

株间除草装置横向偏移量识别与作物行跟踪控制

胡炼^{1,2}, 罗锡文^{1,2*}, 张智刚^{1,2}, 陈雄飞^{1,2}, 林潮兴^{1,2}

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;
2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 株间机械除草技术与装置能有效摆脱田间除草的繁重体力劳动并消除化学除草方法所带来的危害, 株间机械除草装置的牵引拖拉机在跟踪作物行时总会产生航向偏差, 导致除草装置出现横向偏移, 甚至无法进入除草的株间区域, 同时还会增加伤苗率。为增大株间机械除草的作用区域和降低伤苗率, 该文提出了通过作物行信息识别出株间机械除草装置与作物行横向偏移量的方法, 并设计了株间机械除草作物行跟踪机构和控制器, 实现了株间机械除草跟随作物行。采用正弦波和三角波 2 种标准信号作为横向偏移补偿量信号, 对作物行跟踪控制器的性能进行了测试, 试验结果表明: 作物行跟踪控制器能较好地控制除草装置跟随横向偏移补偿信号, 前进速度为 0.5 m/s 时正弦波信号跟踪最大误差 10 mm, 平均误差 0.8 mm, 三角波信号跟踪最大误差 11 mm, 平均误差 1.2 mm。除草试验表明, 作物行跟踪控制系统能较好地控制株间除草装置跟踪作物行, 在 0.5 m/s 前进速度下跟踪最大误差为 20.8 mm, 平均误差 2.5 mm; 作物行跟踪控制明显减少了除草爪齿未进入株间区域的比例, 在 300 mm 株距下, 可保证 93.3% 的株间区域有除草爪齿进行除草作业, 在 200 mm 株距下为 85.9%; 作物行跟踪控制降低了除草爪齿对作物的损伤, 伤苗率从 20% 以上降到了 12% 以内, 提高了株间机械除草的作业效果。

关键词: 农业机械, 除草, 识别, 跟踪, 横向偏移, 作物行

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.002

中图分类号: S233.3; TP29; S24; S244.1⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0008-07

胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 株间除草装置横向偏移量识别与作物行跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 8-14.

Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 8-14. (in Chinese with English abstract)

0 引言

为了摆脱田间除草的繁重体力劳动和克服化学除草方法所带来的危害, 机械化和智能化机械除草已成为植保发展的重要方向之一。国内外从 20 世纪 50 年代就开始对机械除草技术进行研究, 常用的除草机械有弹性齿除草耙和铧耙^[1]、除草锄^[2]、旋转锄^[3]、裂根锄^[4]、动力旋转锄^[5]、刷状除草机械^[6]、水平圆盘除草装置^[7]和水稻田除草机械^[8-9]。以上除草机械只能实现行间区域杂草控制, 株间除草目前仍靠人工作业, 为了解决作物株间杂草的精确防除问题, 研究人员开展了智能化株间除草技术研究。

国外主要有哈尔姆斯塔德大学开发的旋转轮式株间杂草控制系统^[10], Tillet^[11]研制的缺口圆盘除草系统, 奥斯纳布吕克大学与 Amazone Werke 联合开发的摆线锄机械除草控制系统^[12]。国内的研究近年才起步, 主要开展的研究有陈勇^[13]和郭伟斌等^[14]进行的机器人除草研究, 张朋举等^[15]设计的八爪式苗间除草装置, 张春龙等^[16]设计的三指手爪锄草机械手, 胡炼等^[17-18]设计的爪齿余摆动除草机械除草装置。目前国内的智能化株间除草技术研究主要集中在除草机器人和除草装置, 大多数处在实验室研究阶段。株间除草机械在作业时除草装置与作物行的相对距离对提高机械除草效果、降低伤苗率以及提高作业速度至关重要, 若偏离作物行太远, 除草装置将无法进入株间区域, 株间区域杂草得不到控制; 若太靠近作物行将造成伤苗率增加。造成除草装置偏离的主要原因是拖拉机的偏向, 无论是人工驾驶还是自动驾驶, 拖拉机在跟踪作物行时总会产生航向偏差。航向偏差将导致安装在拖拉机后部的除草装置的中心与作物行中心线的距离发生变化(称之为除草装置横向偏移量), 出现除草装

收稿日期: 2013-04-29 修订日期: 2013-06-04

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAD20B06); 国家自然科学基金项目(31171864; 61175081); 948 项目“精准农业智能关键技术引进与创新子课题”(2011-G32)

作者简介: 胡炼(1984-), 男, 湖南长沙人, 博士, 主要从事智能化检测与控制, 精细农业方面研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: lianhu@scau.edu.cn

*通信作者: 罗锡文(1945-), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化工程、精细农业方面研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: xwluo@scau.edu.cn

置横向偏移，甚至可能出现株间除草装置整体偏离作物行。由于株间除草装置进入株间区域的范围和避让作物的运动行程有限，除草爪齿可能无法进入株间区域或除草装置离作物行太近无法避让作物，导致株间区域杂草得不到控制或损伤作物。因此，须实时纠正除草装置与作物的距离，即除草装置跟踪作物行控制，以保证除草装置稳定跟随作物行并有效除去株间区域杂草且降低伤苗率。为减少或消除横向偏移的影响，Tillett 和 Hague^[19]采用机器视觉识别作物行，得到行间除草器的横向偏移量，通过控制机构实时消除横向偏移，降低了伤苗率，提高了作业速度，但机器视觉受环境光线影响较大。奥斯纳布吕克大学与 Amazone Werke 联合开发的摆线锄株间除草系统采用 RTK GPS 实时测量除草装置的绝对位置，并根据播种时作物行的位置获得横向偏移量，以此进行补偿控制^[20-21]，采用 GPS 精度虽较高，但成本也较高，还需要作物行的坐标数据。

国内还未见机械除草装置跟踪作物行控制的相关研究报道，本文拟采用机器视觉技术研究除草装置横向偏移量的估算和作物行的跟踪控制方法，并通过相关试验进行验证。

1 材料与方 法

1.1 株间机械除草系统

如图 1 所示，试验平台通过三点悬挂机构与拖拉机连接，由拖拉机牵引前进。试验平台由 4 个轮子支撑，左右两侧轮相距 95 cm，前后轮距为 55 cm，试验平台离地高度可由 4 个轮进行调节，可调范围为 25 cm，摄像机与株间除草装置中心的距离为 50 cm。试验平台的 2 个 12 V 蓄电池为系统提供 12 和 24 V 直流电源。

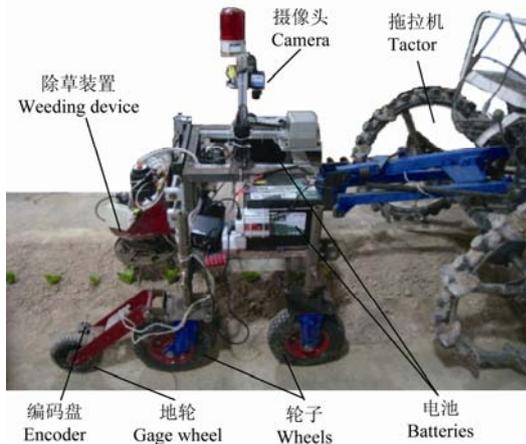


图 1 株间机械除草装置试验平台
Fig.1 Platform for intra-row mechanical weeding device

试验平台包括图像处理子系统、避苗控制子系

统、速度测量子系统和作物行跟踪控制子系统，见图 2。图像处理子系统硬件主要由光源、摄像头和笔记本电脑组成，摄像头为映美佳 DFK21AU04 CCD 摄像机，接口为 USB，视频格式为 640×480UYVY，最高帧速率为 30 fps。避苗控制子系统控制除草装置^[17]的除草爪齿旋转速度和避苗运动，控制算法见文献^[18]。速度测量子系统通过检测地轮上的编码盘信号获得除草装置的前进速度信息。作物行跟踪控制子系统主要读取横向移动直线位移传感器信息并控制除草装置横向移动，实现作物行的跟随。图像处理子系统与避苗控制子系统通过 RS232 进行通信，避苗控制子系统和作物行跟踪控制子系统相互之间通过 CAN 总线通信。

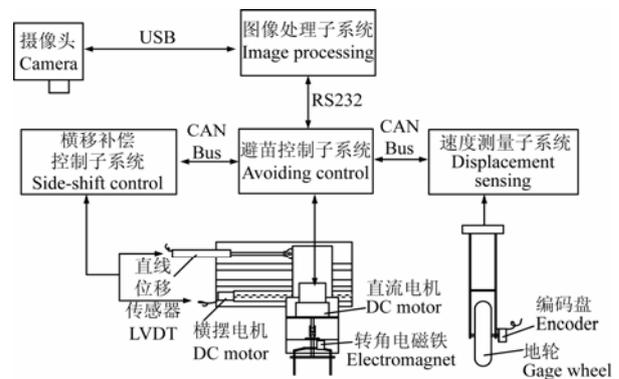
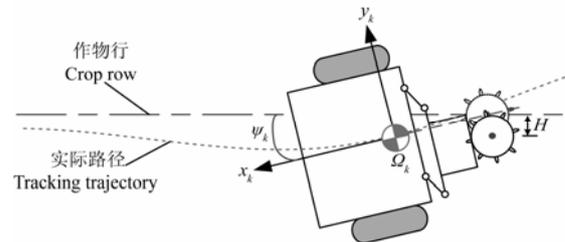


图 2 试验平台结构图
Fig.2 Structure of experiment platform

1.2 除草装置作物行跟踪原理

由于航向变化将导致拖拉机后部的株间除草装置中心与作物行中心线的距离变化。要实现除草爪齿对株间区域杂草控制，需保证除草爪齿运动轨迹的环扣部分进入株间区域。作物行跟踪原理如图 3 所示，根据车体与作物行中心线的空间位置关系调节控制株间除草装置相对车体的横向位置，保持株间除草装置中心至作物行中心线的距离 H 不变。



注： Ω_k 为除草装置平台质心； y_k 为车体坐标系 y 轴； x_k 为车体坐标系 x 轴； ψ_k 为航向角，(°)； H 为期望的株间除草装置中心至作物行中心线的距离，mm，下同。

Note: Ω_k is centroid of intra-row mechanical weeding platform; y_k is y axle of vehicle coordinates; x_k is the x axle of vehicle coordinates; ψ is heading of intra-row mechanical weeding platform, (°); H is the expected distance between the intra-row mechanical weed device and crop row, mm. The same as below.

图 3 作物行跟踪原理

Fig.3 Principle of crop row tracking

1.3 横向偏移补偿控制量

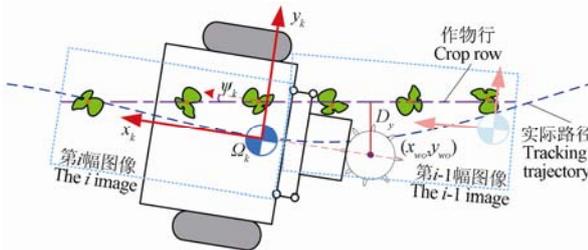
横向偏移量定义为在未进行横移偏差补偿控制前株间除草装置中心与作物行中心线的距离。

1.3.1 作物定位

作物的识别与定位方法^[22]，采用 2G-R-B 方法将作物 RGB 彩色图像进行灰度化，再选用 Ostu 法二值化、连续腐蚀和连续膨胀等方法对图像进行了初步处理。根据行像素累加曲线和曲线的标准偏差扫描线获得作物行区域信息，以作物行区域为处理对象，利用列像素累加曲线、曲线标准偏差和正弦波曲线拟合识别出作物，并结合二值图像中绿色植物连通域的质心获得作物位置信息。

1.3.2 作物行中心线拟合

通过机器视觉提取作物行信息的研究在国内已有较多报道^[23-26]。由于摄像机垂直于作物，每张图片里作物株数较少，一般为 2~4 株，作物行中心线只能根据作物的质心坐标决定。由点拟合直线采用常用的算法—最小二乘法。考虑到仅使用单帧图像内的作物质心坐标拟合直线变化较大，尤其在相邻 2 帧图片连接处，因此，拟合作物行直线时采用从当前图像中提取的作物质心和前几幅图像中提取的作物质心，如图 4 所示。



注: D_y 为株间除草装置中心和作物行中心线的距离, mm; (x_{w0}, y_{w0}) 为株间除草装置的中心。

Note: D_y is the distance between the center of intra-row mechanical weeding device and crop row; (x_{w0}, y_{w0}) is the center of intra-row mechanical weeding device, mm.

图 4 横向偏移补偿量

Fig.4 Calculation method of offset value for side-shift

从几何意义上讲，最小二乘法拟合的作物行直线是寻求与各株作物的质心点的距离平方和为最小的直线。若共有 m 株作物，各株作物的质心坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_m, y_m)$ ，所寻求的作物行直线 $y=ax+b$ 需使 $\sum_{j=1}^m [y_j - (ax_j + b)]^2$ 为最小。由于 a 和 b 是表征直线的 2 个基本参数，因此寻求直线的过程也就是寻找合适的 a 和 b ，使二元函数式 (1) 在 $a=\hat{a}$ 和 $b=\hat{b}$ 处最小^[27]，并根据极值定理和偏导数求解得到式 (2)，从而获得参数 a 和 b 。

$$\phi(a, b) = \sum_{j=1}^m [y_j - (ax_j + b)]^2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} a = \hat{a} = \frac{m \sum_{j=1}^m x_j y_j - \sum_{j=1}^m x_j \sum_{j=1}^m y_j}{m \sum_{j=1}^m x_j^2 - (\sum_{j=1}^m x_j)^2} \\ b = \hat{b} = \frac{\sum_{j=1}^m y_j}{m} - \hat{a} \frac{\sum_{j=1}^m x_j}{m} \end{cases} \quad (2)$$

1.3.3 作物行跟踪横向偏移补偿量

设株间除草装置的中心在车体坐标系中的坐标为 (x_{w0}, y_{w0}) ，根据点到直线的距离公式，株间除草装置的中心到作物行的距离为

$$D_y = \frac{|ax_{w0} - y_{w0} + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (3)$$

式中, D_y 为株间除草装置中心和作物行中心线的距离, mm; x_{w0} 为株间除草装置中心的 x 轴坐标, mm; y_{w0} 为株间除草装置中心的 y 轴坐标, mm。

株间除草装置中心到作物行中心线的距离应保持 H ，因此，作物行跟踪横向偏移补偿量 (Δy , mm) 为

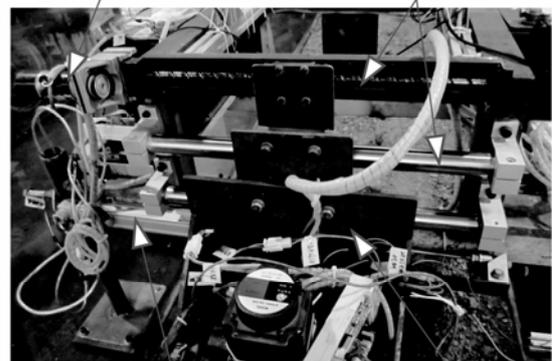
$$\Delta y = D_y - H \quad (4)$$

1.4 作物行跟踪实现与控制算法

1.4.1 硬件结构

如图 5 所示，作物行跟踪横向偏移补偿机构主要由 2 根直线导轨平行安装构成，株间机械除草装置安装平台由 2 直线导轨的滑台固定而成。直线导轨滑台的左右运动通过滚珠直线导轨实现，滚珠直线导轨的滑台由直流电机驱动，由电机的正反转实现横向偏移补偿量调整。直线位移传感器测量株间除草装置的中心在车体坐标系中的 y 轴坐标值以获得横向偏移补偿量，构成反馈回路。

横向偏移补偿控制电机 DC motor 横向偏移补偿机构 Side-shift offset compensation mechanism



直线位移传感器 LVDT (Linearly variable differential transformer)

株间除草装置 Intra-row weeding device

图 5 作物行跟踪横向偏移补偿机构

Fig.5 Side-shift offset frame for crop row tracking

直流电机电源为 24 V，通过电机驱动器实现电机与微处理器之间的连接。驱动器选用 L6203，它是一种场效应管 H 桥驱动芯片，最大电流 4 A，工作电压可达 42 V，控制逻辑输入为 TTL 电平，非常适合于普通直流电机换向和变速控制^[28]。硬件框图如图 6 所示，控制器通过 CAN (controller

area network) 总线接收控制指令和反馈工作状态信息，采用脉冲宽度调制 PWM (pulse-width modulation) 控制直流电机旋转速度调节横向偏差补偿机构的横向运动速度，利用直线位移传感器获得横向偏差补偿机构的横向移动量，形成位置闭环控制。

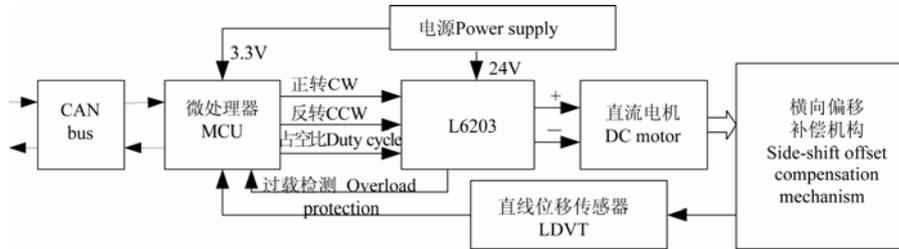


图 6 作物行跟踪控制器结构图
Fig.6 Structure of transverse controller for crop row tracking

1. 4. 2 双阈值死区 PD 控制算法

为实现精确、稳定的作物行跟踪控制，采用了双阈值死区^[29]PD (proportional differential) 控制算法，如式 (5) 所示。双阈值死区的边界 (即阈值) 设计为滞环 (或称回差)，以减少控制器在死区边界附近的控制动作频率，增强位置控制的稳定性^[30]。

$$O_{pd} = k_p \Delta y + k_d (\Delta y - \Delta y_0) \quad (5)$$

式中， O_{pd} 为 PWM 控制信号占空比，%； k_p 为比例系数； k_d 为微分系数； Δy_0 为上一时刻作物行跟踪横向偏移补偿量，mm。

2 结果与分析

2. 1 标准信号跟踪试验

通过试验，确定作物行跟踪控制器的死区宽度为 2 mm，回差宽度为 2 mm，PD 系数 k_p 和 k_d 分别为 1.8 和 15。

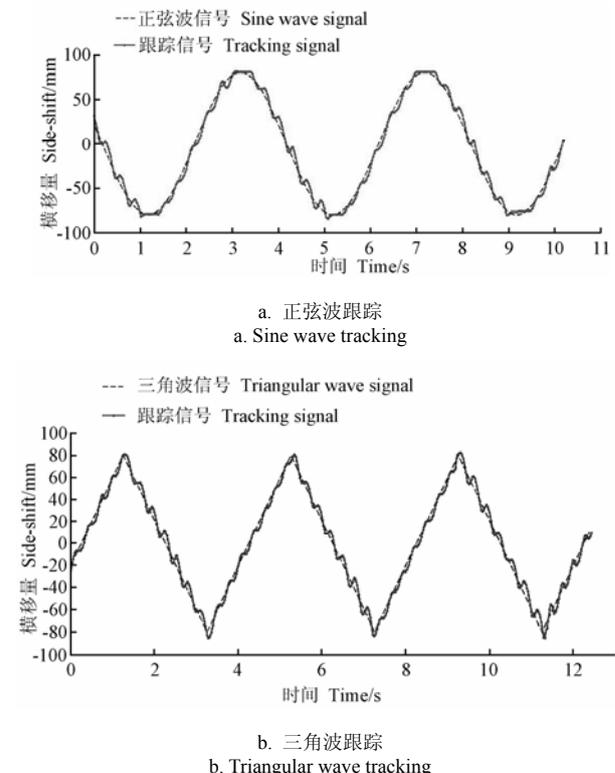
为测定横移补偿控制器的性能，分别以正弦波、三角波 2 种标准信号作为横向偏移补偿量信号对作物行跟踪控制器进行了测试。标准信号频率为 0.1 Hz，幅值为 80 mm。试验时除草装置前进速度选取 0.2 和 0.5 m/s，除草爪齿入土深度约为 10 mm。

除草装置前进速度为 0.5 m/s 时正弦波信号跟踪结果如图 7a 所示，最大误差 10 mm，平均误差 0.8 mm。除草装置前进速度为 0.5 m/s 时三角波信号跟踪结果如图 7b 所示最大误差 11 mm，平均误差 1.2 mm。

2. 2 除草装置跟踪试验

基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置^[17]由拖拉机牵引前进，装置设计有 8 根除草爪齿、爪尖宽度为 37 mm、旋转半径为 130 mm、试验时除草爪齿

入土深度为 10 mm、速比确定为 1.388，根据避苗判断条件式为： $-20 \text{ mm} \leq x_0 - x \leq 54 \text{ mm}$ ，参数选取依据见文献^[18]。试验作物选用生菜苗，栽种株距选取 300、250 和 200 mm 3 种，每行栽种 15 株生菜，14 个株间区域，拖拉机前进速度为 0.2 和 0.5 m/s。试验时在不同前进速度和不同株距下，分别对有作物行跟踪控制和不采用作物行跟踪控制进行了试验，相同速度、相同株距各重复 15 次，统计没有除草爪齿进入的株间区域数量和伤苗数量。



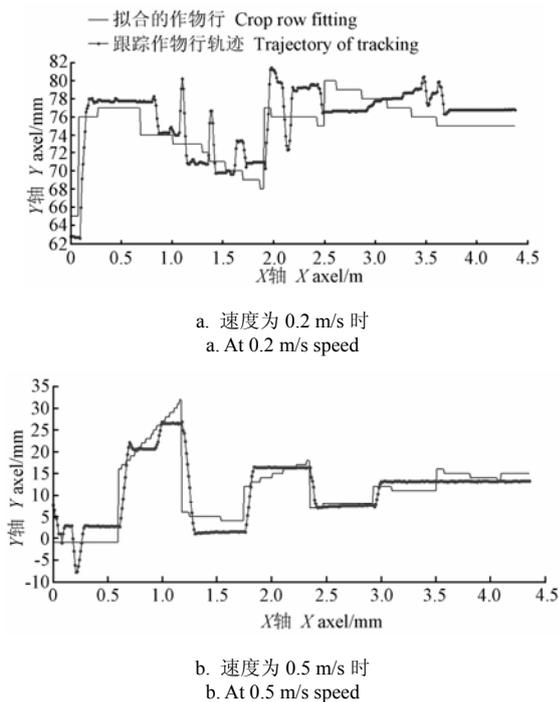
注：前进速度为 0.5 m/s。
Note: Forward speed is 0.5 m/s.

图 7 跟踪试验结果

Fig.7 Result of tracking test

2.2.1 作物行跟踪性能

如图 8a 所示为 0.2 m/s 前进速度下作物行直线拟合和作物行跟踪控制系统控制株间除草装置跟踪作物行轨迹, 跟踪最大误差为 13.4 mm, 平均误差 2.1 mm。图 8b 为在前进速度 0.5 m/s 时拟合的作物行和株间除草装置跟踪作物行的轨迹, 跟踪最大误差为 20.8 mm, 平均误差 2.5 mm。误差主要出现在 2 幅图像接合处, 因为每获取到一幅新图像会将新的作物定位数据更新至直线拟合数据集合中, 因此拟合的直线会与上一幅存在一定的差异, 甚至出现较大的阶跃变化。



注: 株距为 300 mm。
Note: Plant spacing is 300 mm.

图 8 直线拟合和跟踪轨迹

Fig.8 Fitting straight line and tracking trajectory

2.2.2 除草效果影响分析

除草效果的试验数据如表 1 所示。从表 1 可知, 作物行跟踪控制明显减少了除草爪齿未进入株间区域的比例, 在没有作物行跟踪控制时, 由于驾驶员不能保证时刻准确沿作物行行驶, 株间机械除草装置偏离作物行, 而除草爪齿作业的半径有限, 只有 130 mm, 因此出现大量株间区域不能被除草爪齿作业处理。当前进速度不高于 0.5 m/s 时, 在 300 mm 株距下, 可保证 93.3% 的株间区域有除草爪齿进行除草作业, 在 200 mm 株距下也可达到 85.9%。

作物行跟踪控制也降低了除草爪齿对作物的损伤, 没有作物行跟踪控制除草装置横向偏移补偿时伤苗率均高于 20%, 除了避苗控制带来的作物损

伤外, 除草装置受牵引拖拉机不能准确跟踪作物行而引起的过度靠近作物行, 除草装置避让作物的行程有限, 约 60 mm, 因此导致除草爪齿损伤作物。采用作物行跟踪控制可将伤苗率控制在 12% 以内, 另一个引起伤苗的原因是除草装置存在较大的偏移或连续两次拟合的作物行结果存有差异。

表 1 有无作物行跟踪避苗控制对比试验数据

Table 1 Result of contrast test of with tracking and without tracking

株距 Spacing /mm	速度 Speed (m·s ⁻¹)	爪齿未进入的株间比例 Untreated spacing/%		伤苗率 Damaged/%	
		无跟踪	有跟踪	无跟踪	有跟踪
		No tracking	Tracking	No tracking	Tracking
300	0.2	13.5	0	27.3	7.5
	0.5	18.2	6.7	27.3	9.5
250	0.2	20.0	6.0	27.3	8.6
	0.5	29.2	12.0	26.1	9.3
200	0.2	10.8	10.0	29.3	8.5
	0.5	29.5	14.1	21.2	11.8

注: 试验在土槽实验室内进行, 作物为生菜苗。
Note: Experiments were conducted in soil bin laboratory with lettuce seedlings.

3 结论

1) 提出了株间机械除草装置和作物行的横向偏移量识别方法, 并设计了株间机械除草作物行跟踪机构和控制器, 实现了株间机械除草跟随作物行。

2) 采用正弦波、三角波 2 种标准信号作为横向偏移补偿量信号, 对作物行跟踪控制器的性能进行了测试, 除草装置前进速度为 0.5 m/s 时正弦波信号跟踪最大误差 10 mm, 平均误差 0.8 mm, 三角波信号跟踪最大误差 11 mm, 平均误差 1.2 mm。

3) 作物行跟踪控制明显减少了除草爪齿未进入株间区域的比例, 当前进速度不高于 0.5 m/s 时, 在 300 mm 株距下, 93.3% 的株间区域有除草爪齿进行除草作业, 在 200 mm 株距下为 85.9%。作物行跟踪控制降低了除草爪齿对作物的损伤, 在前进速度不高于 0.5 m/s 和株距为 300、250 或 200 mm 时, 没有作物行跟踪控制实现除草装置横向偏移补偿时伤苗率高于 20%, 采用作物行跟踪控制可将伤苗率控制在 12% 以内。

虽然作物行跟踪控制进一步提高了株间除草的效益, 但本文所涉及的株间机械除草系统还需提高图像定位的精度, 提升株间机械除草的作业速度, 并保证较小的未处理的株间区域比例和伤苗率。此外, 由于田间情况复杂和株间机械除草装置试验平台的局限性未能进行田间试验, 因此, 还需进一步对试验平台进行优化, 以在田间开展相关研究。

[参考文献]

- [1] Kouwenhoven J K. Intra-row mechanical weed control-possibilities and problems[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 41(2): 87-104.

- [2] Pullen D. A High-speed Automatically Guided Mechanical Inter Row Weeder for Arable Crops[D]. Cranfield University, Bedfordshire UK, 1995.
- [3] Rasmussen K. Weed control by a rooting cultivator in potatoes[C]// Proceedings of the 5th EWRS workshop on physical weed control, Pisa, Italy, 2002.
- [4] Home M. An Investigation Into the Design of Cultivation Systems for Inter-and Intra-row Weed Control[D]. Cranfield University, Bedfordshire, UK, 2003.
- [5] Mattsson B, Nylander C, Ascard J. Comparison of seven inter-row weeders[C]// Proceedings of the Veroffentlichungen bundesanstalt fur agrarbiologie, Linz, Donau, 1990.
- [6] Fogelberg F, Kritiz G. Intra-row weeding with brushes on vertical axes-factors influencing in-row soil height[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50(2): 149—157.
- [7] 韩豹, 吴文福, 申建英. 水平圆盘式苗间除草装置试验台优化试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 142—146.
Han Bao, Wu Wenfu, Shen Jianying. Optimization experiment on test-bed of horizontal disk weeding unit between seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 142—146. (in Chinese with English abstract)
- [8] 牛春亮, 王金武. 水稻苗间除草装置工作机理分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 51—55.
Niu Chunliang, Wang Jinwu. Analysis on working mechanism of paddy weeding device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.1): 51—55. (in Chinese with English abstract)
- [9] 马旭, 齐龙, 梁柏, 等. 水稻田间机械除草装备与技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 162—168.
Ma Xu, Qi Long, Liang Bai, et al. Present status and prospects of mechanical weeding equipment and technology in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 162—168. (in Chinese with English abstract)
- [10] Astrand B, Baerveldt A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(7): 21—35.
- [11] Tillett N D, Hague T, Grundy A C et al. Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2): 171—178.
- [12] Griepentrog H W, Gulhom-Hansen T, Nielsen J. First field results from intra-row rotor weeding[C]// The 7th European Weed research Society Workshop on Physical and Cultural Weed Control, Salem, Germany, 2007.
- [13] 陈勇, 郑加强, 郭伟斌. 除草机器人机械臂运动分析与控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 105—108.
Chen Yong, Zheng Jiaqiang, Guo Weibin. Kinematics analysis and motion control for a weeding robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM), 2007, 38(8): 105—108. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭伟斌, 陈勇, 侯学贵, 等. 除草机器人机械臂的逆向求解与控制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 108—112.
Guo Weibin, Chen Yong, Hou Xuegui, et al. Inverse kinematics solving and motion control for a weeding robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 108—112. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张朋举, 张纹, 陈树人, 等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 56—59.
Zhang Pengju, Zhang Wen, Chen Shuren et al. Virtual design and kinetic simulation for eight claw intra-row mechanical weeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Transactions of the CSAM), 2010, 41(4): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.
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 (Transactions of the CSAM), 2011, 42(7): 196—199. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡炼, 罗锡文, 严乙桢, 等. 基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 10—16.
Hu Lian, Luo Xiwen, Yan Yi'an, et al. Development and experiment of intra-row mechanical weeding device based on trochoid motion of claw tooth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 10—16. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于余摆运动的株间机械除草爪齿避苗控制算法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 12—18.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Control algorithm for intra-row weeding claw device based on trochoidal motion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(23): 12—18. (in Chinese with English abstract)
- [19] Tillett N D, Hague T. Computer-vision-based hoe guidance for cereals: An initial trial[J]. Agric Engng Res, 1999, 74(10), 225—236.
- [20] Griepentrog, H W, Nørremark M, Nielsen J. Autonomous Intra-row Rotor Weeding Based on GPS[C]// 2006 CIGR World Congress Agricultural Engineering for a Better World, Bonn, Germany, 2006.
- [21] Nørremark M, Griepentrog H W, Nielsen J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396—410.

- [22] 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12—18.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(10): 12—18. (in Chinese with English abstract)
- [23] Han S, Zhang Q, Ni B, et al. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(1): 179—195.
- [24] Wiltshire J J J, Tillett N D, Hague T. Agronomic evaluation of precise mechanical hoeing and chemical weed control in sugar beet[J]. European Weed Research Society Weed Research, 2003, 43(4): 236—244.
- [25] Sogaard H T, Olsen H J. Determination of crop rows by image analysis without segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 38(2): 141—158.
- [26] Tillett N D, Hague T, Miles S J. Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 33(3): 163—177.
- [27] 何晓群. 实用回归分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [28] ST Microelectronics. L6201-L6202-L6203 Datasheet [EB/OL]. <http://www.st.com>, 2003.
- [29] Motorola. MC33030 Datasheet[EB/OL]. <http://www.motorola.Com>, 2000.
- [30] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118—122.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 118—122.(in Chinese with English abstract)

Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding

Hu Lian^{1,2}, Luo Xiwen^{1,2*}, Zhang Zhigang^{1,2}, Chen Xiongfei^{1,2}, Lin Chaoxing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Intra-row mechanical weeding technique and device can free strenuous labor and eliminate the detriment of using chemical weed. The yaw error is barely avoidable when running a tracked crop-row tractor. It can result in an inconstant side-shift between the intra-row mechanical weed device and crop row and the increasing of crop damage and untreated weeds in intra-row area. The objective of this research is to develop a crop row tracking control algorithm for the optimized measurement of side-shift offset. The crop row line is obtained by using least square fit from 20 crops in several consecutive images, and the side-shift offset is estimated based on weeding device lateral position to keep a constant distance between the weeding device and crop row. Then, the PD control algorithm with bi-threshold dead band for transverse controller is developed to reduce the transverse error when the estimated offset exceeds the dead band. It needs to be ensured that the origin of the weeding device follows the desired route and parallels the crop row, by controlling velocity and direction of DC motor. The test results prove the good performance of standardized signal tracking using sine wave and triangle wave. The maximum and average sine wave tracking error is 10 mm and 0.8 mm, respectively, with a forward velocity of 0.2 m/s. The maximum and average triangle wave tracking error is 11 mm and 1.2 mm, respectively, with a forward velocity of 0.5 m/s. The results from weeding experiment in soil bin indicate that the side-shift enabled control of the transverse position of the weeding device and is able to follow the crop row line with an accuracy of ± 13.4 mm at 0.2 m/s and ± 20.8 mm at 0.5 m/s forward velocity. The untreated weeds in the intra-row area decreased significantly. The treated intra-row area achieve up to 93.3 % and 85.9 % of field surface for a mean plant spacing of 300 mm and 200 mm, respectively. The danger of crop damage is significantly reduced by using side-shift control. Compared to the rate of crop damage up to 20% without using the transverse controller, the rate of crop damage is down to less than 12% by using the side-shift control. The accuracy of intra-row weeding device tracking is high and acceptable.

Key words: agricultural machinery, weed control, identification, tracking, side-shift, crop row

(责任编辑: 张俊芳)