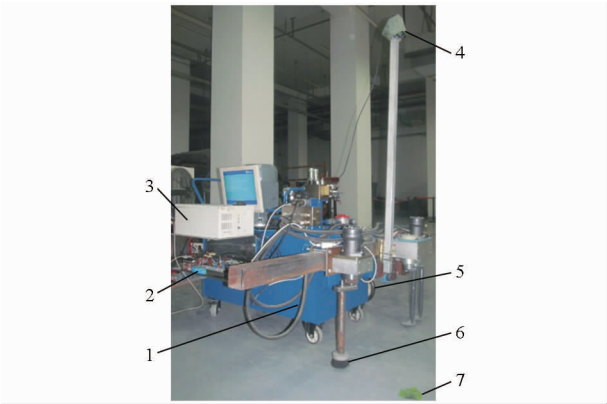


图 7 刀苗距优化实验平台
Fig. 7 Experimental platform of hoe-crop-positioning optimization
1. 液压泵站 2. 刀苗距优化与锄刀控制系统 3. 计算机 4. 相机 5. 里程轮装置 6. 锄刀单元 7. 模拟作物

棵作物到锄刀的距离,因此刀苗距变化曲线为逐渐减小,突然增大到某值,然后继续逐渐减小,依次反复进行,由于上位机限制发送最大的刀苗距为 $255 \times 2 = 510 \text{ mm}$ (为提高通信效率,采用一个字节乘 2 的值表示刀苗距的范围),当刀苗距大于 510 mm ,上位机均会按照刀苗距为 510 mm 发送,如图 8a 前段部分。可见刀苗距变化趋势基本与视觉

刀苗距吻合,图 8a 中可看出视觉刀苗距有 3 个错误点,优化后的刀苗距均将其纠正。图 8b 中视觉刀苗距跳动较为严重,并不平滑,这可能由于机械振动造成机器视觉识别出现跳动,优化后的刀苗距相对平滑。对采集到每棵作物的最小刀苗距进行统计,优化前发送的平均最小刀苗距为 47.2 mm ,优化后为 12.3 mm ,刀苗优化系统减小了视觉系统盲区。通过实际测量锄刀到最近一棵作物苗中心的距离 L 作为衡量标准,沿作物行推动试验平台到随机位置后停止,并同时采集上位机发送的刀苗距 D 和优化后的刀苗距 D_o ,以测量值作为衡量标准,得到视觉刀苗距误差 e_D 和优化刀苗距误差 e_{D_o} 。试验结果见表 1。结果显示视觉刀苗距的平均误差为 8.7 mm ,经优化后刀苗距误差减小到 6.8 mm ,误差减小 10.3% 。

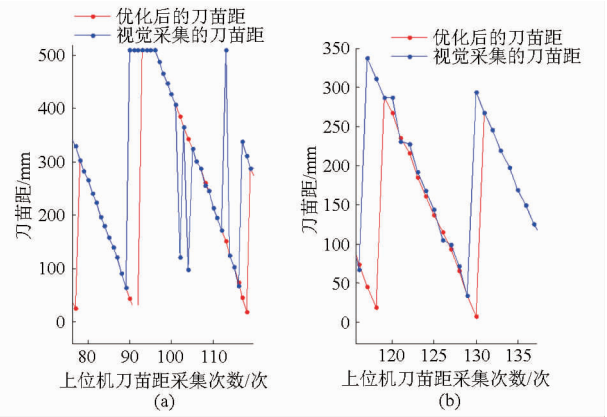


图 8 刀苗距变化曲线局部图
Fig. 8 Enlarged view of hoe-crop-positioning optimization

表 1 刀苗距误差统计					
Tab.1 Range error from crop seeding to weeding actuator					
	mm				
次序	L	D	D_o	e_D	e_{D_o}
1	264	275	271	11	7
2	127	141	133	14	6
3	202	197	195	5	8
4	248	259	261	11	13
5	270	165	270	5	0
6	85	93	90	8	5
7	140	156	152	16	12
8	235	234	234	1	1
9	87	85	83	3	5
10	125	138	136	13	11
平均				8.7	6.8

3.3 锄刀旋转试验

通过对比使用和不使用刀苗距优化系统所产生的锄草避苗效果,将漏苗数、多转数和伤苗数作为系统衡量指标。漏苗数是指株间锄刀在锄草过程中没

有避让的作物数,多转数是指株间锄刀多避让的作物数,漏苗和多转均可能引起作物伤害。通过对一行模拟作物进行对比试验,试验结果见表2。其中编号1、3没有进行刀苗距优化的数据,2、4为进行刀苗距优化的数据。可见在速度提高时,视觉系统的错误信息会导致多转数增多,由于刀苗距优化系统是以视觉刀苗距为基础,当视觉系统未识别出作物时,刀苗优化系统无法进行弥补,因此无法解决漏苗的问题。当视觉信息出现突然的错误或不稳定时,刀苗优化系统可以有效解决,试验反映在多转数上,总体来看,刀苗优化系统减小了伤苗数,一定程度

度上提高了系统的稳定性。

4 结论

(1) 提出采用精准里程信息与机器视觉信息相融合的方法对株间锄草进行刀苗距优化,分析并阐述了优化原理,为系统搭建奠定基础。

(2) 基于 C8051F020 处理器设计了刀苗距优化系统,为提高里程信息的准确性,设计了精准里程采集逻辑电路,实现对里程脉冲的整形、倍频、辨向及逻辑处理,提高了里程信息采集精度及抗振动干扰能力。

(3) 根据位移误差分布规律提出了双阈值刀苗距优化算法,并给出软件流程。刀苗距优化试验表明,优化算法可有效纠正视觉产生的错误或不稳定信息,并减小盲区,优化后刀苗距误差为 6.8 mm,相比未使用刀苗优化系统,误差减小了 10.3%,模拟锄草试验表明刀苗优化系统有效解决了锄刀多转问题,改善了系统的稳定性。

表 2 锄草模拟试验结果

Tab.2 Results of weeding simulation experiment

苗数	车速/(km·h ⁻¹)	编号	漏苗数	多转数	伤苗数
25	1.0	1	0	3	3
		2	0	0	0
	1.5	3	1	5	3
		4	1	1	1

参 考 文 献

1 陈子文,张春龙,李南,等. 智能高效株间锄草机器人研究进展与分析[J]. 农业工程学报, 2015,31(5):1-8.
Chen Ziwen, Zhang Chunlong, Li Nan, et al. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 1-8. (in Chinese)

2 Weider R, Bleeker P, Achten V, et al. Innovation in mechanical weed control in corp rows[J]. Weed Research, 2008, 48(3): 215-224.

3 Christine Connolly. Vision guidance system facilitates high-speed inter-row weeding[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2003, 30(5): 410-413.

4 Tillet N D, Hague T, Marchant J A. A robotic system for plant-scale husbandry[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 69(2): 169-178.

5 Hague T, Tillet N D. Navigation and control of an autonomous horticultural robot[J]. Mechatronics, 1996, 6(2): 165-180.

6 Pilarski T, Happold M, Pangels H, et al. The demeter system for automated harvesting[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1): 9-20.

7 Masaki Takashi, Michael Happold, Hiroshi Okamoto, et al. Development of automatic weeding thinner for sugar beet[C]//2003 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 033076, 2003.

8 Pérez-Ruiz M, Slaughter D C, Gliever C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 41-49.

9 周俊,刘成良,姬长英. 农业机器人视觉导航的预测跟踪控制方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(6):106-110.
Zhou Jun, Liu Chengliang, Ji Changying. Predictive tracking and control method for vision-guided navigation of agricultural robot[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 106-110. (in Chinese)

10 周俊,张鹏,刘成良. 基于时间序列分析的卡尔曼滤波组合导航算法[J]. 农业工程学报,2010,26(12):254-258.
Zhou Jun, Zhang Peng, Liu Chengliang. Kalman filtering for integrated navigation based on time series analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 254-258. (in Chinese)

11 罗锡文,赵祚喜,周志艳,等. 基于地图匹配的定位数据模糊矫正算法研究[C]//中国农业工程学会2005年学术年会论文集,2005:87-91.

12 鲍可进. C8051F 单片机原理及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2006.

13 张春龙,黄小龙,刘卫东,等. 苗间锄草机器人信息获取方法的研究[J]. 农业工程学报,2012,28(9):142-146.
Zhang Chunlong, Huang Xiaolong, Liu Weidong, et al. Information acquisition method for mechanical intra-row weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 142-146. (in Chinese)

14 张春龙,黄小龙,耿长兴,等. 智能锄草机器人系统设计与仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(7):196-199,185.
Zhang Chunlong, Huang Xiaolong, Geng Changxing, et al. Design and simulation of intelligent weeding robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):196-199,185. (in Chinese)

15 黄小龙,刘卫东,张春龙,等. 苗间锄草机器人锄草刀优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(6):42-46.
Huang Xiaolong, Liu Weidong, Zhang Chunlong, et al. Optimal design of rotating disc for intra-row weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 42-46. (in Chinese)

16 赵祚喜,罗锡文,李庆,等. 基于 MEMS 惯性传感器融合的水田激光平地机水平控制系统[J]. 农业工程学报,2008, 24(6):119-124.
Zhao Zuoxi, Luo Xiwen, Li Qing, et al. Leveling control system of laser-controlled land leveler for field based on MEMS inertial sensor fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 119-124. (in Chinese)

17 马锒宏,李南,王汉斌,等. 温室株间电驱锄草机控制系统设计与实验[J]. 农业机械学报,2015,46(1):89-93.
Ma Zenghong, Li Nan, Wang Hanbin, et al. Control system for electric drive intra-row weeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 89-93. (in Chinese)