

基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法

蒋郁^{1,2} 崔宏伟¹ 区颖刚¹ 马旭^{1,3} 齐龙^{1,3} 郑文汉¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学现代教育技术中心, 广州 510642;

3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要: 准确地定位稻株是水稻株间除草机械作业的前提,提出了侧位俯拍的图像采集方式获取稻株茎基部图像,采用茎基部分区边缘拟合的方法定位稻株,解决了除草期内水稻冠层接连引起的定位不准确问题。首先分析稻株生长形态,探究侧位俯拍稻株茎基部的相机安装参数设定,以及影响成像质量的相关因素,提出了遮光条件下采集图像的方法,构建了具有遮光功能的图像采集系统;其次采用 $2G-R-B$ 彩色图像灰度化、自动阈值、形态学操作等方法处理并分割稻株图像,检测茎基部边缘并分析其形态特征,并提出了分区边缘拟合定位方法:划分拟合区间为3个子区间,在子区间内进行边缘拟合,以拟合边缘线段中点坐标均值作为子区间茎基部中点,根据中点拟合茎基部中线,以中线中点作为定位的茎基部中心。最后进行了基于茎基部与冠层的稻株定位精度田间对比试验,结果显示:插秧后 10~20 d 内,基于茎基部的稻株定位误差均在 7.0 mm 以下,其中 10 d、15 d、20 d 时的定位误差分别为 6.9 mm/6.8 mm、5.9 mm/5.8 mm、6.3 mm/6.5 mm(有水条件/无水条件);基于冠层的稻株定位误差在 8.0 mm 以上,其中插秧 20 d 后,定位误差超过 15 mm 以上。试验结果表明,所提出的基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法,定位精度高,除草适用期长,可满足株间机械除草过程中对稻株精准定位的技术要求。

关键词: 水稻; 机械除草; 株间除草; 定位; 茎基部

中图分类号: S224.1⁺5; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0023-09

Positioning Method of Rice Seedlings Based on Edge Fitting in Separated Region of Stem Base

JIANG Yu^{1,2} CUI Hongwei¹ OU Yinggang¹ MA Xu^{1,3} QI Long^{1,3} ZHENG Wenhan¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Modern Educational Technology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China)

Abstract: Positioning of rice seedlings is an important step of mechanical intra-row weeding. Aiming to minimize the positioning errors based on canopy of rice, a system that could capture RGB images of rice stem base on the side view was built to position the rice seedlings according to edge fitting in separated region of the stem base. Firstly, relevant factors, including the morphology of rice seedlings, the installation parameters of camera on the side-view and affecting image quality were analyzed, and a method of grabbing image under shading conditions was proposed, contributing to a system with shading device. The original RGB images were distinguished from soil by analyzing the excessive green ($2G-R-B$) rice seedlings index images. The Otsu algorithm method was employed to transform a gray image to a binary image, and then the binary images were smoothed by morphological operation to remove noise for subsequent analysis. After that the edges of stem base were extracted by the Canny operator, and the fitting region of edges was set up. A method was presented in fitting region based on edge fitting in non-separated region of the stem base. However, the results showed that this positioning method was not

收稿日期: 2017-01-10 修回日期: 2017-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575195)、广东省自然科学基金项目(2015A030313402)、广东省科技计划重点项目(2014B020207003)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-01-33)、广东省科技计划项目(2014A020208112)和广州市珠江科技新星专项(2014J2200041)

作者简介: 蒋郁(1983—),女,博士生,实验师,主要从事图像与信息处理研究,E-mail: nova_yy@scau.edu.cn

通信作者: 区颖刚(1947—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计研究,E-mail: ouying@scau.edu.cn

accurate because of effect of unsmooth and unilateral sloping edges of stem base. Therefore, the fitting region was separated into three subintervals where the edges of stem base were fitted by the Hough transform. The center of rice seedlings was gained by the center coordinates of the mid-line fitted by the mean of midpoint coordinates of fitting edges. The positioning experiments of rice seedlings in terms of stem base and the canopy were carried out respectively. The results of positioning based on stem base showed that the positioning errors were less than 7.0 mm, and the positioning errors were 6.9 mm, 5.9 mm and 6.3 mm under the condition of including water and 6.8 mm, 5.8 mm and 6.5 mm under the anhydrous condition on the 10th, 15th and 20th day after transplanting, respectively. The results of positioning based on canopy showed that the positioning errors were above 8.0 mm, and the positioning errors were 8.2 mm, 11.3 mm and 15.4 mm under the condition of including water and 9.0 mm, 10.7 mm and 16.1 mm under the anhydrous condition on the 10th, 15th and 20th day after transplanting, respectively. The results suggested that the innovative positioning method that based on edge fitting in separated region of the stem base of rice seedlings met the technical requirement of mechanical weeding in terms of high precision and long applicable period.

Key words: rice seedlings; mechanical weeding; intra-row weeding; positioning; stem base

引言

避开作物选择性地对株间杂草进行防除是机械除草的最大难点^[1]。机插秧虽理论上株距分布均匀,但实际生产中由于单位面积上的取秧量不同、漏插以及漂秧现象的存在,致使水稻株距分布不均匀,因此,要实现水稻株间机械除草,首先需要对稻株进行精准识别和定位。

目前,作物自动识别与定位常采用机器视觉技术,然而识别与定位精度常受图像背景的复杂度、作物与杂草形态的相似性以及环境因素等影响,给田间智能机械除草装备的研究和应用带来很大困难。TILLET等^[2]应用二维小波技术结合 Kalman 跟踪算法识别目标作物莠草个体并获得其位置信息,形成决策后控制除草部件完成株间除草作业。ASTRAND等^[3]对大量甜菜及其杂草的颜色、形状和不变矩特征信息进行提取,并建立了 k-NN 分类器,对甜菜的识别正确率达到 80% 以上。翟志强等^[4]提出一种基于 Census 变换的作物行识别算法,通过改进超绿-超红方法灰度化图像提取绿色作物特征,以最小核值相似算子检测作物行特征角点,运用基于 Census 变换的立体匹配方法和宽度阈值提取作物行特征点,最后利用主成分分析法得到作物行中心线。胡炼等^[5]在超绿颜色空间,利用 Otsu 图像分割及形态学运算方法,识别棉苗和生菜苗,根据行列像素累加结合绿色植物连通域的质心获取作物的位置信息。

以上研究均采用机器视觉技术从目标作物的冠层进行识别和定位;识别和定位的作物多为叶菜类作物,株距较大;作物冠层形态特征相对简单,相邻植株无接连;图像背景多为旱地。然而,对于水稻这种小株距作物而言,不仅冠层形态特征较为复杂,而

且水稻开始分蘖后,相邻稻穴冠层叶片出现接连,采用机器视觉技术通过冠层定位与根部实际位置存在较大偏差。此外,水田背景环境复杂、水层反光,也给稻苗的识别和定位带来一定困难。近年来,NAKARMI等^[6]采用茎部定位的图像处理方式定位作物,通过 3D 相机采集玉米茎基部图像,进而提取出作物株距信息,该方法可以适应作物不同生长时期的定位要求。

本研究通过分析稻株的形态特征,提出侧位俯拍的图像采集方式,通过合理设定图像采集参数获取稻株茎基部图像;同时构建具有遮光功能的图像采集系统,以提高自然光下稻苗与背景的差异。

1 材料与方法

1.1 稻苗样本培育

供试水稻品种为天优 173。2016 年 4 月 19 日,在试验基地温室内(113.35°E、23.16°N)培育稻苗,温室内相对湿度为 60%~70%,昼夜平均温度分别为 28、20℃。水稻种子经浸泡消毒 24 h 后,冲洗、催芽,然后进行播种、育秧。肥水按照常规措施均一管理。2016 年 5 月 15 日,当稻苗平均高度约为 25 cm,冠层平均直径约为 13 cm 时,将稻苗分别移栽到 3 个试验土槽(长×宽×高为 200 cm×90 cm×40 cm)内。每个试验土槽移栽稻苗 20 株,即每行 10 穴,每列 2 穴。根据目前机插秧的相关作业参数,行距设定为 30 cm,株距 12~17 cm 随机。试验槽放置地点的相对湿度为 65%~75%,昼夜平均温度分别为 26、20℃。试验槽土壤选取稻田土,模拟实际水田情况,并有杂草分布。

1.2 图像采集

1.2.1 图像采集系统

图像采集系统主要由彩色相机(acA640-90gc,

BASLER,德国)、镜头(M0814- MP,COMPUTAR,日本)、计算机(B470,Lenovo)、遮光装置、移动平台、轨道等组成,如图 1 所示。其中相机分辨率为 640 像素×480 像素,镜头焦距 8 mm,光圈 F1.4~F16C,采集帧率 60 f/s,遮光装置的框架材料为铝合金,遮光布的材料为聚酯纤维。图像采集及处理程序均在 In-Sight Explorer 4. 9. 3(COGNEX,美国)下完成。

图像采集时,首先将相机安装在移动平台上;然后控制移动平台沿平行于作物行的轨道运动,保持相机与稻苗的相对位置固定,不发生横向偏移。

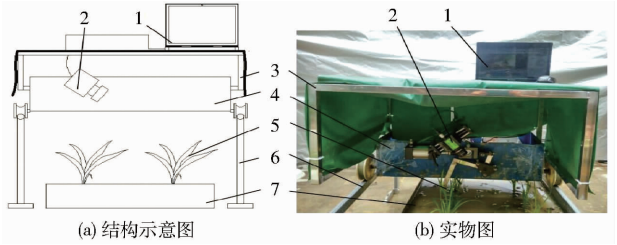


图 1 图像采集系统俯拍图像

Fig. 1 Image acquisition system

1. 计算机 2. 相机 3. 遮光装置 4. 移动平台 5. 稻苗 6. 轨道 7. 土槽

1. 2. 2 系统参数设定

1. 2. 2. 1 侧位俯拍的相机安装参数设定

稻苗冠层形态特征复杂,除草时相邻稻株叶片接连,基于冠层识别和定位稻株存在误差。参考侧位图像采集的相关研究^[7-8],并结合稻株茎基部成束的生长特点,本研究提出侧位俯拍稻株茎基部的图像采集方法。侧位俯拍是指:在与目标行相邻的行间,略高于稻株冠层的部位对目标稻株茎基部进行图像采集。

因水稻除草期一般为插秧后 10~20 d,为探究除草期内,侧位俯拍稻株茎基部的适用性,本研究选

取插秧后 10 d、15 d、20 d,进行稻株冠层与茎基部图像样本采集,并对比分析。图像采集结果如图 2 所示。

图 2a、图 2b 3 幅图分别为稻苗插秧后 10 d、15 d、20 d 采集的图像。对比图 2a、2b 可以看出,在除草期内,随着稻株生长,相邻稻株冠层接连状态愈加明显,难以区分,而相邻稻株茎基部始终易于区分。由此可见,在除草期内,侧位俯拍稻株茎基部的方式与垂直俯拍冠层的方式相比更利于稻株的识别和定位。

然而,由图 2b 可以看出,目标稻株茎基部的识别与定位易受相邻行稻株影响,其原因是相机视野不适合,而相机视野与物距有关,物距增大,则视野增大^[9]。侧位俯拍时相机物距与相机安装的高度、俯角等参数相关,因此,为获得清晰且不受邻行干扰的稻株茎基部图像,应对相机的相关拍摄参数进行合理的设定。

图 3 为相机安装不同位置的示意图。图中点 O_1 、 O_2 表示相机安装位置。 h_1 、 h_2 表示相机安装高度, l 表示相机安装位置与目标稻株水平距离, γ_1 、 γ_2 表示相机安装俯角, R_{h1} 、 R_{h2} 表示株高和茎基部高度,设定稻株茎基部高度为株高的 $2/3$,即 $R_{h2} = 2R_{h1}/3$ 。

相机安装时需避免相邻行稻株冠层对镜头视野的遮挡,同时需避免机具行进过程中设备对稻株的影响。设行距 L ,相机安装于行间,安装水平距离 l 约为 $2L/3$ 。在水平距离 $l = 2L/3$ 时,纵向调整相机位置,同时调整俯角 γ ,使视野满足要求,即视野中不包含相邻行稻株茎基部。如图 3 位置 O_1 、 O_2 。当相机位于 O_1 上方时,物距过大导致相机视野中稻株变小,稻株茎基部在图像中所占面积较小,不利于茎

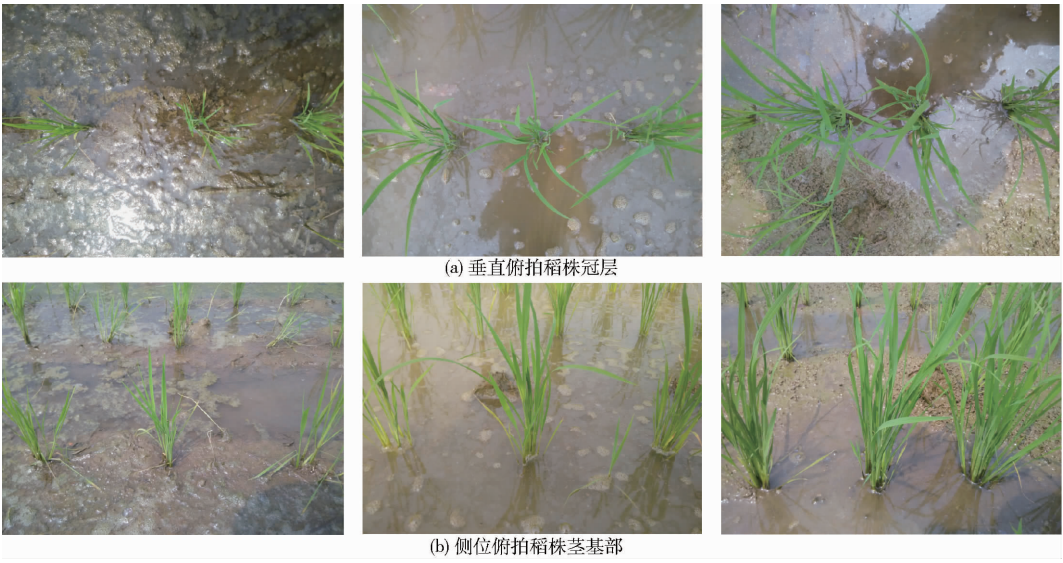


图 2 不同生长时期的稻株俯拍图像

Fig. 2 Top views of rice seedlings at different growth stages

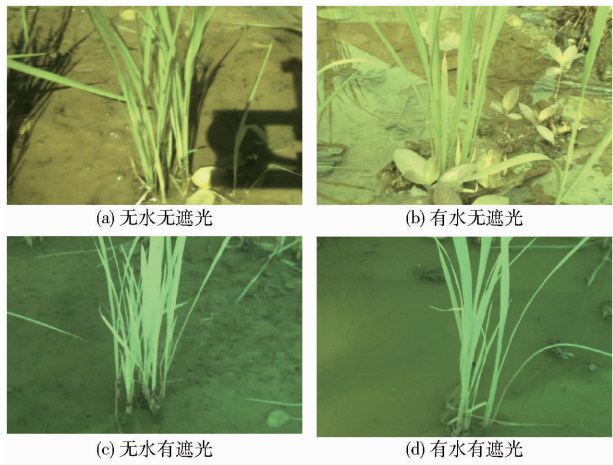


图 5 不同光照条件下图像采集结果

Fig.5 Images captured under different light conditions

左右。④启动图像采集系统与移动平台，来回 2 次完成一试验槽稻株的采集。⑤将试验槽中的水全部排出，重复步骤④。⑥一试验槽图像样本采集完成后，进行另一个试验槽图像样本采集，重复以上步骤。

图像采集在插秧后 10 d、15 d、20 d 进行，采集有水、无水图像各 50 幅，共 300 幅图像用于定位方法分析。

1.3 图像分割

为突出稻株灰度，弱化背景，需将 RGB 彩色图像各颜色分量适当组合转换。秧苗灰度化最常用方法为^[12-13]：用 $2G - R - B$ 对原图像进行灰度化，计算式为

$$G_{ray}(x,y) = \begin{cases} 0 & (2G - R - B < 0) \\ 2G - R - B & (0 \leq 2G - R - B \leq 255) \\ 255 & (2G - R - B > 255) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $G_{ray}(x,y)$ ——像素坐标 (x,y) 的灰度
 $R、G、B$ ——像素的红、绿、蓝颜色分量

该方法可以突出绿色颜色空间灰度，而阴影和土壤得到较好的抑制效果。其中无水遮光图像样本灰度化后所得效果如图 6b 所示。

图像采集时，光照强度变化影响图像的灰度分布，因此，无法采用固定阈值的方法进行图像分割。本研究选取最大类间方差法（Otsu 法）自动确定阈值对图像进行二值化处理。最大类间方差法是一种

自动选择阈值的方法^[14-16]。利用 Otsu 法计算出最优阈值 T_h ，使用阈值 T_h 对灰度图像二值化后的结果如图 6c 所示。由图 6c 可知，二值化后的稻株茎基部外边缘不平滑，内部存在较多孔洞，不利于稻株茎基部边缘提取和中心定位。为平滑稻株茎基部外边缘，同时填充茎基部内部孔洞，减少噪声，本研究选用先进行 3 次腐蚀，后进行 3 次膨胀的形态学操作对二值图像进行处理^[17-18]。将处理结果进行面积滤波，过滤像素面积小于 1 500 像素的连通区域^[19]，然后通过孔洞填充操作，填充稻株茎基部内部存在的孔洞，形态学操作处理结果如图 6d 所示。

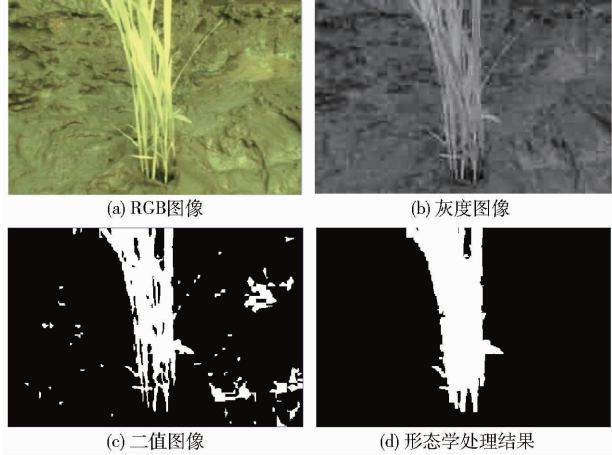


图 6 图像分割结果

Fig.6 Image segmentation results

1.4 定位方法分析

1.4.1 边缘检测

边缘的定义为图像中灰度发生急剧变化的区域边界。根据灰度变化的剧烈程度，通常将边缘划分为阶跃状和屋顶状两种类型^[20]。阶跃边缘两边的灰度变化明显，而屋顶边缘位于灰度增加与减小的交界处^[21]。二值图像中边缘两边的灰度变化明显，属于阶跃状边缘。其中较优的阶跃状边缘检测算法为 Canny 边缘检测，先使用高斯滤波器平滑图像，接着用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向，然后对梯度幅值进行非极大值抑制，最后用双阈值算法检测边缘。

运用 Canny 边缘检测算子在图像内检测稻株茎基部边缘，检测结果如图 7a、8a 所示，图 7b、8b 为检测到的边缘示意图。

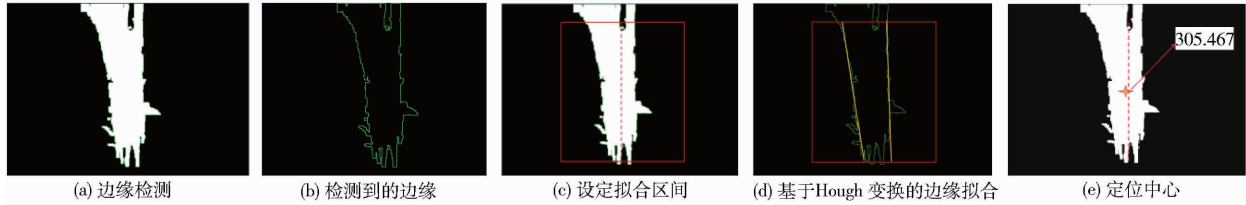


图 7 无分区边缘拟合定位方法

Fig.7 Edge fitting in non-separated region of stem base

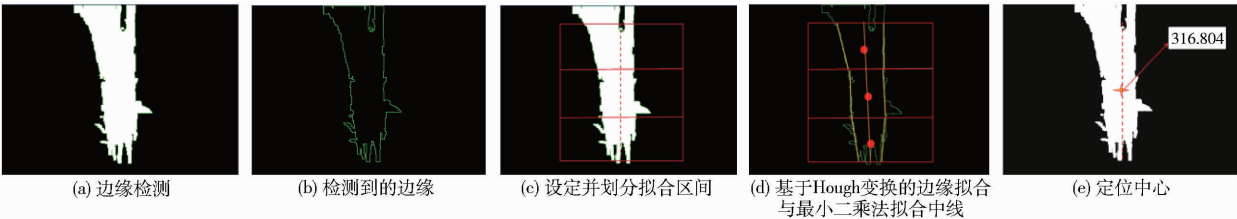


图8 分区边缘拟合定位方法

Fig.8 Edge fitting in separated region of stem base

1.4.2 分区与边缘拟合

1.4.2.1 设定茎基部边缘的拟合区间

由于茎基部定位稻株不需要稻株冠层,因此在茎基部中下部设计拟合区间。由于稻株茎基部直径不一,为使拟合区间充分包含茎基部,设计拟合区间宽 $W=3R_i$ (R_i 表示图像中茎基部直径),而茎基部定位不需要稻株冠层,因此设计拟合区间高度 H 为图像高度的 $3/4$ 。

本研究测量 50 穴稻株插秧后 20 d 时茎基部的直径(表 1)。由表 1 知,稻株茎基部直径均小于 50 mm。经坐标转换为像素坐标系,稻株茎基部直径均小于 90 像素,因此设计拟合区间宽度(W)为 270 像素;本研究图像高度为 480 像素,因此设计拟合区间高度(H)为 360 像素。根据拟合区间的尺寸,将区间放置到图像中间位置,区间左上角顶点坐标为(185,60)。拟合区间如图 7c、8c 中的大矩形所示,其中虚线又将矩形区域分 2 个虚拟小区间,表示边缘拟合分别在两侧进行。

表 1 茎基部直径分布

Tab.1 Distribution of diameter at stem base

直径范围/mm	样本数
10 ~ 20	3
20 ~ 30	20
30 ~ 40	22
40 ~ 50	5

1.4.2.2 划分拟合区间与边缘拟合

采用 Hough 变换中的直线拟合算法进行边缘拟合^[22-23]。Hough 变换中的直线拟合算法在极坐标下表示为

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \tag{2}$$

式中 ρ ——原点到直线交点间的距离

θ ——垂直于图像中直线的直线角度

Hough 变换中的直线拟合采用极坐标方程,将检测的边缘像素点变换到极坐标系中,根据图像分辨率确定 ρ 和 θ 范围,同时分配累加器,然后进行 Hough 变换,不断调整 θ 值,得出 ρ 值,并在对应的累加器累积加 1。最后,检测整个参数空间累加器的峰值,此峰值即为对应图像中直线的参数。边缘

离散点拟合直线主要由 In-Sight Explorer 中的 FindLine 函数实现,在此工具中设定边缘拟合的方向为纵向,横向边缘不进行拟合。

采用 Hough 变换算法在拟合区间的左右两侧对边缘像素点进行拟合,得到代表边缘的线段,如图 7d 中黄色实线为边缘拟合结果;计算两条线段中点坐标均值,作为该方法定位的稻株中心,定位中心的横坐标显示在图右上方,如图 7e 所示。此过程称为无分区边缘拟合定位方法,定位过程如图 7a、7c、7d、7e 所示。由图 7e 可以看出,定位中心向左侧偏离,其原因如下:①由图 7b 可以看出,茎基部边缘生长姿态不对称,仅左侧边缘向左侧倾斜,而右侧边缘基本保持竖直状态,导致拟合的两侧边缘线段不对称,如图 7d 所示,两侧边缘线段中点坐标均值向实际茎基部中心左侧偏离,从而造成定位误差。②如图 7b 所示,检测到的茎基部边缘不平滑,存在凸起的尖锐边缘,采用 Hough 变换的直线拟合算法在整个区间内进行边缘拟合,拟合结果易受到凸起尖锐边缘的影响。

为减小以上原因造成的定位误差,本研究提出分区边缘拟合的方法。所谓分区边缘拟合是指:将拟合区间分为上、中、下 3 个子区间,在每个子区间内进行边缘拟合。边缘拟合结果如图 8d 所示,图中黄色实线表示拟合的边缘,可以看出仅上部区间内拟合的边缘线段不对称,其边缘线段中点坐标均值较实际茎基部中点向左侧偏离;中、下部区间内的边缘线段基本保持对称状态,其边缘线段中点坐标均值可代表茎基部中点。为进一步减小边缘不对称造成的误差,利用 3 个子区间内的茎基部中点拟合线段,求线段中点作为茎基部中心,详述见下文。

1.4.3 中心定位

在区间边缘拟合完成后,对拟合结果进行判定,若子区间两侧均存在拟合边缘,则求两侧边缘线段中点坐标均值作为该区间内茎基部的中点;若子区间不存在或仅一侧存在边缘,则认为该区间无茎基部中点;若中点数小于 2,则无法进行直线拟合,图像不满足要求。

利用子区间存在的茎基部中点,结合最小二乘

法拟合茎基部中线。最小二乘法原理为：设拟合的直线 x 和 y 之间的函数关系为

$$y = a + bx \tag{3}$$

式中有 2 个待定参数, a 表示截距, b 表示斜率。用最小二乘法估计参数时, 要求观测值 y_i 偏差的加权平方和 Q 为最小, 即

$$\min Q = \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)]^2 \tag{4}$$

式中, (x_i, y_i) 表示子区间茎基部中点。分别对 a 、 b 求偏导得

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)]^2 = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)]^2 = 0 \end{cases} \tag{5}$$

式(5)可得到参数 a 、 b 的值, 即可得到拟合的直线。最小二乘法拟合直线通过 LineFromNPoints 函数实现。

图 8d 中 3 个红色小圆表示各子区间茎基部中点, 由子区间茎基部中点拟合中线的结果如图 8d 中茎基部中间的线所示。以拟合中线的中点作为定位中心, 定位结果如图 8e 所示, 图中数值为定位中心的横坐标。

2 试验与分析

2.1 田间茎基部定位试验与分析

2.1.1 横向纠偏系统

在田间进行机械除草作业时, 机具在行进的过程中会产生横向偏移, 为此研制了横向纠偏系统, 实时控制机具的横向偏移。横向纠偏系统主要包括苗带线视觉提取系统和液压控制系统, 其原理为: 安装垂直俯拍苗带的相机(图 9b), 实时采集苗带图像, 运用基于 Hough 变换统计学特性的作物行线提取算法^[24], 进行苗带线提取, 提取结果如图 10b 所示, 图中红色实线为提取苗带线, 绿色实线为当前相机指示方向, 测量 2 条线之间的夹角 β 为苗带偏转角。通过液压控制系统实时调整除草机架, 使除草部件与苗带保持平行(苗带偏转角 β 约为 0°), 避免伤苗。液压控制系统电路图如图 9a 所示, 当检测到苗带发生偏转时, 发出信号到 IO 模块, 通过 PLC 控制液压缸伸缩实现除草机架的实时调整纠偏。

本研究进行稻苗茎基部图像采集时, 通过横向纠偏系统实时调整侧位俯拍相机(图 9b)的横向偏移, 保持侧位俯拍相机与稻苗相对位置不变。控制系统实物图如图 9b 所示。

2.1.2 茎基部中心线标定

在广东省江门市试验田进行田间测试时, 将横

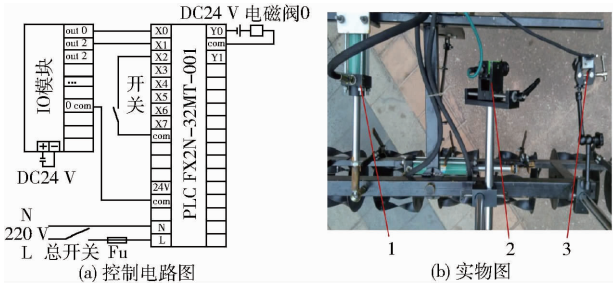


图 9 横向纠偏系统

Fig. 9 Control system of lateral offset

1. 液压缸 2. 侧位俯拍相机 3. 垂直俯拍相机

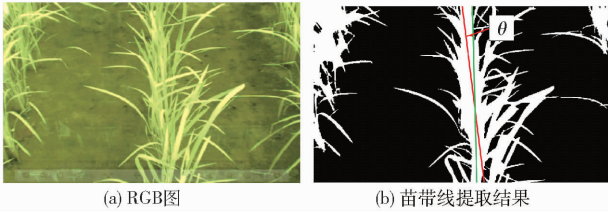


图 10 苗带线提取

Fig. 10 Seedlings line extraction

向纠偏系统和茎基部图像采集系统安装在水田拖拉机上(图 11), 按照 1. 2. 2 节中关于系统参数的设置要求安装侧位俯拍相机, 设置拖拉机行驶速度为 0. 15 m/s。



图 11 田间测试现场

Fig. 11 Experiment in paddy field

供试稻苗为五山丝苗, 每穴苗数平均 5 株, 稻田水层厚度约为 2 cm。在水稻插秧后 10 d、15 d、20 d 时采集图像, 分别采集有水、无水条件下图像样本各 50 幅, 共 300 幅稻株茎基部图像样本用于方法验证。

稻株中心标定是判断定位是否准确的关键。本研究通过人工标定得到像素坐标下稻株中心的精确坐标。图像采集前, 在稻株茎基部中间插入一根黑色标杆, 如图 12a 所示。图像二值化后, 检测并拟合该标杆的边缘成线段, 计算两侧边缘线段中点坐标均值作为标定稻株中心。拟合的边线如图 12b 中红色虚线所示, 标定中心如图 12b 中的点所示, 其横坐标显示在图 12b 右上角。

2.1.3 茎基部边缘拟合定位

为验证本文所述分区边缘拟合定位方法的定位精度, 分别采用无分区边缘拟合定位方法和本文所

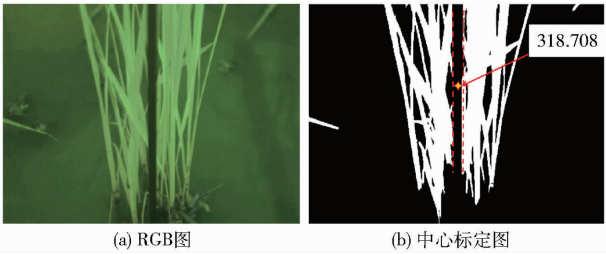


图 12 中心线标定

Fig. 12 Center line calibration

述分区边缘拟合的定位方法对稻株进行定位,并将定位中心的横坐标和标定中心的横坐标由像素坐标转换为实际坐标,然后计算定位横坐标的偏移 δ_i 。定位误差由均方根误差(RMSE)表示,均方根误差公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} \delta_i^2}{50}} \quad (6)$$

式中 σ ——均方根误差,即定位误差
 δ_i ——第*i*幅图像中的定位偏移
稻株定位结果如表 2 所示。

表 2 茎基部定位结果

Tab.2 Positioning results of stem base

插秧后 天数/d	定位误差/mm			
	分区有水	分区无水	无分区有水	无分区无水
10	6.9	6.8	10.3	10.1
15	5.9	5.8	9.3	9.9
20	6.3	6.5	11.7	11.3

对比分区边缘拟合与无分区边缘拟合两种定位方法的定位误差发现,分区边缘拟合定位方法的定位精度优于无分区边缘拟合定位方法,说明因稻株茎基部边缘不平滑、茎基部顶端单侧倾斜,无分区边缘拟合定位茎基部中心容易造成较大定位误差。由表 2 中分区条件下的定位误差可知,在有水或无水条件下,定位误差保持在 7.0 mm 下,其中插秧后 15 d 时的定位精度最高。分析原因如下:插秧后 10 d 时,影响定位误差的主要原因是稻株茎基部未分蘖,部分穴稻株拥有苗数较少(1~3 株),穴内稻株的茎基部未能呈现成束的生长状态,由侧面对茎基部进行图像采集,图像中穴内稻株之间存在间隙,图像分割后,稻株茎基部中间存在黑色的背景区域,进行边缘拟合时,此类区域的边缘易被识别为稻株茎基部边缘,从而对边缘拟合造成干扰,影响定位误差;插秧后 20 d 时,影响定位误差的主要原因是目标行或相邻行稻株冠层长势较好,叶片被采集到图像中,叶片边缘被误识别为稻株茎基部边缘,影响定位误差。

2.2 冠层定位试验与分析

为分析本研究所提出的区间边缘拟合的稻株定

位方法,进行了传统的基于植株冠层的定位方法研究^[25]。垂直俯拍插秧后 10 d、15 d、20 d 时的稻株冠层图像,采集环境条件与上述保持一致,每种条件下均采集 50 幅,共 300 幅图像样本。进行图像分割后,在二值图像中部采用 Blob 算法对稻株冠层进行连通区域质心提取,提取结果即为该方法定位的稻株中心。稻株的标定中心采用在稻株中心插入一黑色标杆并计算该标杆圆心的方式得到。该方法的定位结果见表 3。

表 3 冠层定位结果

Tab.3 Positioning results of canopy

插秧后天数/d	定位误差/mm	
	有水	无水
10	8.2	9.0
15	11.3	10.7
20	15.4	16.1

由表 3 可知,在插秧后 10~20 d 内,随着稻株的生长,Blob 算法的定位误差不断增大,其原因是随着稻株的生长,稻株冠层形态更加复杂,生长到一定时期后,相邻稻株叶片接连,影响目标稻株的定位误差。

2.3 茎基部与冠层定位试验对比分析

为更好地对比分析本研究提出的基于稻株茎基部的定位方法与传统的基于稻株冠层的定位方法,定义除草适用期为:该方法在稻苗插秧后,分蘖盛期之前的除草期内,满足定位精度要求的时间段(定位误差小于 10 mm)。对比分析分区边缘拟合定位方法与冠层定位方法的定位误差发现,在插秧后 10~20 d 内,本文所述稻株定位方法的定位误差均低于 7.0 mm,而由冠层定位的方法定位误差均高于 8.0 mm,且 15 d 时其定位误差已超过 10 mm,由此可见由冠层定位稻株的方法定位误差较大,仅适用于插秧初期(10 d 内),除草适用期较短。而本文所述茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法,除草适用期较长,定位误差较小,可满足株间除草机械对稻株定位的精度要求。

3 结论

(1)构建了具有遮光功能的图像采集系统,该方法减少了自然光下,亮斑、倒影等因素对稻株定位精度的影响;提出了侧位俯拍的图像采集方式获取稻株茎基部图像并进行定位,探究了侧位俯拍时相机的相关安装参数设定。

(2)提出了基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法,该方法解决了因稻株茎基部边缘生长姿态不对称、边缘不平滑,无分区边缘拟合的定位方法存

在较大误差的问题。该方法综合运用 $2G-R-B$ 彩色图像灰度化、自动阈值、形态学操作等方法处理并分割稻株图像,在二值图像中划分稻株茎基部拟合区间,并在每个子区间内进行茎基部中点提取,根据中点拟合茎基部中线,以中线的中点作为定位的稻株茎基部中心,进而实现稻株的定位。

(3)进行了田间基于茎基部与冠层的稻株定位对比试验。试验结果表明:在插秧后 10~20 d 内,基于茎基部的定位误差均保持在 7.0 mm 以下,10 d、15 d、20 d 时的定位误差分别为 6.9 mm/6.8 mm、

5.9 mm/5.8 mm、6.3 mm/6.5 mm(有水条件/无水条件);基于冠层定位的误差分别为 8.2 mm/9.0 mm、11.3 mm/10.7 mm、15.4 mm/16.1 mm(有水条件/无水条件),均在 8.0 mm 以上,其中插秧 20 d 后,定位误差达到 15 mm 以上。试验结果表明:本研究所提出稻株定位方法的定位误差优于传统的基于冠层的定位方法,适用于水稻插秧后 10~20 d 的除草期,满足株间除草机械除草期内对稻株定位的精度要求。

参 考 文 献

- 1 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 CSAE, 2011, 27(6): 162-168. (in Chinese)
- 2 TILLET 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.
- 3 ASTRAND B, BAERVELDT A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1): 21-35.
- 4 翟志强,朱忠祥,杜岳峰,等. 基于 Census 变换的双目视觉作物行识别方法[J]. 农业工程学报,2016,32(11):205-213.
ZHAI Zhiqiang, ZHU Zhongxiang, DU Yuefeng, et al. Method for detecting crop rows based on binocular vision with Census transformation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 205-213. (in Chinese)
- 5 胡炼,罗锡文,曾山,等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的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 device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12-18. (in Chinese)
- 6 NAKARMI A D, TANG L. Automatic inter-plant spacing sensing at early growth stages using a 3D vision sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,82:23-31.
- 7 KURTULMUS F, KAVDIR I. Detecting corn tassels using computer vision and support vector machines[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(16):7390-7397.
- 8 CHOI K H, HAN S K, HAN S H, et al. Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,113:266-274.
- 9 车佳斯. 零件圆度与圆柱度的图像测量研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
CHE Jiasi. Research of the mechanical part roundness error and cylindricity error based on the image measurement technology[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 10 戚玮玮. 光照变化条件下中型组足球机器人目标识别与定位方法研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
QI Weiwei. Research on object recognition and localization for middle size league soccer robot under variant illumination[D]. Qingdao: Ocean University of China,2011. (in Chinese)
- 11 毛文华,张银桥,王辉,等. 杂草信息实时获取技术与设备研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(1):190-195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130136&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.036.
MAO Wenhua, ZHANG Yinqiao, WANG Hui, et al. Advance techniques and equipments for real-time weed detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):190-195. (in Chinese)
- 12 张勤,黄小刚,李彬. 基于彩色模型和近邻法聚类的水田秧苗列中心线检测方法[J]. 农业工程学报,2012,28(17):163-171,295-296.
ZHANG Qin, HUANG Xiaogang, LI Bin. Detection of rice seedlings rows' centerlines based on color model and nearest neighbor clustering algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 163-171,295-296. (in Chinese)
- 13 MIDTIBY H S, MATHIASSEN S K, ANDERSSON J, et al. Performance evaluation of a crop/weed discriminating microsprayer [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011,77(1):35-40.
- 14 张铮,王艳平,薛桂香. 数字图像处理与机器视觉 - VisualC++ 与 Matlab 实现[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- 15 陈娇,姜国权,杜尚丰,等. 基于垄线平行特征的视觉导航多垄线识别[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 107-113.
CHEN Jiao, JIANG Guoquan, DU Shangfeng, et al. Crop rows detection based on parallel characteristic of crop rows using visual navigation[J]. Transaction of the CSAE, 2009,25(12): 107-113. (in Chinese)

15 井關農機株式会社. 播種機用育苗箱自動供給装置:日本, 昭 60-199304[P]. 1985-10-08.

16 久保田鉄工株式会社. 育苗箱供給装置:日本, 昭 62-87008[P]. 1987-04-21.

17 鈴木鍛工株式会社. 播種装置の育苗箱供給装置:日本, 昭 61-58507[P]. 1986-03-25.

18 ヤンマー農機株式会社. 育苗箱供給装置:日本, 昭 61-166306[P]. 1986-07-28.

19 株式会社啓文社製作所. 育苗箱自動供給装置:日本, 昭 62-205708[P]. 1987-09-10.

20 邱德旺. 自動進料排箱機:中國台灣, 85214362[P]. 1996-09-17.

21 农业部南京农业机械化研究所. 自动供盘器:CN, 98227269. 3[P]. 1999-08-04.

22 冯帆. 2BDP-1000 型水稻育苗秧盘精量播种机的研制[J]. 农业工程, 2015, 5(2): 76-79.

FENG Fan. Research and design on 2BDP-1000 type rice seedling disc precision seeder[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(2): 76-79. (in Chinese)

23 应孔月, 李革, 王益君, 等. 一种多拨片秧盘供给机: CN, 204124837U[P]. 2015-01-28.

24 王永维, 曹林, 王俊, 等. 一种水稻育秧播种苗盘自动进给装置: CN, 202594408U[P]. 2012-12-12.

25 王清文, 王伟宏. 木塑复合材料与制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

26 马旭, 谭永妍, 齐龙, 等. 水稻秧盘育秧精密播种流水线软硬秧盘自动叠放装置[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 29-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160305&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.005.

MA Xu, TAN Yongxin, QI Long, et al. Automatic tray stacking device for hard and soft tray of rice precision seeding furnursing seedlings pipeline[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 29-36. (in Chinese)

27 姚武军. 多电机同步控制策略研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.

YAO Wujun. Study of multi-motor synchronous control strategy[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013. (in Chinese)

28 谭永妍. 气动式自动供盘与自动叠盘装置研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2015.

TAN Yongxin. Study on pneumatic type automatic tray feeder and automatic tray stacker[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

(上接第 31 页)

16 曹倩, 王库, 李寒. 基于机器视觉的旱田多目标直线检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 187-191.

CAO Qian, WANG Ku, LI Han. Detection algorithm for crop target multi-lines of the field image based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 187-191. (in Chinese)

17 项荣, 应义斌, 蒋焕煜. 田间环境下果蔬采摘快速识别与定位方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 208-223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131137&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.037.

XIANG Rong, YING Yibin, JIANG Huanyu. Development of real-time recognition and localization methods for fruits and vegetables in field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 208-223. (in Chinese)

18 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 CSAE, 2013, 29(14): 8-14. (in Chinese)

19 毛文华, 王辉, 赵博, 等. 基于株心颜色的玉米田间杂草识别方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 161-164.

MAO Wenhua, WANG Hui, ZHAO Bo, et al. Weed detection method based the centre color of corn seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 161-164. (in Chinese)

20 徐建华. 图像处理与分析[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

21 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415-419.

DUAN Ruiling, LI Qingxiang, LI Yuhe. Summary of image edge detection[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 415-419. (in Chinese)

22 高国琴, 李明. 基于 K-means 算法的温室移动机器人导航路径识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 25-33.

GAO Guoqin, LI Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K-means algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 25-33. (in Chinese)

23 吴露露, 马旭, 齐龙, 等. 改进 Hough 变换的农作-物病斑目标检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 152-159.

WU Lulu, MA Xu, QI Long, et al. A method of target detection for crop disease spots by improved Hough transform[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 152-159. (in Chinese)

24 侯学贵, 陈勇, 郭伟斌. 除草机器人田间机器视觉导航[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 106-108, 112.

HOU Xuegui, CHEN Yong, GUO Weibin. Machine vision-based navigation for a weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 106-108, 112. (in Chinese)

25 JIANG Yu, CUI Hongwei, QI Long, et al. Recognition and positioning method of rice seedlings based on machine vision[J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2016, 9(9): 265-278.