doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.005

基于 RANSAC 算法的植保机器人导航路径检测

李秀智[1]　彭小彬[1]　方会敏[2]　牛萌萌[2]　康建明[2]　荐世春[2]
(1.北京工业大学信息学部,北京 100124;2.山东省农业机械科学研究院,济南 250100)

摘要:为实现植保机器人精准自主导航和提高路径检测的精度、可靠性,提出一种基于 RANSAC 算法的视觉导航路径检测方法。首先,采用超绿灰度化法和最大类间方差法进行图像分割;继而结合形态学操作与动态面积阈值滤波算法滤除干扰;最后,在垄行的边缘中,根据均值法提取特征点,采用 RANSAC 算法剔除离群点后由最小二乘法进行直线拟合,以提高导航路径的检测精度。实验表明,与 Hough 变换相比,本文垄行中心线检测方法具有更高的检测精度,导航路径的检测率可达 93.8%,比未使用 RANSAC 算法提高了 18.8 个百分点。

关键词:植保机器人;导航;垄行检测;图像处理;特征点提取;RANSAC 算法
中图分类号:TP391.4;S49　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0040-07　　**OSID**:

Navigation Path Detection of Plant Protection Robot Based on RANSAC Algorithm

LI Xiuzhi[1]　PENG Xiaobin[1]　FANG Huimin[2]　NIU Mengmeng[2]　KANG Jianming[2]　JIAN Shichun[2]
(1. *Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*
2. *Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: Reliable and accurate visual detection of crop rows is prerequisite for implementing successful autonomous navigation for plant protection robots. A visual navigation path detection approach based on random sample consensus (RANSAC) algorithm was proposed. Firstly, the excess green (ExG) method and the maximum variance between classes were used to figure out gross target regions. Secondly, morphological operations and dynamic area threshold filtering strategy were employed to filter out the interferences. As outlier points significantly influenced the estimation accuracy, RANSAC algorithm was proposed to purify the inlier point sets. Finally, crop rows line features were modelled by least mean square techniques, which offered a degree of robustness in constructing global co-linear features in contrast to Hough transformation. To sufficiently verify the effectiveness of the idea, wheat, peanut, corn and film covered potato seedling images were used for evaluation. As revealed by experimental results that the proposed method outperformed Hough transformation in the crop rows center line extraction, and RANSAC algorithm rendered the method more robust with respect to noise and outliers, which allowed the successful detection rate of the work to be improved by 18.8 percentage points and arrived at 93.8%. The overall framework made sense to reliable visual navigation for plant protection robots.

Key words: plant protection robot; navigation; crop rows detection; image processing; feature point extraction; RANSAC algorithm

0　引言

为适应智能农业的发展需求,具有自动导航功能的农业机器人成为近年研究的热点,在植保、采摘、种植等领域[1-3]具有广阔的应用前景。其中,植保机器人的自主导航方式有机器视觉导航[4]、激光导航[5]和 GPS 导航[6]等。相比于激光导航和 GPS 导航,机器视觉导航具有更丰富的细节信息、更精准的局部定位和高性价比等优点。导航路径的自动检测是实现植保机器人导航的前提[7-10]。

对于田间作业,作物垄行检测能够提供结构化的导航信息[11-13]。早期的植保机器人导航多采用

收稿日期:2020-05-14　修回日期:2020-06-19
基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020621、2019JZZY020623)、山东省重点研发计划项目(2019GNC106098)和国家重点研发计划项目(2018YFD0300606)
作者简介:李秀智(1979—),男,副教授,博士,主要从事智能机器人导航与机器视觉研究,E-mail:xiuzhi.lee@163.com

Hough 变换方法[14-15]，在杂草干扰和断垄的农田环境下，检测的正确率及效率难以满足实际需要。在提取特征点的基础上，最小二乘法也被广泛用于垄线检测[16-17]，其准确性对噪声特征点依然敏感。文献[18]将一幅图像分割成若干与原图等宽的子图像，采用垂直投影法获取垄行特征点，继而根据其坐标邻近进行聚类、拟合及检测，但该方法容易受到作物行断行干扰及定位点归类困难。文献[19]假设作物行间隔距离相等，采用滑动窗口的方法提取代表垄行的特征点，并通过移动距离对特征点进行聚类，该方法可以有效地去除杂草噪声的影响，但滑动窗口尺寸难以确定，且行间距相等的前提使其适用范围受限。随机采样一致性算法（Random sample consensus，RANSAC）在对数据排异和提高模型估计精度方面应用广泛[20-21]。

为了提高路径检测的精度和可靠性，本文提出一种基于 RANSAC 算法的植保机器人导航路径检测方法。在图像预处理后，对垄行区域进行划分和降噪，在垄行边缘图中提取特征点并进行聚类，基于估计残差最小的准则，结合 RANSAC 算法，以期得到更高的检测精度和更好的检测性能。

1　图像预处理

本文植保机器人的导航路径视觉检测方法流程框图如图 1 所示（图中 S_i 为轮廓面积，T_{area} 为面积阈值，y_i 为特征点纵坐标，H_{img} 为图像高度）。在植保机器人的工作环境中，需要对采集图像进行预处理，使作物垄行部分增强突出。

1.1　图像分割

实验统计结果表明，农作物 RGB 图像中 G 颜色分量占比明显大于 R 和 B 分量。根据这一特征在图像灰度化中增大 G 分量从而增大农作物与背景的可分离性。超绿色灰度化法（Excess green，ExG）[22]能有效抑制阴影、枯草和土壤，使农作物部分更为突出。其公式为

$$I=\begin{cases}0 & (2G-R-B<0)\\ 2G-R-B & (0\leqslant 2G-R-B\leqslant 255)\\ 255 & (2G-R-B>255)\end{cases} \quad (1)$$

式中　I——灰度图像的亮度

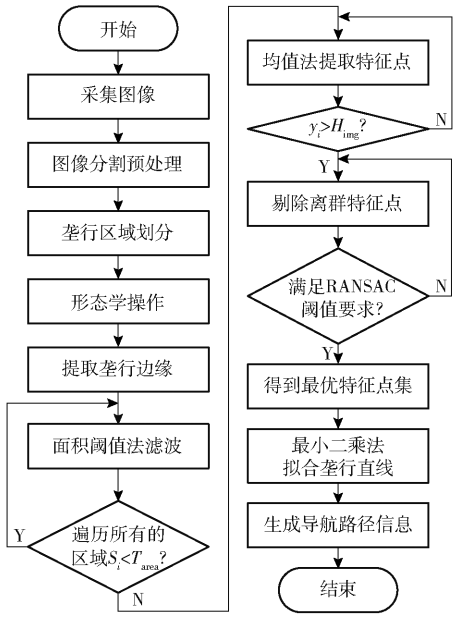


图 1　植保机器人导航路径检测流程图

Fig. 1　Flow chart of navigation path detection for plant protection robot

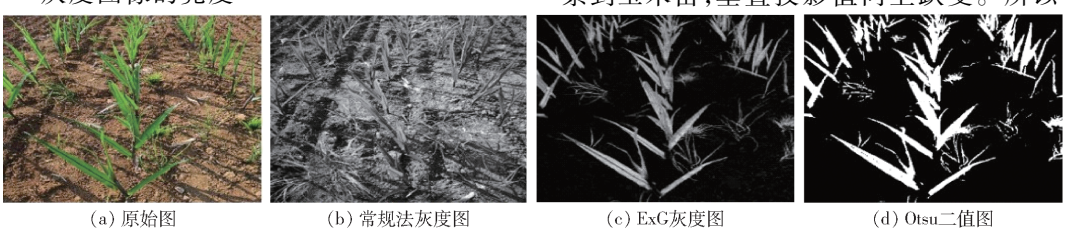
G、R、B——绿、红、蓝通道像素值

二值图直观表达了目标与背景区域的分割。灰度化后，采用最大类间方差法[23]（Otsu）自适应地生成阈值，对实时图像进行二值分割，图 2 为图像分割结果图。

1.2　垄行区域划分

在特征点提取前，首先需要对垄行进行区域划分。植保机器人上相机安装方向为倾斜向地面，如图 3 所示，其中 $O_wX_wY_wZ_w$ 为世界坐标系，相机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$ 为相对于世界坐标沿 Y_w 轴向上平移 H 个单位长度，并绕 X_w 轴顺时针旋转 Φ 而得到。Z_c 正方向为相机的光心方向，并指向地面，植保机器人行驶方向为 Z_w 正方向。根据小麦、玉米等作物近似平行直线的行种植特点，通过调整 Φ，使得采集到的垄行在图像中呈现平行分布，由垂直投影法可划分垄行区域。

图 4 为相机采集到的玉米苗图像经过二值化处理后对应的垂直投影曲线。从垂直投影曲线可以看出，玉米苗行所在的位置出现投影值变化的峰值，从玉米苗到土壤背景，垂直投影值向下跃变，从土壤背景到玉米苗，垂直投影值向上跃变。所以在垄行与



(a) 原始图　(b) 常规法灰度图　(c) ExG灰度图　(d) Otsu二值图

图 2　图像分割结果

Fig. 2　Image segmentation results

垄行之间,垂直投影曲线会呈现波谷状态,由此根据波谷可对作物垄行区域划分。

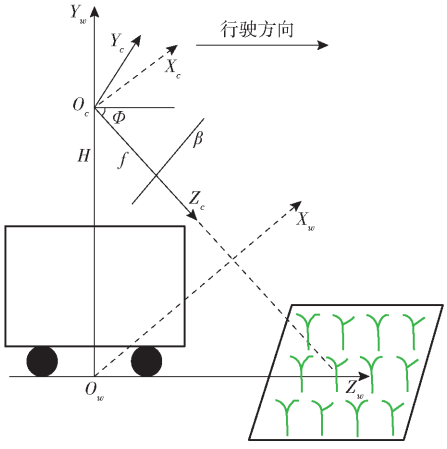


图 3 图像采集示意图

Fig. 3 Illustration of image acquisition

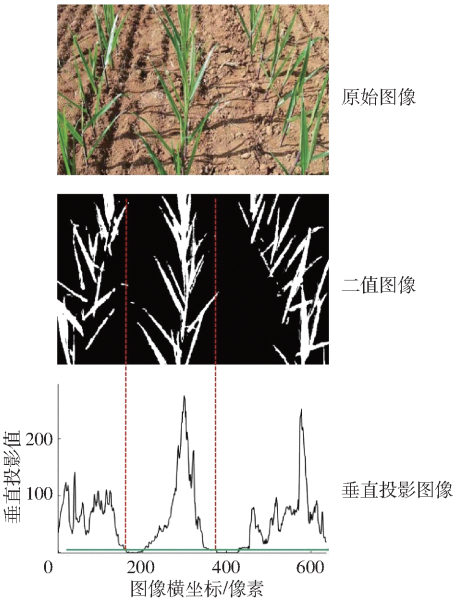


图 4 二值图垂直投影曲线

Fig. 4 Vertical projection curves of binary image

1.3 图像降噪处理

通过二值化分割后,图像中存在许多噪声区域,形态学运算可消除噪声对垄行检测的影响,增强同一垄行区域的连通性。对于存在大量孔洞或者垄行连续情况不好的图像,单纯的一次形态学闭运算处理并不能达到很好的效果,本文采用多次形态学闭运算处理。

对于垄间存在杂草的区域,通过形态学操作难以起到很好的降噪效果。由于噪声区域面积通常小于垄行轮廓区域的面积,本文提出一种动态面积阈值降噪的方法实现降噪处理。在保留垄行整体轮廓的基础上,根据每个轮廓区域的面积,去除面积较小的杂草区域完成降噪处理。该降噪算法流程为

输入为垄行边缘图,面积阈值 T_{area}。

输出为面积阈值降噪后的掩码图。

计算所有边缘轮廓的面积

$i \leftarrow 0$,sum$\leftarrow$所有轮廓的总数

for $i = 0 \rightarrow \text{sum} - 1$ do

  $S_i \leftarrow$第 i 个轮廓区域的面积

  if $S_i > T_{\text{area}}$ then

    将第 i 个轮廓区域保留在掩码图中

  else

    第 i 个轮廓区域不保留在掩码图中

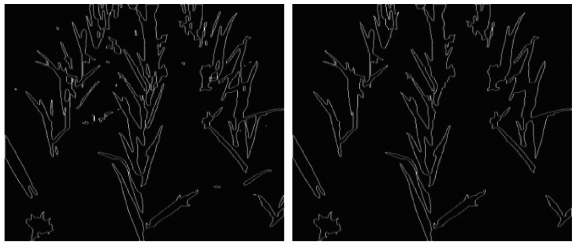
  end if

$i \leftarrow i + 1$

end for

在动态阈值 T_{area} 设置中,取轮廓面积排序在第 30% 的为 T_{area}。由于不同帧图像的噪声面积不一,如果 T_{area} 设置过大,可能会滤除垄行主体部分,在本文中取排序在第 30% 的面积值为 T_{area} 既可以保留垄行的主体部分,又可以滤除一部分噪声。对于不同的作物生长状况和杂草密度,可调整面积阈值,使其达到最佳滤波效果。

图 5 是通过动态面积阈值法滤波后垄行的轮廓图,对于形态学运算难以去除的噪声部分可以很好地剔除,且能完整地保留垄行的轮廓信息。



(a) 形态学处理后的边缘图 (b) 面积阈值处理后的边缘图

图 5 图像降噪处理结果

Fig. 5 Image denoising results

2 特征点提取与离群点剔除

经过图像预处理后,图像中仅剩白色边缘为轮廓的农作物区域和背景区域,特征点提取是垄行检测的必要前提。

2.1 特征点提取

在垄行区域,以白色边缘与基准线交点的横坐标平均值为特征点的横坐标 x、纵坐标 y 由间隔距离 h 和提取次序 k 决定,特征点提取原理示意图如图 6 所示,计算公式为

$$\begin{cases} x = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} x_i \\ y = hk \end{cases} \quad \left(0 \leqslant k \leqslant \left[\frac{H_{\text{img}}}{h}\right]\right) \tag{2}$$

式中 N——边缘图与基准线交点个数

x_i——边缘图与基准线交点的横坐标

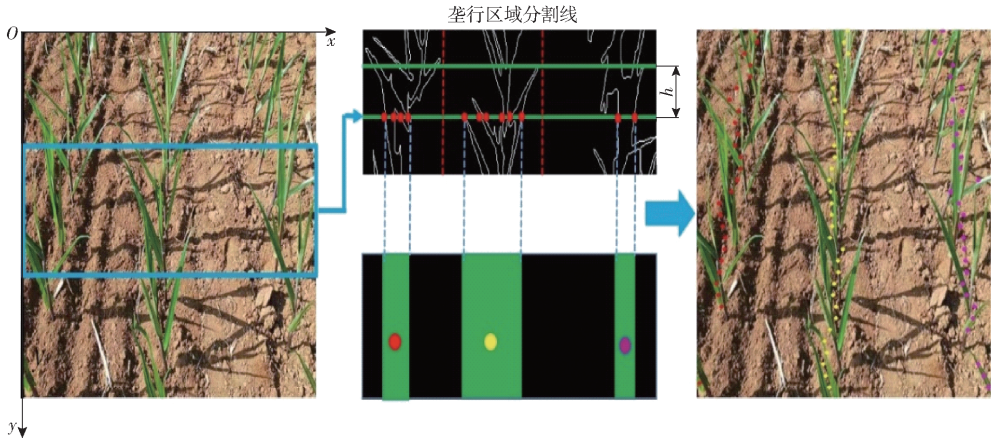


图 6　特征点提取原理示意图

Fig. 6　Sketch map of feature point extraction

[ ]——取整运算符

通过均值法可获得每条垄行待拟合的特征点(x, y)。考虑到对一幅 640 像素 ×480 像素的图像遍历每一行,在实时垄行检测中会造成时间和内存上开销较大,降低垄行检测的实时性。在每隔 h(本文 $h=10$)个单位像素长度提取一次特征点,即每条基准线之间的距离为 h 个单位像素,在精确度不受影响的前提下保障了检测的实时性。

2.2　基于 RANSAC 算法的离群点剔除

在农田的实际环境中,由于作物叶片较大,且存在杂草等因素,导致相邻垄行之间提取的特征点相互干扰,提取的特征点会含有部分离群点,直接影响垄行检测的精度。

本文采用 RANSAC 算法剔除离群点。首先,通过随机采样从测试点集中选取一个子集进行参数估计。然后,运用所有测试数据集对该估计模型进行检验,根据测试样本集中数据对模型的支持度,确定该模型估计的正确性。通过不断建立假设与检验的迭代,以期获取一个具有全局最优的模型参数,即获得最优垄行直线拟合。本文 RANSAC 算法流程图如图 7 所示。

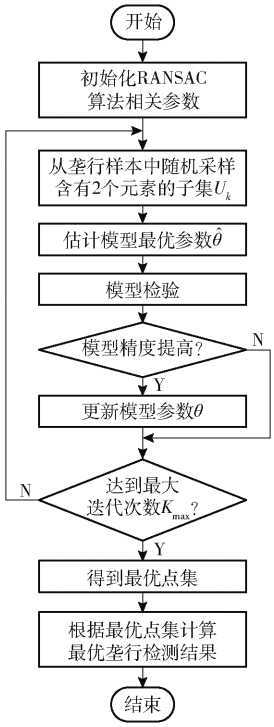


图 7　随机采样一致性排异算法流程图

Fig. 7　Flow chart of random sample consensus algorithm for rejecting outliers

3　实验结果与分析

实验图像采集装置示意图如图 3 所示。图像分辨率为 640 像素 ×480 像素,通过 USB 3.0 接口传输到计算机。所采用的处理器为 Intel(R) Core(TM) i5,主频 2.4 GHz,内存 8 GB,操作系统为 Linux Ubuntu 16.04.6LTS,导航路径检测程序基于 CMake 编译器和 OpenCV 3.3 开发。

为定量分析垄行检测的准确性,以人工绘制的垄行直线作为参考标准。本文实际检测的垄行直线与人工绘制的垄行直线之间的夹角为垄行检测的误差角,当误差角大于 5°,此时检测的路径一般难以满足植保机器人准确导航要求,得到的垄行为无效结果,以此衡量算法的检测率。

实验中,2.2 节 RANSAC 算法主要参数设置如下:内点阈值 $T=3$,置信度 α 一般设置在[0.95, 0.99]范围内,对于迭代次数 K 如果设置过大会导致算法消耗时间增加,设置过小会导致准确率下降。最佳迭代次数可由公式推导得到,用 α 表示迭代过程中从所有点随机选取出的点均为内点的概率,设定 w 表示每次从数据集中选取一个内点的概率(w 为内点个数除以点的总个数),根据概率推导可得

$$\alpha = 1 - (1 - w^n)^K \tag{3}$$

即

$$1 - \alpha = (1 - w^n)^K \tag{4}$$

两边取对数为

$$\lg(1-\alpha)=K\lg(1-w^n) \tag{5}$$

由式(5)得迭代次数

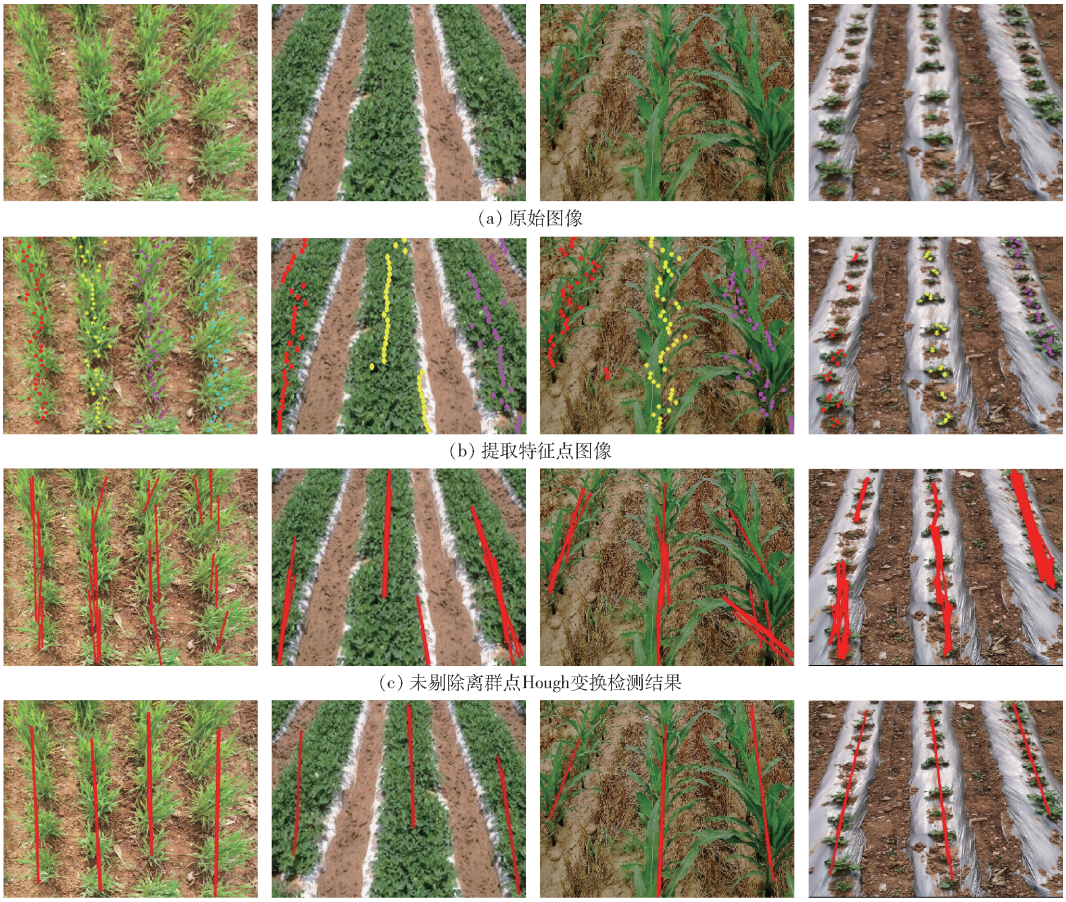
$$K=\lg(1-\alpha)/\lg(1-w^n) \tag{6}$$

3.1 基于 Hough 变换的导航路径检测结果

传统导航路径检测主要采用 Hough 变换、统计特性分析、模型匹配等方法。其中,Hough 变换由于抗干扰能力强而被广泛用于直线检测[24]。

图 8a 是采集的 4 种不同的农作物田间图像,分别对应为小麦、花生、玉米和带薄膜覆盖的土豆苗;图 8b 是通过前文方法处理后获得的特征点;图 8c 是未剔除离群点采用 Hough 变换的垄行检测结果;图 8d 是通过 2.2 节中 RANSAC 算法剔除离群点后,再通过 Hough 变换的垄行检测结果。实验表明,RANSAC 算法明显改善了 Hough 变换的检测效果。

同时注意到,由于 Hough 变换方法检测离散点簇的直线特征更加关注局部特征点的一致共线性,导致垄行中部分区域点单独成线,难以检测出一条完整直线,检测结果是由多条直线叠加而成的,不利于植保机器人导航参数的提取。



(a) 原始图像

(b) 提取特征点图像

(c) 未剔除离群点Hough变换检测结果

(d) 剔除离群点Hough变换检测结果

图 8 霍夫变换垄行检测结果

Fig. 8 Detection results of crop rows by Hough transformation

3.2 基于最小二乘法的导航路径检测结果

与 Hough 变换相比,最小二乘法能够解决上述线条检测不完整的问题。而且,基于估计残差最小准则,在理论上保证了检测精度。

图 9a 是未剔除离群点采用最小二乘法直接检测的结果,与垄行中心线的误差较为明显;图 9b 是通过 RANSAC 算法剔除离群点后,再用最小二乘法拟合的垄行检测结果。能够直观地看出,RANSAC 算法排异后再采用最小二乘法检测垄行具有更高的精度,导航路径的检测率可达 93.8%。

实验表明,通过 RANSAC 算法优化待拟合的特征点集后采用最小二乘法拟合垄行直线,虽然算法处理时间有所增加,但算法仍具有实时性,垄行检测的精度明显提高。由表 1 可知,均方根误差为 3.85°,导航路径检测率可达 93.8%,与未使用 RANSAC 算法相比,均方根误差降低了 5.82°,检测率提高了 18.8 个百分点。

4 结论

(1)以超绿色法和 Otsu 法对图像进行预处理,通过垂直投影划分垄行所在区域,形态学滤波与动态面积阈值滤波算法相结合的图像降噪处理,能降



(a) 未剔除离群点



(b) 剔除离群点

图 9　最小二乘法垄行检测结果

Fig. 9　Detection results of crop rows by least square algorithm

表 1　使用 RANSAC 算法垄行检测对比结果

Tab. 1　Comparison of crop rows detection with RANSAC

检测方法	RMS/(°)	检测率/%	平均处理时间/ms
使用 RANSAC 算法	3.85	93.8	129
未使用 RANSAC 算法	9.67	75.0	103

低杂草等其他因素的干扰，提高了本文方法的鲁棒性。对多种作物的实验表明，本文方法也具有较好的普适性。

(2)在垄行边缘图上，通过均值法提取待拟合的特征点，算法简单、方便，在 RANSAC 排异算法剔除离群点后，采用最小二乘法拟合垄行直线，通过定量分析，均方根误差为 3.85°、导航路径的检测率可达 93.8%，与未使用 RANSAC 算法相比，均方根误差降低了 5.82°，检测率提高了 18.8 个百分点。说明本文方法能够较为准确地检测植保机器人的导航路径。

参　考　文　献

[1] 廖娟，汪鹞，尹俊楠，等. 基于分区域特征点聚类的秧苗行中心线提取[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(11)：34－41.
LIAO Juan，WANG Yao，YIN Junnan，et al. Detection of seedling row centerlines based on sub-regional feature points clustering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(11)：34－41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191104&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.004.(in Chinese)

[2] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001.(in Chinese)

[3] 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 vehicle[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(10)：1－10.(in Chinese)

[4] 李盛辉，田光兆，姬长英，等. 自主导航农业车辆的全景视觉多运动目标识别跟踪[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(1)：1－7.
LI Shenghui，TIAN Guangzhao，JI Changying，et al. Multiple moving objects tracking based on panoramic vision for autonomous navigation of agricultural vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(1)：1－7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.001.(in Chinese)

[5] 艾长胜，林洪川，武德林，等. 葡萄园植保机器人路径规划算法[J]. 农业工程学报，2018，34(13)：77－85.
AI Changsheng，LIN Hongchuan，WU Delin，et al. Path planning algorithm for plant protection robots in vineyard[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(13)：77－85.(in Chinese)

[6] 郭娜，胡静涛，王鹤. 基于 GPS 导航的插秧机作业控制系统[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(1)：200－204.
GUO Na，HU Jingtao，WANG He. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(1)：200－204. http://www.j-sam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130138&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.038.(in Chinese)

[7] 宋宇，刘勇博，朱德泉，等. 基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(2)：38－44.
SONG Yu，LIU Yongbo，ZHU Dequan，et al. Extraction method of navigation baseline of cron roots based on machine vision[J/

OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 38 - 44. http://www.j-sam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170205&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.005. (in Chinese)

[8] 张勤, 陈少杰, 李彬. 基于 SUSAN 角点的秧苗列中心线提取方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 165 - 171.
ZHANG Qin, CHEN Shaojie, LI Bin. Extraction method for centerlines of rice seedlings based on SUSAN corner[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 165 - 171. (in Chinese)

[9] 孟庆宽, 张漫, 仇瑞承, 等. 基于改进遗传算法的农机具视觉导航线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10):39 - 46.
MENG Qingkuan, ZHANG Man, QIU Ruicheng, et al. Navigation line detection for farm machinery based on improved genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):39 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141007&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.007. (in Chinese)

[10] 赵腾, 杨亮亮, 陈军, 等. 基于视觉识别的小麦收获作业线快速获取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11):32 - 37.
ZHAO Teng, YANG Liangliang, CHEN Jun, et al. Fast edge detection method for wheat field based on visual recognition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 32 - 37. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161105&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.005. (in Chinese)

[11] WU Jiandeng, MENG Wei, FU Lianlian, et al. Vanishing point conducted diffusion for crop rows detection[C]// 3rd International Conference on Intelligent, Interactive Systems and Applications, 2018: 404 - 416.

[12] 姜国权, 杨小亚, 王志横, 等. 基于图像特征点粒子群聚类算法的麦田作物行检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11):165 - 170.
JIANG Guoquan, YANG Xiaoya, WANG Zhiheng, et al. Crop rows detection based on image characteristic point and particle swarm optimization-clustering algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 165 - 170. (in Chinese)

[13] JOSÉ M G, JOSÉ J R, GONZALO P. Crop rows and weeds detection in maize fields applying a computer vision system based on geometry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 461 - 472.

[14] 吴刚, 谭彧, 郑永军, 等. 基于机器视觉的谷物联合收获机行走目标直线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊):266 - 270.
WU Gang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Walking goal line detection for grain combine harvester based on machine vision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 266 - 270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2012s55&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.055. (in Chinese)

[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]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):107 - 113. (in Chinese)

[16] 司永胜, 姜国权, 刘刚, 等. 基于最小二乘法的早期作物行中心线检测方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 163 - 167.
SI Yongsheng, JIANG Guoquan, LIU Gang, et al. Early stage crop rows detection based on least square method[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 163 - 167. (in Chinese)

[17] MONTALVO M, PAJARES G, GUERRERO J M, et al. Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure[J]. Expert System with Application, 2012, 39(15): 11889 - 11897.

[18] 迟德霞, 任文涛, 刘金波, 等. 水稻插秧机视觉导航基准线识别研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(5): 559 - 565.
CHI Dexia, REN Wentao, LIU Jinbo, et al. Research of directrix recognition algorithm of vision navigation of transplanter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(5): 559 - 565. (in Chinese)

[19] JIANG G Q, WANG Z, LIU H. Automatic detection of crop rows based on multi-ROIs[J]. Expert Systems with Application, 2014, 42(5): 2429 - 2441.

[20] LU Zefeng, XU Ying, SHAN Xin, et al. A lane detection method based on a ridge detector and regional G - RANSAC[J]. Sensors, 2019, 19(18): 4028.

[21] 王可, 贾松敏, 李秀智. 基于全概率更新的改进 RANSAC 算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(3): 427 - 434.
WANG Ke, JIA Songmin, LI Xiuzhi. Improved RANSAC algorithm based on total probability updating[J]. Control and Decision, 2017, 32(3): 427 - 434. (in Chinese)

[22] ZHANG Xiya, LI Xiaona, 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] LIAO J, WANG Y, YIN J N, et al. Segmentation of rice seedlings using the YCrCb space and improved Otsu method[J]. Agronomy, 2018, 8(11): 1 - 16.

[24] 王新忠, 韩旭, 毛罕平, 等. 基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 161 - 166.
WANG Xinzhong, HAN Xu, MAO Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 161 - 166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120629&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.029. (in Chinese)