

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.06.006

水稻全田块无人收获作业自动打点系统设计与试验

崔冰波^{1,2} 杜卓文¹ 韩逸¹ 朱耀辉^{1,2} 魏新华^{1,2}

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 谷物收获机械无人化作业可有效解决收获季用工短缺问题, 全田块自动导航作业是无人收获机智能化的核心。为解决水稻无人收获作业自动打点问题, 基于边界线跟踪与地头区域检测实现水稻田块最外圈导航与剩余作业区域自动打点, 并提出一种目标区域先验形态辅助的动态感兴趣区域设定方法, 改善作物边界线提取可靠性。采用自控小车对所提方法进行验证, 试验结果表明, 当车辆作业速度为 0.8 m/s 时, 水稻未收获区域直线边界跟踪平均误差小于 5 cm, 单帧图像检测时间小于 50 ms。水稻边界自动打点试验结果表明, 所设计自动打点系统打点平均误差为 3.5 cm, 满足直角梯形水稻田块自动打点需求。

关键词: 水稻全田块自动导航; 无人收获作业; 自动打点; 作物边界提取

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)06-0060-08

OSID:



Design and Test of Automatic Dotting System for Whole-field Unmanned Rice Harvesting Operation

CUI Bingbo^{1,2} DU Zhuowen¹ HAN Yi¹ ZHU Yaohui^{1,2} WEI Xinhua^{1,2}

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Unmanned operation of grain harvesting machinery can address the issue of labour shortage effectively during the harvesting season. The whole-field automatic navigation is a significant indicator of intelligent unmanned harvester. To address the issue of automatic dotting for unmanned rice harvesting, the automatic navigation of the outermost circle of the rice field was realized based on cut boundary fitting and headland region detection. The trajectory of rice harvester was recorded by using Beidou real-time kinematic (RTK) while working in the outermost circle of the paddy field, which enabled automatic dotting for the remaining operation region (ROR). A dynamic region of interest was constructed by employing the priori morphology knowledge of the target area, which not only improved the robustness of cut boundary fitting but also reduced its computational complexity. Once the rice harvester entered the headland region, the uncut boundary in the front of the machinery was extracted and the intersection point between two uncut boundary lines was fixed. Finally, the position of the vertex corresponding to the ROR was calculated based on the antenna position and operating width. The proposed method was verified based on an automated trolley, and results indicated that the average straight line tracking error was 4.1 cm, and the maximum tracking error was 6.3 cm at speed of 0.8 m/s. The processing time for single image was less than 50 ms. The average error of automatic dotting was 3.5 cm, and it can realize automatic dotting of rice field of right-angled trapezoid. It can be concluded that the designed automatic dotting system satisfied the needing of whole-field unmanned operation of rice harvester.

Key words: rice whole-field automatic navigation; unmanned harvesting operations; automatic dotting; crop boundary extraction

收稿日期: 2024-03-22 修回日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271999)、江苏省重点研发计划项目(BE2021313)和江苏高校优势学科建设工程(四期)项目

作者简介: 崔冰波(1986—), 男, 副研究员, 主要从事农机导航及智能农业装备研究, E-mail: cuibingbo@ujs.edu.cn

0 引言

无人农场建设是智慧农业创新发展的核心,其中农业装备智能化是无人农场的装备支撑^[1-2]。谷物收获机械无人化作业涉及农田环境感知、自动导航以及作业控制等技术,其中自动导航是农业机械无人化作业的基础^[3]。为进一步提高水稻无人收获作业效率与适应性,研究水稻无人收获自动打点系统,对实现水稻收获机械全田块自主作业具有重要意义。

农机自动导航位置测量包括相对位置测量与绝对位置测量^[4],相对位置测量以机器视觉为代表,绝对位置测量多基于北斗实时动态定位(Real-time kinematic, RTK)及其多源组合导航^[5-7]。基于绝对位置的水稻无人化收获需要提前明确待收获区域边界,并根据收获机作业参数生成收获作业路径^[8-9]。视觉导航可以有效感知农田边界信息,并根据参考导航线和收获幅宽产生导航决策命令^[10-12]。魏新华等^[13]采用双目视觉提取待收获水稻高度并自适应调整实现满幅作业。关卓怀等^[14]基于图像灰度垂直投影动态设定视觉识别感兴趣区域,并采用多段三次 B 样条曲线拟合水稻待收获边界线。丁幼春等^[15]基于收获边界直线检测获得水稻未收获区域边界,采用预纠偏控制和前视点相对位置检测获取满幅收获作业状态。现有基于视觉检测的收获机导航多集中于作物行检测、路径跟踪预瞄控制等算法验证^[16-19],较少针对谷物全田块无人收获自动打点开展研究。

文献[20]提出一种视觉导航与 GNSS 组合的水稻除草机械自动导航方法,其田间导航采用作物行检测,地头转弯基于 GNSS 全局路径规划实现。受上述分场景导航方法启发,本文针对水稻无人收获作业需要人工打点的缺点,基于视觉检测实现田块最外圈自动导航作业,提出一种目标区域先验形态辅助的动态感兴趣区域(Region of interest, ROI)设定方法检测待收获水稻边界线,并结合地头区域检测、收获机作业幅宽和定位天线杆臂,设计水稻全田块无人收获作业自动打点系统。

1 试验材料

1.1 试验平台搭建

搭建如图 1 所示自控小车平台进行自动打点系统研究,试验平台包括相机、定位板卡、行驶控制器、电控底盘及其通讯、供电接口等系统附件。选用英特尔公司 RealSense D415 型相机,RGB 传感器 FOV 为 $69.1^\circ \times 42.5^\circ$,分辨率可达 1 920 像素 \times 1 080 像

素,实时图像处理与视觉导航决策软件基于 QT5 和 OpenCV 4.1 开发。北斗 RTK 定位板卡采用北斗星通 UM482 模块集成开发,其定位精度为 1 cm + 1 ppm (1 ppm 表示离基站每超过 1 km 定位误差增大 1 mm),试验过程中其更新频率为 5 Hz。为了避免碾压到仿真水稻并模拟收获机田间作业,将相机安装在自控小车一侧。车体后轮中心 O_v 为车体坐标系 $F^bO_vX_vY_vZ_v$ 原点,其坐标轴指向为前-右-下。相机高度 h_{cam} 为 1.783 m,相机轴线和水平面夹角 θ_{cam} 为 40° ,前后天线距离 d_1 为 0.785 m,相机与 X_v 轴距离 d_2 为 0.456 m,与 Y_v 轴距离 d_3 为 0.983 m,主天线距车体后轮中心高度 h_t 为 0.864 m。

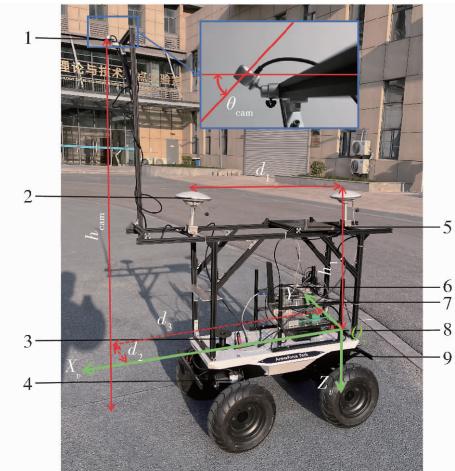


图 1 自动打点验证平台

Fig. 1 Setup for automatic dotting verification

- 1. 相机
- 2. 天线
- 3. 转向电机
- 4. 编码器
- 5. 触摸屏
- 6. STM32 单片机
- 7. 定位板卡
- 8. 工控机
- 9. CAN 总线

基于视觉和 RTK-GNSS 两套导航系统的冗余设计,便于验证收获作业分场景自动导航可行性。上位机视觉导航系统获取当前导航基准线及导航偏差,将导航偏差发送至 STM32 单片机,单片机根据导航偏差计算期望转角,并通过 CAN 总线将控制信息发送至电机驱动器,实时接收编码器输出前轮转角,构造行驶控制闭环系统,电机驱动器将控制信息转换为电压并以频率 100 Hz 控制转向电机。当相机检测到农机位于地头区域待打点位置时停止行进,并结合收获机作业幅宽和天线安装位置计算打点位置信息,记录待收获区域 4 个田块边界点后完成自动打点过程。

1.2 相机标定及坐标转换

相机标定可以获取相机畸变系数和相机内外参数^[21],本文使用方格数为 11×8 、方格边长为 20 mm 的黑白棋盘格作为标定板。选取 Matlab 的 Camera Calibrator 工具箱作为相机标定工具,得到其内参数 K_{in} 和畸变系数 E_d 为

$$\mathbf{K}_{in} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 633.1 & 0 & 336.1 \\ 0 & 633.4 & 248.4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_d = [k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3] = [0.17 \ -0.22 \ 0.01 \ 0.01 \ -0.06] \quad (2)$$

式中 f_x, f_y —— x 轴和 y 轴归一化焦距

u_0, v_0 ——主点坐标 p_1, p_2 ——切向畸变
 k_1, k_2, k_3 ——径向畸变

为明确自控小车控制参考点坐标与世界坐标系 F^w 转换关系, 需将图像检测特征点由像素坐标系 F^p 转换至世界坐标系 F^w , 建立像素点与行驶控制参数对应关系。如图 2 所示, 设 O_w 为世界坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 原点, O_c 为相机坐标系 $F^c O_c X_c Y_c Z_c$ 原点, O_i 为图像坐标系 $O_i X_i Y_i$ 原点, O_p 为像素坐标系 $O_p uv$ 原点; F^w 原点 O_w 为 F^c 原点 O_c 向下投影, X_w 方向与 X_c 一致。其中, 点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为 F^p 下点 $p(x, y)$ 在 F^w 下的对应点。

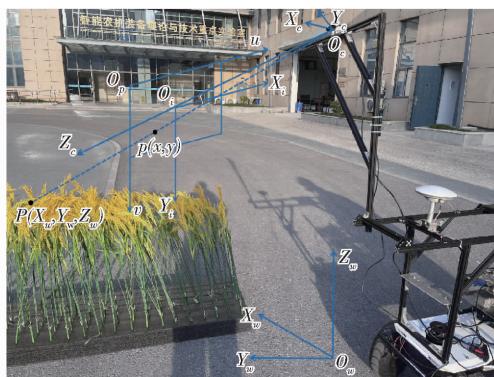


图 2 坐标系转换

Fig. 2 Coordinate system transformation

则像素坐标系 F^p 至世界坐标系 F^w 的转换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{cam} & \sin\theta_{cam} \\ 0 & -\sin\theta_{cam} & \cos\theta_{cam} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 \\ -h_{cam} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 Z_c ——像素点深度

\mathbf{R} ——旋转矩阵 \mathbf{T} ——平移向量

θ_{cam} ——相机轴线与水平面夹角

h_{cam} ——相机距地面高度

2 待收获区域边界拟合

待收获区域边界拟合流程如图 3 所示, 其中图像预处理主要消除光照条件对目标区域检测的影响, 前 1 帧边界线斜率可以为后 1 帧提供 ROI 旋转角。采用垂直投影法获取 ROI 中心点位置, 根据旋转角度初始化 ROI, 筛选位于 ROI 的最大连通区域边缘点, 采用最小二乘法拟合边界线, 计算边界线斜率与期望转角。最后判断是否位于地头区域指定位置, 拟合地头待收获区域作物边界线。

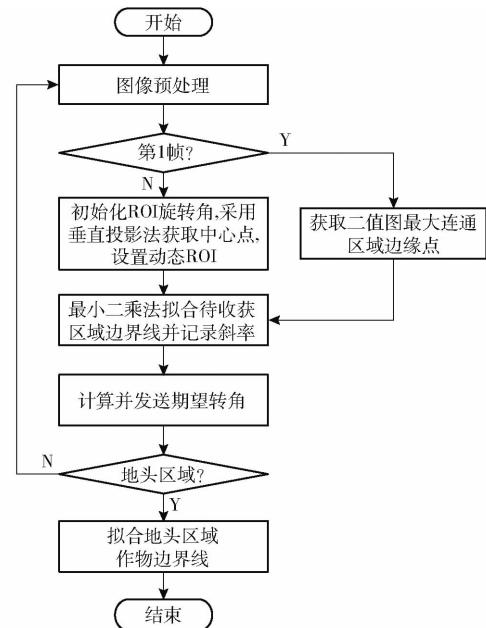


图 3 边界拟合流程图

Fig. 3 Flowchart of boundary fitting

2.1 图像预处理

RGB 颜色模型是农业感知领域常用颜色模型, 户外环境下图像归一化处理可以降低光照影响^[22], 其计算式为

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R + G + B} \\ b = \frac{B}{R + G + B} \\ g = \frac{G}{R + G + B} \end{cases} \quad (6)$$

式中 r, g, b ——归一化后红色通道、绿色通道、蓝色通道像素数

R, G, B ——像素点红色通道、绿色通道、蓝色通道像素数

水稻全田块最外圈待收获区域存在突出水稻穗及茎秆可能会影响边界线提取, 采用高斯滤波降低图像细节, 减少噪声干扰。二维高斯核 $G(i, j)$ 可以表示为

$$G(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中 σ —高斯核标准差

σ 越小平滑效果越不明显, σ 越大图像细节越不明显。原像素灰度值 $I(x, y)$ 经高斯滤波输出像素灰度值 $J(x, y)$ 表示为

$$J(x, y) = \frac{1}{\sum_i \sum_j G(i, j)} \cdot \sum_i \sum_j I\left(x + i - \left\lfloor \frac{s}{2} \right\rfloor, y + j - \left\lfloor \frac{s}{2} \right\rfloor\right) G(i, j) \quad (8)$$

式中 s —高斯核尺寸

高斯核参数根据图像处理效果调节, 通过试验测试取 $\sigma = 0.8, s = 5$ 。

在水稻待收获区域内 R 分量较高, 在收获边界处 3 通道平均值均出现下降, 最终 R 分量和 G 分量相等, B 分量最低, 故对 R 分量进行处理可以合理分割出收获边界。对高斯滤波处理后图像采用不同灰度化算法处理, 包括 R 分量、 G 分量、 $2G-R-B$ 分量和 $2R-G-B$ 分量。由图 4 可知, 田块区域中水稻谷穗呈黄色, 叶片和茎秆为绿色, 地头区域环境包括绿色杂草, 灰色水泥路等, 颜色特征区分明显。图像经 $2R-G-B$ 运算后可以明显区分田块区域和地头区域, 且能突出收获边界, 适用于水稻待收获区域边界拟合。

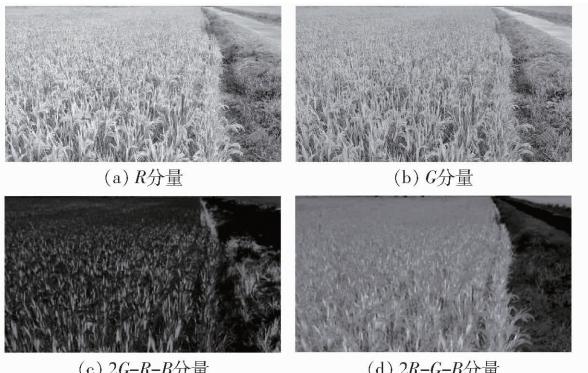


图 4 颜色空间分量灰度图

Fig. 4 Grayscale images of color space components

为降低杂草、内部土壤、边缘突出稻穗对图 4 后续图像分割的噪声干扰, 采用双边滤波去噪, 保留待收获区域边界。原图像像素灰度值 $I(x, y)$ 经双边滤波输出像素灰度值 $Q(x, y)$, 计算式为

$$Q(x, y) = \frac{1}{W(x, y)} \sum_i \sum_j I(i, j) \cdot G_s(\| (x, y) - (i, j) \|) G_r(|I(x, y) - I(i, j)|) \quad (9)$$

式中 $W(x, y)$ —归一化因子

$G_s(\| (x, y) - (i, j) \|)$ —空间权重函数

$G_r(|I(x, y) - I(i, j)|)$ —像素权重函数

其中这两个权重函数具体形式表现为式(7), 分别将标准差 σ 替代为空间域核函数标准差 σ_s 和像素值域核函数标准差 σ_r , 本文取 $\sigma_s = 50, \sigma_r = 10$, 双边滤波后的灰度图如图 5a 所示。为消除杂草和农田边界噪声干扰, 采用大津法处理滤波后的灰度图^[23]。如图 5b 所示, 直接二值化处理图像会产生噪声, 采用形态学方法先对二值图像进行闭运算, 填充待收获区域孔洞, 如图 5c 所示, 再进行开运算消除地头区域噪声点, 得到可以进行边界拟合的二值化图像, 如图 5d 所示。

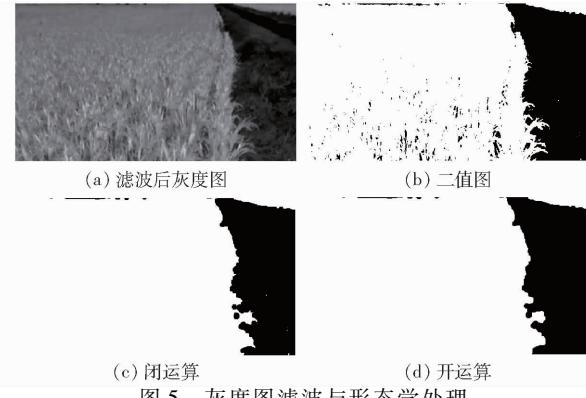


Fig. 5 Grayscale image denoising and morphologically process

2.2 动态感兴趣区域设定

利用 OpenCV 库中 findContours 函数检测二值图内最大连通区域, 即待收获区域, 记录最大连通区域边缘点作为待收获区域边界点。在边界线识别过程中, 图像处理运算量过大增加计算时间, 影响系统工作实时性。ROI 从图像显示窗口中选择一个关键部分进行处理, 减少数据处理量并提高系统处理速度。待收获区域在图像中的位置具有不确定性, 若 ROI 无法覆盖作物边界, 必然导致关键点失拟, ROI 区域过大又增加计算量。线性最小二乘法计算复杂度低、速度快, 但容易被噪点干扰^[24-25]。基于目标区域形态和垂直投影法的动态 ROI 设定算法, 采用线性最小二乘法拟合边界点既减小计算量, 又实现边界点精准拟合。其具体过程如下:

(1) 判断当前帧是否为第 1 帧, 若为第 1 帧获取二值图最大连通区域所有边缘点, 最小二乘法拟合直线并获取当前直线斜率, 若非第 1 帧进入下一步。

(2) 读取前一帧斜率, 通过 arctan 函数计算前一帧直线相对于横轴的角度作为目标 ROI 旋转角。

(3) 基于垂直投影法从右向左遍历二值图所有列, 统计每列像素值为 255 的像素点, 获取初次到达最大值的列序号, 作为目标 ROI 中心点横坐标, 纵坐标设为 500 像素, 读取前一帧斜率转换为旋转角,

构建长为 300 像素、宽为 100 像素的 ROI 旋转相应旋转角。

(4) 记录所有位于 ROI 的最大连通区域边缘点,记 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 为待拟合边界点集,定义目标线性模型

$$f(x) = kx + b \quad (10)$$

式中 k —斜率 b —截距

构建代价函数

$$J(k, b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 \quad (11)$$

$J(k, b)$ 分别对 k 和 b 求偏导可得

$$\begin{cases} \frac{\partial J(k, b)}{\partial k} = -2 \sum_{i=1}^n x_i [y_i - (kx_i + b)] \\ \frac{\partial J(k, b)}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)] \end{cases} \quad (12)$$

令上述 $\frac{\partial J(k, b)}{\partial k} = 0, \frac{\partial J(k, b)}{\partial b} = 0$, 解得 k 和 b ,

使代价函数 $J(k, b)$ 最小,记录此时斜率 k 。

(5) 构建导航基准线 $y = kx + b$,计算横向偏差 d_l ,即直线与像素平面底部交点和像素平面底部中点距离,补偿横向偏差需计算补偿角 θ_d ,计算式为

$$\theta_d = \arctan \frac{d_l}{a} \quad (13)$$

式中 a —横向偏差补偿角常数因子

导航基准线与像素平面中心线夹角为航向偏差 θ_c ,期望转角 θ_e 计算式为

$$\theta_e = \theta_d + \theta_c \quad (14)$$

将 θ_e 发送至行驶控制器并综合转角传感器反馈角度即实现视觉导航路径跟踪闭环控制。

2.3 地头区域自动打点

为实现地头区域边界拟合,采用二值图水平投影统计判定收获机前方和右侧待收获区域边界。首先,通过检测二值图上部 1/10 处待收获区域像素值,若均为 0,则确定收获机到达地头区域。其次,对二值图像素进行水平投影,如图 6a 所示,由上到下统计各行像素值为 255 的像素点数,假设第 i 行像素点数大于二分之一图像宽度,则此行为地头边界位置。最后,以第 i 行中心点作为 ROI 中心点,构建长为 1280 像素,宽为 100 像素的 ROI,筛选区域内边缘点并采用最小二乘法拟合待收获区域地头边界线,计算像素平面底部中点 Q 到地头边界线的垂线并交于点 C ,处理结果如图 6b 所示,采用式(3)将点 Q 和点 C 转换至 F^w ,计算收获机到地头距离。如图 7 所示,设地头边界线与待收获区域边界交点 M 为待打点位置,点 S 为停车点,点 F 为首次检测到地头边界线的位置,其对应到地头距离 d_{qc} 可在线

计算,当 d_{qc} 小于预设距离 l 时,收获机停车打点。

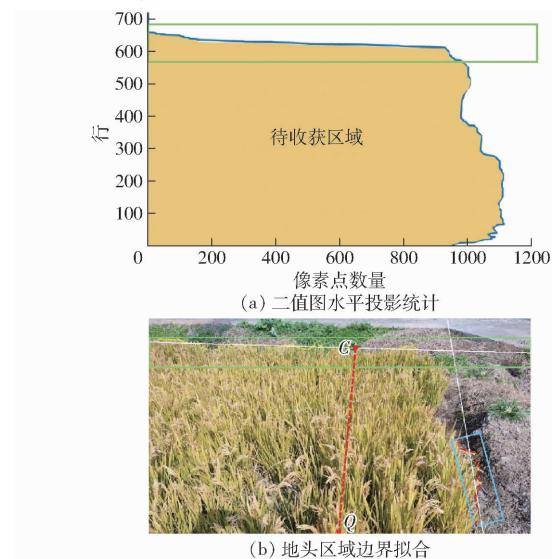


图 6 待收获区域边界拟合

Fig. 6 Boundary fitting of unharvested region

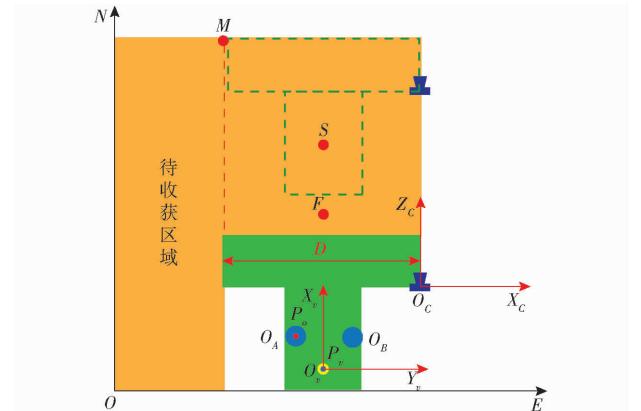


图 7 收获机自动打点作业

Fig. 7 Automatic dotting operation of combine harvester

设点 O_A 为定位主天线位置,点 O_B 为定向天线位置,设 P_v 为车体坐标系原点在导航系(高斯平面坐标系)下的位置, P_v 为主天线相位中心观测量,车辆坐标系下主天线至车体坐标系原点 O_v 的杆臂向量为 $L_{OAO_v}(l_{x1}, l_{y1}, 0)$,其中 l_{x1}, l_{y1} 分别为主天线至车体坐标系 Y_v 轴、 X_v 轴的距离,则有

$$P_v = P_o + T_n^{bT} L_{OAO_v} \quad (15)$$

其中

$$T_n^b = R_x(\phi) R_y(\theta) R_z(\psi) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中 T_n^b —姿态矩阵

ϕ —航向角

θ —俯仰角

ψ —横滚角

其中收获机田间导航作业主要为横向路径跟踪控

制,姿态对定位天线在车辆运动纵向上投影可忽略,即利用式(15)进行坐标转换时,可设 $\theta \approx 0^\circ$ 。类似地,根据收获机幅宽 D 和后轮轴心位置 P_v 可计算得到点 M 位置,设停车处,点 M 至车体坐标系原点 O_v 的杆臂向量为 $L_{MO_v}(l_{x2}, l_{y2}, 0)$,其中 l_{x2} 为割台至收获机后轮轴心距离, $l_{y2} = -D/2$,则点 M 位置 P_M 为

$$P_M = P_v + T_n^{bT} L_{MO_v} \quad (17)$$

3 场地试验

3.1 边界识别与跟踪

为了验证自动打点系统性能,进行直线和曲线跟踪模拟试验,试验时间为2024年1月26日。如图8a所示,采用上海华测导航公司打点器记录待收获区域边界位置作为打点参考值,其定位精度为2 cm + 1 ppm。试验结果表明,单帧图像处理时间小于50 ms,试验过程中相机实时帧率设为20 f/s,自控小车以平均速度0.8 m/s行驶,基于视觉提取边界线特征并采用式(14)计算导航偏差,实时控制自动小车跟踪水稻边界,路径跟踪过程采用RTK记录行驶轨迹作为实际路径点。根据打点器记录的边界线顶点构造边界线方程,基于实际路径点在高斯平面坐标系下计算其到边界线距离作为横向跟踪误差。

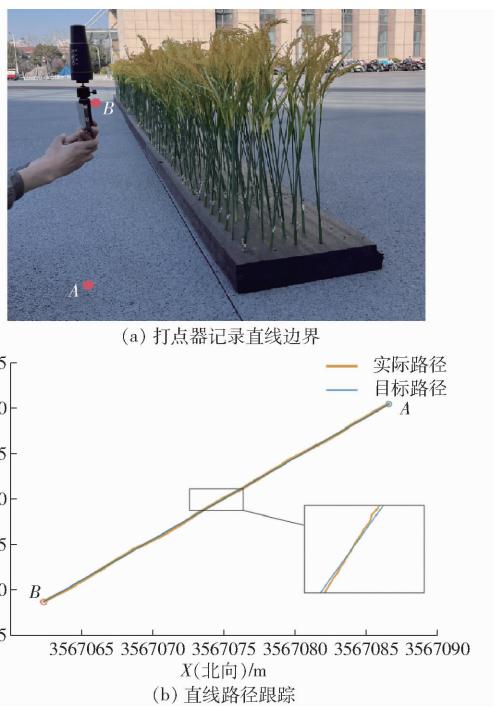


图8 打点器定线及直线路径跟踪

Fig. 8 Dotter-based straight line generation and path tracking

由于试验测试时非水稻收获季节,采用仿真植物模拟水稻待收获区域,直线路段长度为40 m,曲

线路段长度为10 m。自控小车直线路段跟踪轨迹如图8b所示,视觉导航能较好地跟踪直线行驶。设置图9a所示曲线路径模拟水稻不规则边界工况,其中线段BC和ED长度为0.5 m,线段CD长度为4 m。路径跟踪轨迹如图9b所示,可以发现视觉导航系统能稳定跟踪变化的边界线。跟踪误差如图10和表1所示,其中直线路段跟踪平均误差为4.1 cm,标准差为3 cm,最大跟踪误差为6.3 cm;曲线路段跟踪平均误差为9.9 cm,标准差为6.1 cm,最大误差为30.1 cm。曲线路段跟踪过程中最大跟踪误差产生在转弯处,其原因包括视觉感知滞后和自控小车最大转向角约束,导致其收敛过程较慢。CD段平均误差较大可能原因为路径长度较短、自控小车转向控制增益较小导致,其最大跟踪误差小于15 cm,满足现阶段最外圈自动导航收获与自动打点需求。真实成熟水稻待收获区域边界图像分割时,稻穗排列密集、二值化后孔洞较少,较仿真水稻边界更易处理,因此视觉特征线提取受仿真水稻差异性影响较小。而实际作业环境中的灰尘、风和光照阴影等,仍会对边界线提取效果产生影响,后续将引入多源组合导航改善边界线识别可靠性。

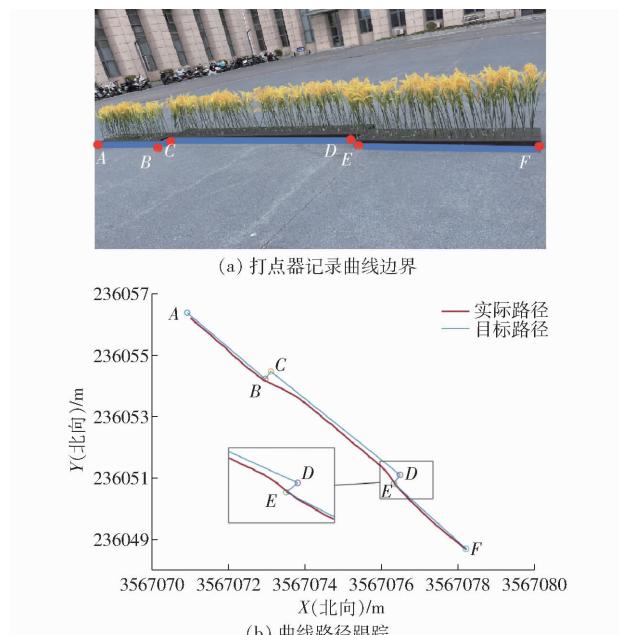


图9 曲线边界模拟及曲线路段跟踪

Fig. 9 Curve boundary simulation and curve path tracking

3.2 自动打点验证

为验证自动打点可行性,搭建L形路径检验打点效果,线段AB长为21 m,线段BC长为8 m。采用打点器记录点B位置作为真实值,自控小车自动打点试验过程中采用RTK记录行驶轨迹,当自控小车到达地头指定停车区域时,停车记录自控小车位置并利用式(17)计算点B位置,自动打点跟踪轨

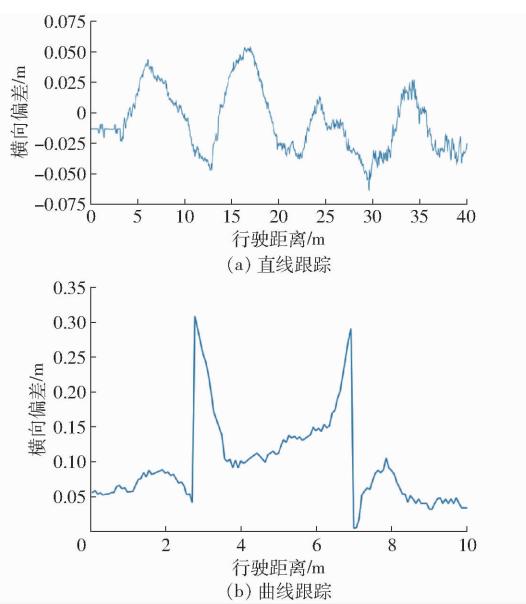


图 10 直线及曲线路径跟踪

Fig. 10 Result of straight and curve path tracking

表 1 收获边界路径跟踪结果

Tab. 1 Results on cut boundary tracking cm

轨迹类型	平均误差	标准差	最大误差
直线路径	4.1	3.0	6.3
曲线路径	9.9	6.1	30.1

迹如图 11 所示。受自控小车最大转向角约束限制, 其在自动转弯处出现较大误差, 但此时点 B 位置已经更新。在继续跟踪边界并打下一点时, 视觉导航跟踪误差逐渐减小并收敛至待作业区域边界处, 因此转弯处误差不会影响打点效果。

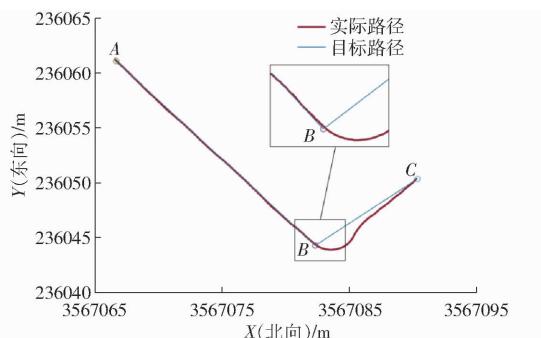


图 11 自动打点路径跟踪

Fig. 11 Result of automatic dotting path tracking

定义误差 d_e 为打点器记录点 $X_d(x_1, y_1)$ 与自动打点记录点 $X_a(x_2, y_2)$ 间距离, 即

$$d_e = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (18)$$

采用打点器重复记录点 B 坐标 5 次, 取其平均值作为点 B 坐标真值, 自动打点试验结果如图 12 所示。 $B_1 \sim B_5$ 为 5 次自动打点试验记录的点 B 位置, 打点平均误差为 3.5 cm, 标准差 σ 为 1.5 cm, 以点 B 真值为圆心, 分别构建半径为 σ 红色虚线圆和半径为 3σ 蓝色圆, 可以发现 5 次试验结果均落在 3σ 范

围内。上述误差产生原因包括未考虑车辆横滚角对定位校正影响以及预设距离 l 影响停车打点准确性。

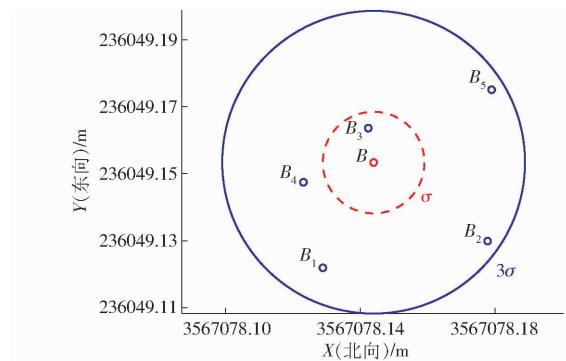


图 12 自动打点结果

Fig. 12 Result of automatic dotting

为了验证不规则地块自动打点适应性, 采用仿真水稻构建直角梯形田块边界, 其中线段 AB 长 18.1 m, 线段 BC 长 9.7 m, 线段 CD 长 16.7 m, 线段 DA 长 18.8 m, AD 与 BC 边平行。边界线视觉跟踪过程采用 RTK 记录自控小车轨迹, 在地块顶点处记录打点位置, 由于仿真田块尺寸较小不考虑转弯处路径跟踪误差。不规则地块自动打点效果如图 13 所示, 可以发现自动打点系统适用于直角梯形田块自动打点, 其打点效果仅受视觉跟踪收敛速度和水稻未收割区域边界长度影响。

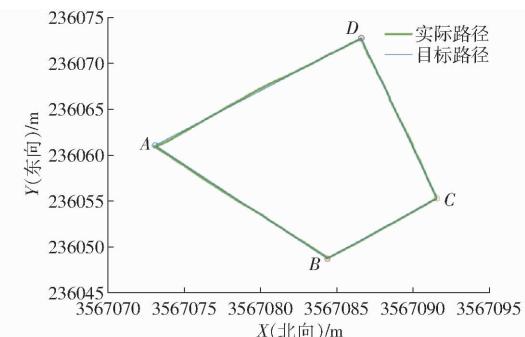


图 13 不规则田块自动打点效果

Fig. 13 Result of irregular field automatic dotting

4 结论

(1) 针对水稻最外圈待收获区域边界精确拟合需求, 提出一种基于目标区域形态和垂直投影法的动态 ROI 设定算法, 减少边缘点筛选计算量并改善边界线拟合准确性。

(2) 采用视觉导航与北斗 RTK 组合设计待收获区域的自动打点系统, 并基于自控小车对水稻最外圈收获路径跟踪与自动打点进行验证。试验结果表明, 直线跟踪及曲线跟踪效果均可满足水稻边界自动导航作业要求。自动打点平均误差为 3.5 cm, 且能够实现直角梯形田块自动打点, 满足典型水稻田

块无人化作业需求。

(3)验证了采用分场景组合导航实现水稻无人

收获作业可行性,为后续水稻全田块无人收获作业

提供了技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J].华南农业大学学报,2021,42(6):8-17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6):8 - 17. (in Chinese)
- [2] 刘婉茹,张国忠,周勇,等.智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究与发展趋势[J].华中农业大学学报,2022,41(1):105-122.
LIU Wanru, ZHANG Guozhong, ZHOU Yong, et al. Application and development of intelligent technology in full mechanization of rice production[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1):105 - 122. (in Chinese)
- [3] 张漫,季宇寒,李世超,等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报,2020,51(4):1-18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):1 - 18. (in Chinese)
- [4] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动导航技术研究进展[J].农业工程学报,2015,31(10):1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):1 - 10. (in Chinese)
- [5] OKSANEN T, BACKMAN J. Guidance system for agricultural tractor with four wheel steering[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(4):124-129.
- [6] 张智刚,王桂民,罗锡文,等.拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法[J].农业机械学报,2019,50(3):352-357.
ZHANG Zhigang, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Detection method of steering wheel angle for tractor automatic driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):352 - 357. (in Chinese)
- [7] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等.基于CAN总线的拖拉机导航控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):35-42.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):35 - 42. (in Chinese)
- [8] 崔冰波,魏新华,吴抒航,等.基于动态路径搜索的农机自动驾驶软件系统研制[J].农机化研究,2022,44(10):228-232.
CUI Bingbo, WEI Xinhua, WU Shuhang, et al. Development of agricultural machinery self-driving software system based on dynamic path search[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10):228 - 232. (in Chinese)
- [9] 崔冰波,孙宇,吉峰,等.基于模糊Stanley模型的农机全田块路径跟踪算法研究[J].农业机械学报,2022,53(12):43-48.
CUI Bingbo, SUN Yu, JI Feng, et al. Study on whole field path tracking of agricultural machinery based on fuzzy Stanley model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12):43 - 48. (in Chinese)
- [10] 王天海,陈斌,张振倩,等.机器视觉在农业机器人导航中的应用[J].农业机械学报,2022,53(12):43-48.
WANG Tianhai, CHEN Bin, ZHANG Zhenqian, et al. Applications of machine vision in agricultural robot navigation: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198:107085.
- [11] 王侨,刘卉,杨鹏树,等.基于机器视觉的农田地头边界线检测方法[J].农业机械学报,2020,51(5):18-27.
WANG Qiao, LIU Hui, YANG Pengshu, et al. Detection method of headland boundary line based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):18 - 27. (in Chinese)
- [12] 洪梓嘉,李彦明,林洪振,等.基于双目视觉的种植前期农田边界距离检测方法[J].农业机械学报,2022,53(5):27-33.
HONG Zijia, LI Yanming, LIN Hongzhen, et al. Field boundary distance detection method in early stage of planting based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5):27 - 33. (in Chinese)
- [13] 魏新华,张敏,刘青山,等.基于双目视觉的田间作物高度和收割边界信息提取[J].农业机械学报,2022,53(3):225-233.
WEI Xinhua, ZHANG Min, LIU Qingshan, et al. Extraction of crop height and cut-edge information based on binocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):225 - 233. (in Chinese)
- [14] 关卓怀,陈科尹,丁幼春,等.水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J].农业机械学报,2020,51(1):19-28.
GUAN Zhuohuai, CHEN Keyin, DING Youchun, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):19 - 28. (in Chinese)
- [15] 丁幼春,王绪坪,彭靖叶,等.轮式谷物联合收获机视觉导航系统设计与试验[J].智慧农业,2020,2(4):89-102.
DING Youchun, WANG Xuping, PENG Jingye, et al. Visual navigation system for wheel-type grain combine harvester[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4):89 - 102. (in Chinese)
- [16] 贺静,何杰,罗锡文,等.基于多传感器融合的水稻行识别与跟踪导航研究[J].农业机械学报,2022,53(3):18-26.
HE Jing, HE Jie, LUO Xiwen, et al. Rice row identification and navigation control based on multi-sensor fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):18 - 26. (in Chinese)

- 2021, 42(6): 579–590.
- [17] WU Xiaojing, ZHENG Wenyan, WU Xueli, et al. Adaptive finite-time control for quadrotor UAV with time-varying load based on disturbance observer[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2021, 42(6): 579–590. (in Chinese)
- [18] ALEXIS K, PAPACHRISTOS C, NIKOLAKOPOULOS G, et al. Model predictive quadrotor indoor position control[C]// Control & Automation IEEE, 2011.
- [19] HERBERT S, WU J. Deep learning for robust control of UAVs subject to wind gusts[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(1): 33–45.
- [20] 钟元, 章豪. 一种基于串级线性自抗扰控制的四旋翼无人机控制方法[J]. 航空电子技术, 2020, 51(1): 28–34.
- ZHONG Yuan, ZHANG Hao. A control method for quadrotor based on cascade linear active disturbances rejection controller [J]. Avionics Technology, 2020, 51(1): 28–34. (in Chinese)
- [21] 焦环宇, 王春阳, 赵锦楠. 四旋翼无人机串级自抗扰控制及参数优化方法[J]. 理论与方法, 2021, 40(11): 35–40.
- JIAO Huanyu, WANG Chunyang, ZHAO Jinnan. Cascade active disturbance rejection control and parameter optimization method for quadrotor UAV[J]. Theory & Method, 2021, 40(11): 35–40. (in Chinese)
- [22] 张婷. 基于 ADRC 的四旋翼飞行控制器设计[D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- ZHANG Ting. Design of quadcopter flight controller based on ADRC[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
- [23] KLAUSEN K, FOSSEN T I, JOHANSEN T A. Nonlinear control with swing damping of a multirotor UAV with suspended load [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 88: 379–394.
- [24] 王宇航. 基于 ADRC 的直接侧向力/气动力复合控制系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- WANG Yuhang. Design of lateral thrust and aerodynamics blended control system based on auto disturbance rejection controller [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [25] 韩京清, 黄远灿. 二阶跟踪-微分器的频率特性[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(3): 71–74.
- HAN Jingqing, HUANG Yuancan. Frequency characteristic of second-order tracking-differentiator [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2003, 33(3): 71–74. (in Chinese)
- [26] 韩京清. 非线性跟踪微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177–183.
- HAN Jingqing. Nonlinear tracking-differentiator[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1994, 14(2): 177–183. (in Chinese)

(上接第 67 页)

- [17] 赵腾, 野口伸, 杨亮亮, 等. 基于视觉识别的小麦收获作业线快速获取方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 32–37.
- ZHAO Teng, NOGUCHI Nobu, YANG Liangliang, et al. Fast edge detection method for wheat field based on visual recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 32–37. (in Chinese)
- [18] 赖汉荣, 张亚伟, 张宾, 等. 玉米除草机器人视觉导航系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 18–27.
- LAI Hanrong, ZHANG Yawei, ZHANG Bin, et al. Design and experiment of the visual navigation system for a maize weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 18–27. (in Chinese)
- [19] MA Zenghong, YIN Cheng, DU Xiaoqiang, et al. Rice row tracking control of crawler tractor based on the satellite and visual integrated navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106935.
- [20] KANAGASINGHAM S, EKPANYAPONG M, CHAIHAN R. Integrating machine vision-based row guidance with GPS and compass-based routing to achieve autonomous navigation for a rice field weeding robot[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(4): 831–855.
- [21] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [22] ZHANG Xiya, LI Xiaonan, ZHANG Baohua, et al. Automated robust crop-row detection in maize fields based on position clustering algorithm and shortest path method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 165–175.
- [23] 王桥, 孟志军, 付卫强, 等. 基于机器视觉的玉米苗期多条作物行线检测算法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 208–220.
- WANG Qiao, MENG Zhijun, FU Weiqiang, et al. Detection algorithm of multiple crop row lines based on machine vision in maize seedling stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 208–220. (in Chinese)
- [24] MA Yue, ZHANG Wenqiang, QURESHI W S, et al. Autonomous navigation for a wolfberry picking robot using visual cues and fuzzy control[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(1): 15–26.
- [25] 彭顺正, 坎杂, 李景彬. 矮化密植枣园收获作业视觉导航路径提取[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 45–52.
- PENG Shunzheng, KAN Za, LI Jingbin. Extraction of visual navigation directrix for harvesting operation in short-stalked and close-planting jujube orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 45–52. (in Chinese)