doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.013

基于截距密度聚类的航拍影像作物行中心线提取方法

张智刚[1,2]　苑炳轩[1]　童宗易[1]　刘传锟[1]　张国城[1]　张闻宇[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.广东省农业人工智能重点实验室,广州 510642)

摘要:通过无人机航拍影像快速提取作物行中心线对农机行间喷药、除草和收获等导航作业任务具有重要意义。本研究以新疆地区大田苗期棉花为研究对象,提出了一种基于截距密度聚类的航拍影像作物行提取方法。首先,对航拍影像应用过绿颜色特征提取算法、最大类间方差算法和影像分割投影法获取作物行特征点集。其次,基于截距密度的聚类算法对特征点集进行作物行聚类分割。最后,采用最小二乘法拟合每垄作物行中心线并投影反算到 WGS-84 坐标系,为农机 GNSS 行间导航作业提供路径信息。以 RTK-GNSS 接收机的高精度实地采样数据为参照,对大规模棉田作物行识别定位方法进行了试验验证。结果表明,分别采用分割间距为 15、45、75、105 像素的分割投影法提取特征点拟合作物行中心线,横向偏差平均值最大值分别为 0.022、0.024、0.025、0.112 m,横向偏差标准差最大值分别为 0.027、0.028、0.028、0.032 m;角度偏差平均值分别为 0.004°、0.003°、0.002°、0.005°,角度偏差标准差分别为 0.002°、0.001°、0.001°、0.002°;提取中心线耗时分别为 348.35、101.93、76.29、63.33 s。综合考虑精度和效率,分割间距取 75 像素为较优选择。该方法适合无人机航拍大规模棉田作物行识别和定位,可为棉花生产智能化田间管理和收获环节行间导航作业提供充分的作业路径信息。

关键词:棉花;航拍影像;作物行中心线;分割投影法;聚类分割;行间导航

中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)02-0134-09　　**OSID**:

Crop Row Centerline Extraction from Aerial Images Based on Intercept Density Clustering

ZHANG Zhigang[1,2]　YUAN Bingxuan[1]　TONG Zongyi[1]　LIU Chuankun[1]　ZHANG Guocheng[1]　ZHANG Wenyu[1,2]

(1. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence* (*GDKL-AAI*), *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Rapid extraction of crop row centerlines from drone aerial imagery is crucial for navigating agricultural tasks such as inter-row spraying, weeding, and harvesting. Focusing on cotton seedlings in Xinjiang's field crops, an aerial image-based crop row extraction method was proposed by using intercept density clustering. Firstly, aerial images underwent green color feature extraction, maximum inter-class variance analysis, and image segmentation projection to obtain feature point sets for crop rows. Secondly, the feature point set underwent crop row clustering and segmentation by using an intercept-density-based clustering algorithm. Finally, the centerlines of each crop row were fitted by using the least squares method and projected back to the WGS-84 coordinate system, providing path information for GNSS-based inter-row navigation operations of agricultural machinery. Field experiments using high-precision RTK-GNSS receiver data as reference validated this large-scale cotton field crop row identification and positioning method. Results indicated that when applying segmentation projection methods with pixel spacing of 15 pixels, 45 pixels, 75 pixels, and 105 pixels to extract feature points for crop row centerline fitting, the maximum average lateral deviation values were 0.022 m, 0.024 m, 0.025 m, and 0.112 m,

收稿日期:2024-10-06　修回日期:2024-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(32071914)、国家重点研发计划项目(2022YFD200160103)和山东省重点研发计划项目(2022SFGC0202)

作者简介:张智刚(1977—),男,副教授,主要从事精准农业和农机智能化关键技术研究,E-mail:zzg208@scau.edu.cn

通信作者:张闻宇(1985—),男,助理研究员,主要从事精准农业和无人农场关键技术研究,E-mail:zhangwenyu@scau.edu.cn

respectively. The maximum standard deviations for lateral deviation were 0.027 m, 0.028 m, 0.028 m, and 0.032 m; the average angular deviations were 0.004°, 0.003°, 0.002°, and 0.005°, respectively, with standard deviations of 0.002°, 0.001°, 0.001°, and 0.002°; the time required for centerline extraction was 348.35 s, 101.93 s, 76.29 s, and 63.33 s. Considering both accuracy and efficiency, a segmentation interval of 75 pixels was the optimal choice. This method was suitable for large-scale crop row identification and positioning in cotton fields using drone aerial imagery, providing sufficient path information for mechanized field management and row-based navigation during cotton harvesting operations.

Key words: cotton; aerial imagery; crop row centerline; segmentation projection method; cluster segmentation; inter-row navigation

0　引言

随着我国北斗卫星导航系统建设的不断完善，智能农业机械装备依靠北斗厘米级定位进行高精度农业生产逐渐成为社会发展的必然趋势[1-2]。智能农业机械装备通过 GNSS 导航定位系统跟踪预设的作业路径进行导航作业，使农机作业不重不漏，避免农田反复碾压，有效提高作业质量和效率[3]。农业生产中的施肥、除草以及收获等环节往往需要农机以作物行中心线作为作业路径，在这些环节中应用农机 GNSS 导航技术的首要任务是获取准确的作物行中心线位置信息。作物行识别定位主要有实时提取和离线提取 2 种方法，实时提取是用机载式计算机视觉[4]、激光雷达[5]等对作物进行检测以获取作物实际位置，但在实际生产中这些传感器容易受光线、杂草、扬尘、障碍物和车身姿态的影响[6]。离线提取是通过无人机对目标田块进行航拍，通过对航拍图像的作物行进行识别提取，可获得作物行路径信息[7]，将作物行位置信息输入当前广泛使用的农机北斗导航系统，即可实现农机 GNSS 作物行间导航作业。

国内外已有大量作物行识别方法研究[8]。FERREIRA 等[9]为了获得航拍图的甘蔗作物行方位角，通过对甘蔗航拍图像进行分割采样，通过 ExG 超绿特征灰度化和阈值法获得二值化图，利用垂直投影法和 Savitzky－Golay 滤波器进行检测，根据垂直投影矢量变化率得到甘蔗作物行方位角，试验结果表明方位角检测误差小于0.9°。COMBA 等[10]为了提取葡萄园行间信息，首先根据葡萄藤蔓行的直线特征，采用无人机航拍图像进行动态分割，根据“双峰行”划分葡萄园感兴趣(ROI)区域，并对葡萄园区域进行二值化；然后利用霍夫参数空间对葡萄藤蔓像素簇进行初步直线聚类，获得藤蔓行倾角；最后用最小二乘法对葡萄藤蔓行像素簇进行直线拟合[11]，最终得到葡萄园行间信息。ROCHA 等[12]设计了自动识别甘蔗行种植行和缺行的方法，对航拍图进行图像分割后，根据 RGB 梯度过滤器和 K-近邻算法对甘蔗作物行像素簇进行聚类，获得甘蔗行二值化图，用垂直投影法得到作物行方位角，沿着方位角方向找到种植行中心点，最后通过线性回归得到作物行直线。傅灯斌等[13]研究了基于区域生长顺序聚类和随机抽样一致性算法的水稻苗导航基准线检测方法，通过分割带中的轮廓质心提取出水稻苗特征点，通过水稻苗特征点间距以及水稻生长趋势对特征点进行聚类，最后通过随机抽样一致性算法对特征点簇进行直线拟合，从而得到水稻作物行直线。HE 等[14]提出了一种基于卷积神经网络模型的水稻苗作物行识别方法，包括特征提取模型的卷积网络和特征点回归网络的高斯热力图。高斯热力图描述了水稻长势以及空间分布特征，该方法学习图像中水稻行的颜色特征和空间分布特征，可有效减少环境光变化、水稻行杂草干扰或者缺行、缺苗等因素对识别的影响。孟庆宽等[15]在 YCrCb 颜色空间下对图像进行处理，降低光照影响，根据作物行特点建立作物行直线的约束模型，利用粒子群算法求解作物行直线最优解。杨蜀秦等[16]提出了一种基于深度语义分割和霍夫变换的多生育期小麦种植行检测方法，首先采用 SegNet 深度语义分割提取出小麦种植区域，通过霍夫变换进行小麦种植行预检测，然后采用二分 K-means 聚类方法对霍夫直线进行分类提炼，最后得到小麦种植行直线。

借鉴上述研究成果，本文以新疆地区大规模棉田棉花作物行为识别对象，采用无人机航拍方式获取棉田影像，研究棉田作物行识别定位方法和基于 RTK－GNSS 的定位精度检验方法，避免光照方向、阴影以及棉株缺行断垄对识别精度的影响，提高大面积棉田作物行提取算法执行效率，以期为棉花生产智能化田间管理和收获环节行间导航作业提供充分作业路径信息。

1　数据获取与预处理

1.1　航拍数据获取

棉花生长发育一般可分为播种期、出苗期、现蕾

期、开花期和吐絮期 5 个生长阶段[17]。播种期棉花以种子的形态埋在土里,航拍影像中冠层特征不明显,而棉花现蕾期及以后时期冠层较为茂密,相邻垄相互交叉封行使得航拍影像不易区分冠层特征与土壤特征,因此航拍影像采集选择在出苗期进行。航拍影像采集设备为大疆 Phantom 4 RTK 小型多旋翼高精度航测无人机,该无人机主要面向低空摄影测绘,具备厘米级导航定位系统和超清高性能成像系统,搭配大疆智图(DJI Terra)建图软件可进行带地理信息的航拍图合成[18]。棉田航拍影像采集于 2023 年 6 月 20 日,棉田位于新疆维吾尔自治区塔城地区乌苏市西湖镇,中心坐标为东经 84°40′3.78″和北纬 44°36′34.92″,属温带大陆性气候,采集当天天气晴朗少云,无人机设置飞行高度为 25 m,飞行速度为 2.3 m/s,航向重叠率为 80%,旁向重叠率为 70%,规划航线与棉花作物行近似平行,共采集棉田图像 2 799 幅,采集图像数据过程中无人机搭载的 RTK(Real-time kinematic)载波相位差分定位系统均处于固定解状态,定位精度在 1.5 cm 以内,图像尺寸均为 1 500 像素 ×1 333 像素。采集地块面积约 17 hm^2,采集现场如图 1 所示。



图 1 数据采集现场

Fig. 1 Data collection site

2 799 幅棉田图像数据经 DJI Terra 软件拼接后处理,获得完整棉田正射影像图(*.tif 文件),分辨率为 49 430 像素 ×87 686 像素,正射影像中除图像像素信息外还保存地理位置信息和投影信息,地面采样间隔(Ground sample distance, GSD)为 0.008 m/像素,以下简称 G。以棉田边界作为界限选定 ROI 区域后的无人机航拍影像及其局部放大图如图 2 所示,棉花以直线种植,各垄线互相平行、垄间距基本相等,作物行冠层、土壤背景在图像中轮流依次排开,形成规律的色带分布。

1.2 影像预处理

通过分析影像中土壤和棉花冠层在红色、绿色和蓝色可见光波段的反射特性可知:冠层对绿色可见光波段具有较高反射率,对红色和蓝色可见光波段有较低反射率;土壤背景对红色、绿色和蓝色可见光波段反射率依次降低,反射率大且差异小。故采用超绿特征提取法(ExG)[19]对影像进行灰度化处理,进而采用最大类间方差法(OSTU)对灰度影像二值化处理[20],将棉花冠层与土壤背景分离,超绿特征提取法计算式为

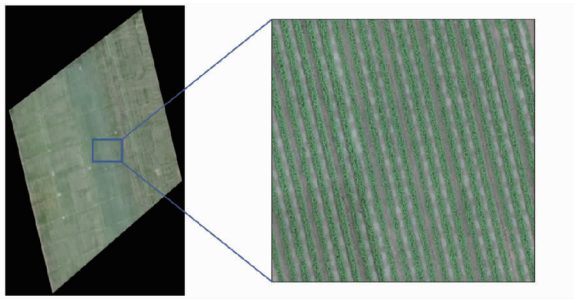


图 2 棉田航拍 ROI 影像及其局部放大图

Fig. 2 Aerial ROI image of cotton field and its local enlarged image

$$Gray(x,y)=\begin{cases}0 & (2g-r-b\leqslant 0)\\ 255 & (2g-r-b\geqslant 255)\\ 2g-r-b & (0<2g-r-b<255)\end{cases} \tag{1}$$

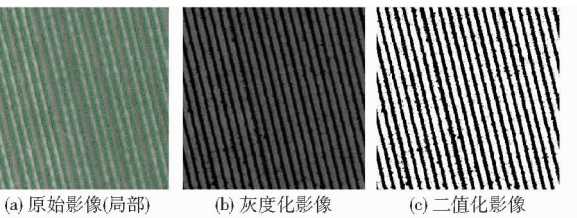
式中 $Gray(x,y)$——像素点(x,y)灰度值

r——像素红色通道值

g——像素绿色通道值

b——像素蓝色通道值

预处理结果如图 3 所示。由图 3b、3c 可知,经灰度化与二值化运算后,白色区域棉花作物冠层和黑色区域土壤实现了分离。二值图像中前景像素占比记为p_{fg},背景像素占比记为p_{bg}。



(a) 原始影像(局部) (b) 灰度化影像 (c) 二值化影像

图 3 灰度化影像和二值化影像

Fig. 3 Grayscale and binary imagery

1.3 棉花作物行特征点提取

在新疆地区现行棉花种植模式中,棉花行多以“宽窄行”方式种植,如图 4 所示。绝大多数行间距为播种时设定的固定值,记为 L_{line};在恒定作业速度条件下,株距也为固定值,记为 L_{plant}。本研究地块实测行距 L_{line}为 0.76 m,株距 L_{plant}为 0.1 m。

由 p_{fg}、L_{line}可以推测出当前生长期棉株冠层覆盖宽度 W_{cc}。计算式为

$$W_{cc}=L_{\text{line}}p_{fg} \tag{2}$$

为降低数据规模,加快处理速度,采用影像分割

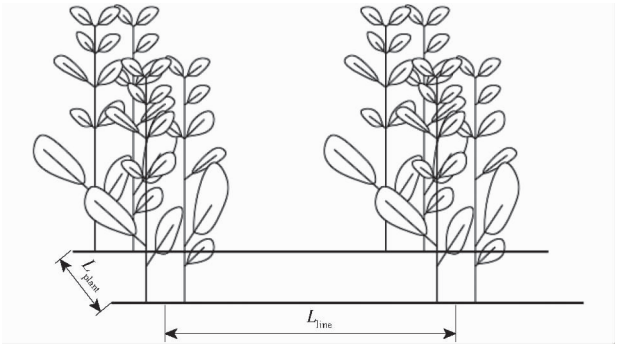


图 4　棉花种植模式示意图

Fig. 4　Schematic of cotton planting patterns

投影法[21]提取棉花作物行特征点。假设航拍影像尺寸为 h 行、w 列，由于棉花行和图像坐标系 w 轴夹角小，故沿 y 轴方向对航拍影像等距分割，获得若干个尺寸为 n 行、w 列的分割子图。

对每个分割子图进行列投影得到投影直方图曲线 $S(j)$，求出投影直方图曲线均值 S_{mean}，计算式为

$$S_{mean}=\frac{1}{w}\sum_{j=1}^{w}S(j) \tag{3}$$

其中

$$S(j)=\sum_{i=1}^{n}Bin(i,j)$$

式中　$S(j)$——第 j 列投影值总和

S_{mean}——当前分割子图投影直方图曲线均值

$Bin(i,j)$——图像分割条带第 i 行第 j 列像素值

影像分割投影法提取特征点示意图如图 5 所示，具体判断步骤如下：

(1)分割航拍影像：将航拍影像裁剪为尺寸为 n 行、w 列的诸多分割子图，记子图总数为 m，按序迭代处理分割子图。

(2)边缘判断：对于第 k 个图像分割条带($k=1,2,\cdots,m$)，计算 $S(j)$ 与 S_{mean}；当 $S(j-1)<S_{mean}<S(j+1)$ 时，j 列标记为冠层左边界 B_{left}，当 $S(j-1)>S_{mean}>S(j+1)$ 时，j 列标记为冠层右边界 B_{right}。

(3)特征噪点剔除：①剔除左右边缘宽度小于棉花冠层宽度一半的识别结果，即当($B_{right}-B_{left}+1$)<(W_{cc}/G)/2 时。②剔除左右边缘宽度大于作物行距的识别结果，即当($B_{right}-B_{left}+1$)>(L_{line}/G)时。

(4)定位特征点：提取列坐标为($B_{right}+B_{left}$)/2，行坐标为当前分割子图中心行 y 坐标像素点，作为特征点。

为探究分割间距 n 对提取作物行中心线精度与效率的影响，采用分割间距 15、45、75、105 像素提取特征点，其中分割间距为 75 像素的特征点提取效果如图 6 所示，可以看出，该特征点提取方法对正常作物行、含有阴影作物行、缺行断垄作物行具有较好的适应性。

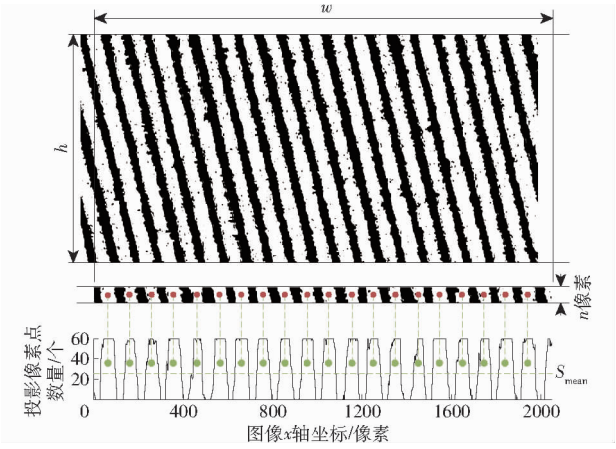


图 5　影像分割投影法提取特征点示意图

Fig. 5　Schematic of feature point extraction using image segmentation projection method

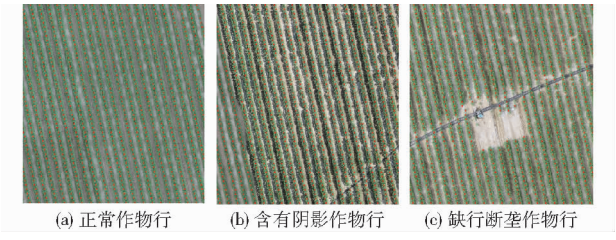


图 6　特征点识别效果

Fig. 6　Feature point recognition effect

2　棉花作物行截距密度聚类与中心线拟合

由于航拍图像尺寸大，特征点数量多，采用 Hough 变换等算法直接提取作物行中心线易出现多检和漏检问题[22]。为解决该问题，可以考虑先采用非球形簇聚类算法对特征点按作物行聚类后再拟合提取作物行中心线。在前期研究过程发现传统的聚类算法在处理大规模数据时对长度不定的平行条形簇感知能力不强且参数鲁棒性差。为此，根据各作物行在航拍影像中斜率大致相同特性，提出了一种基于截距密度的特征点聚类算法，其核心思想是求取航拍影像 ROI 区域最佳斜率 K_{best} 以构建直线截距函数，将特征点 x、y 坐标代入直线截距函数中求取截距，然后对所有特征点截距进行直方图波峰检测，实现聚类分割。

2.1　航拍影像最佳斜率

当旋转影像使得作物行方向与图像 x 轴垂直时做列投影，特征点像素密度与土壤背景像素密度差异大，投影曲线呈现多个“尖刺”的波峰，此时曲线方差最大[23]，该旋转角度正切值即为最佳斜率 K_{best}。

计算最佳斜率具体流程如图 7 所示。首先，初

始化图像旋转角度 β 为 0°，图像旋转停止角度 β_{end} 为 90°，搜索级别 i 为 0 级，图像单步旋转角度 $\Delta\beta$ 为 10^i。然后，逐步旋转图像并计算该旋转角度的投影曲线方差并放入方差集合内直至完成该级别的搜索，在此基础上提高搜索级别以获得更精确旋转角度。最后，直至达到第 3 级别的精度，即确定最佳旋转角度 β_{best} 的千分位数值，β_{best} 正切值即为该图像对应的最佳斜率 K_{best}。

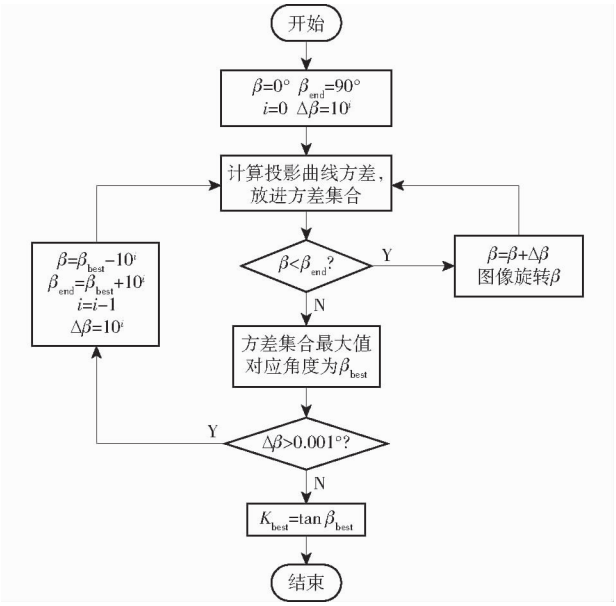


图 7 最佳斜率计算流程图

Fig. 7 Flowchart for calculating optimal slope value

为提高计算整幅航拍图像最佳斜率 K_{best} 的效率，选取位于航拍影像 ROI 区域左上角、左下角、右上角、右下角与中心位置的 2 048 像素 ×2 048 像素的子图像各 1 幅，并按特定缩放因子（取 0.1）对其等比缩放，分别求其最佳斜率，将其均值作为整幅航拍影像的最佳斜率。

位于 ROI 中心子图像的不同旋转角度方差分布如图 8 所示，当旋转角度为 76.678°时投影曲线方差最大，为 7 137.589 像素。故对于该子图像最佳斜率 K_{best} 为 76.678°正切值，为 4.223。

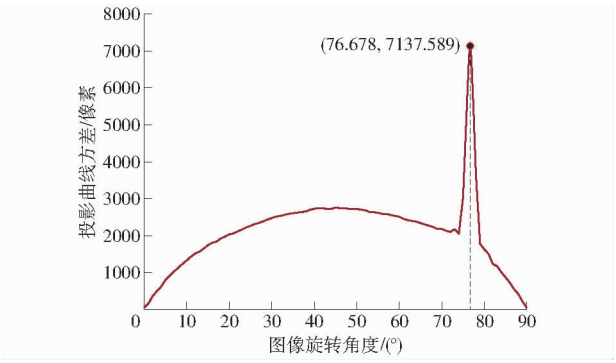


图 8 位于 ROI 中心区域的子图像旋转角度方差分布

Fig. 8 Sub-image rotation angle variance distribution plot located in central region of ROI

5 幅样本子图像最佳斜率如表 1 所示，其均值为 4.220，故整幅航拍影像最佳斜率 K_{best} 取 4.220。

表 1 最佳斜率统计

Tab. 1 Statistical of the best slope

ROI 区域位置	最佳斜率 K_{best}
左上角	4.230
左下角	4.212
右上角	4.222
右下角	4.213
中心	4.223
平均值	4.220

2.2 截距密度聚类

将二维像素坐标系下的特征点映射至三维空间，映射关系式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -K_{best} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 z——特征点对应截距

将特征点集全部代入式(4)求出对应截距并置于 Z 轴。经分析，不同行特征点在 Z 轴上的分布差异尤为显著，故对特征点集在 Z 轴上的分布进行统计得到一维直方图曲线，曲线呈现若干波峰，波峰与作物行一一对应，通过检测波峰即可确定作物行位置。find_peaks 函数是 Python 科学计算库 SciPy 库中的一个工具函数，用于在一维数据中自动检测峰值，可通过设定波峰高度和间隔来确定波峰位置[24]。本研究峰值间隔设置为 L_{line}/G，即图像坐标系中的行间距，波峰高度设置为一维直方图曲线均值。图 6a 样本的波峰位置检测结果如图 9 所示。

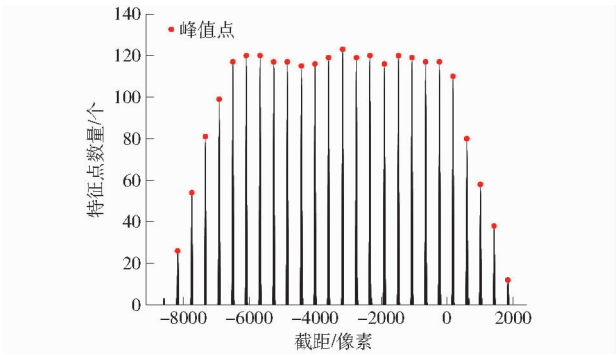


图 9 波峰检测结果

Fig. 9 Wave peak detection results

峰值点位置即为对应棉花作物行截距中心位置，记为 b_0。特征点 Z 轴坐标在 $(b_0 - W_{cc}/2G, b_0 + W_{cc}/2G)$ 范围内归为一类，最终聚类效果如图 10 所示。

2.3 作物行中心线提取

最小二乘法是常用的直线拟合算法之一，其通

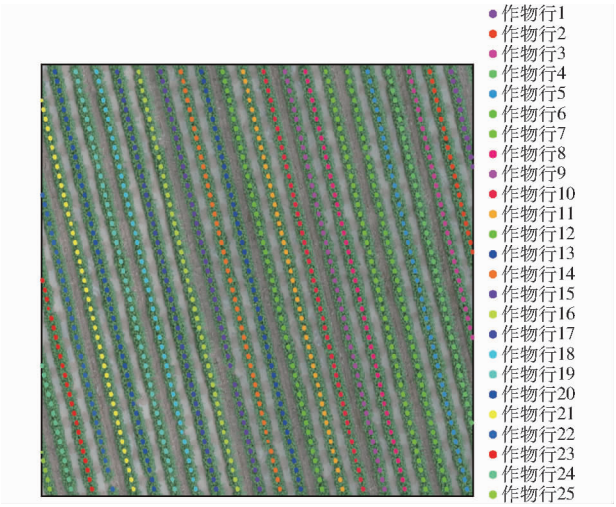
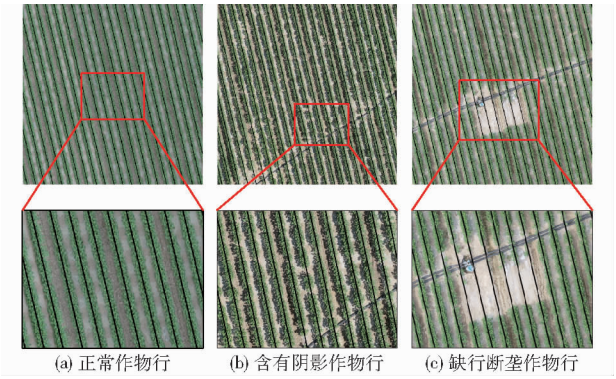


图 10　特征点聚类效果

Fig. 10　Feature point clustering effect

过最小化目标函数来获得最优拟合参数。该方法以其高精度和快速计算的特点，广泛应用于数据分析和建模[25]。因此，采取最小二乘法对聚类后的每一行特征点进行拟合棉花作物行中心线，最终拟合效果如图 11 所示。



(a) 正常作物行　(b) 含有阴影作物行　(c) 缺行断垄作物行

图 11　作物行中心线提取效果

Fig. 11　Crop row centreline extraction effect

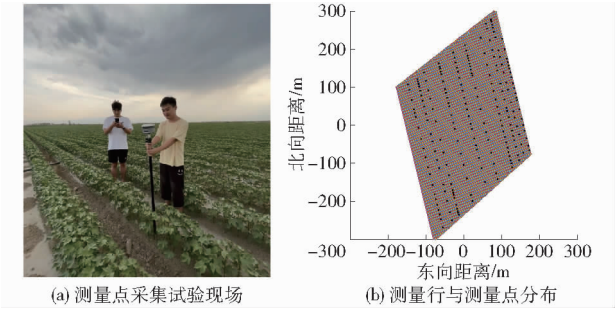
作物行中心线端点像素坐标结合 2.1 节正射影像图中的二维仿射信息与投影信息转换到 WGS－84 坐标系上经纬度坐标[26]。北斗卫星定位导航系统可将这些信息作为导航基准线实现农机行间导航作业[27－28]。

3　试验与结果分析

为验证航拍图像中作物行路径提取算法的准确性，选用上海华测导航技术股份有限公司的中绘 i90 型惯导 RTK－GNSS 接收机进行人工测绘。该接收机内置 IMU 姿态检测模块，无需对中杆调平即可快速测取测点的高精度定位数据，方便用于农业领域的野外采样。

测绘过程中，将接收机放置于棉花行双株穴的中点位置，以确保测量结果的代表性和准确性。由于 RTK－GNSS 接收机输出的定位坐标与作物行中心线端点像素坐标均属 WGS－84 大地坐标系，通过对比人工测绘结果与航拍提取的路径数据，可以有效评估提取算法的精度。

随机抽取棉田 10 条作物行，每行随机采集作物行中心点 20 个，共计 10 条测量行、200 个测量点。测量点采集试验现场如图 12a 所示，测量行与测量点分布如图 12b 所示。



(a) 测量点采集试验现场　(b) 测量行与测量点分布

图 12　测量行、点采集现场与分布

Fig. 12　Measurement lines, point data collection sites and distribution

通过计算测量点与对应提取中心线的距离偏差和计算测量行 20 个测量点拟合直线与对应提取中心线角度偏差来评估棉花作物行识别定位算法精度。

在航拍图像处理和特征提取试验中，分割子图分别采取不同分割间距（15、45、75、105 像素）提取作物行特征点及中心线，并分析其对横向偏差和角度偏差的影响，结果如表 2、3 所示。

试验结果表明，当分割间距较小（15、45、75 像素）时，横向偏差和角度偏差平均值保持相对稳定，表明在这些间距下，特征点提取能够保持较高准确性。然而，当间距增至 105 像素时，横向偏差和角度偏差平均值明显增大，作物行中心线提取精度下降，可能是由于较大的分割间距使得特征遗漏或者误差累积增加。

此外，处理时长也随着分割间距增大而显著减少（表 4）。具体来看，当分割间距从 15 像素增至 45 像素时，处理时长减少 70.74%，从 45 像素增至 75 像素时减少 25.15%，从 75 像素增至 105 像素时减少 16.99%。这种递减趋势表明，尽管处理速度随分割间距增大而提高，但提取精度在 105 像素时明显下降。

分割间距为 75 像素时提取整幅航拍图作物行中心线耗时 76.29 s，测量点横向偏差、测量行角度偏差总体分布如图 13 所示，其中角度偏差最大值为 0.005°，绝对横向偏差最大值为 0.078 m。考虑精度和效率，分割间距取 75 像素为较优选择，处理时

表 2 不同分割间距下测量行横向偏差平均值与标准差

Tab. 2 Mean and standard deviation of lateral deviation of measured rows at different division spacings m

测量行序号	横向偏差平均值				横向偏差标准差			
	15 像素	45 像素	75 像素	105 像素	15 像素	45 像素	75 像素	105 像素
1	0.005	0.004	0.004	0.112	0.025	0.025	0.028	0.025
2	0.020	0.018	0.011	0.017	0.020	0.019	0.018	0.018
3	0.007	0.009	0.006	0.006	0.021	0.020	0.022	0.021
4	0.022	0.024	0.019	0.018	0.020	0.021	0.020	0.024
5	0.011	0.010	0.006	-0.033	0.019	0.020	0.019	0.019
6	0.009	0.010	0.012	0.067	0.023	0.023	0.022	0.025
7	0.015	0.018	0.020	0.019	0.023	0.022	0.023	0.028
8	0.021	0.023	0.025	0.023	0.026	0.028	0.026	0.026
9	-0.004	0.002	-0.004	0.096	0.022	0.022	0.012	0.032
10	0.006	0.001	0.005	-0.073	0.027	0.027	0.027	0.027

表 3 测量行角度偏差平均值与标准差

Tab. 3 Mean and standard deviation of angular deviation of measured row (°)

测量行序号	分割间距/像素			
	15	45	75	105
1	0.004	0.004	0.002	0.004
2	0.007	0.006	0.002	0.005
3	0.002	0.000	0.001	0.006
4	0.001	0.002	0.001	0.004
5	0.003	0.004	0.003	0.009
6	0.005	0.004	0.002	0.004
7	0.003	0.001	0.002	0.005
8	0.005	0.006	0.005	0.004
9	0.005	0.005	0.002	0.005
10	0.003	0.003	0.002	0.003
平均值	0.004	0.003	0.002	0.005
标准差	0.002	0.001	0.001	0.002

表 4 不同分割间距下整幅航拍图像中心线提取耗时

Tab. 4 Time required to extract centerline of entire aerial image under different segmentation intervals

分割间距/像素	15	45	75	105
耗时/s	348.35	101.93	76.29	63.33

长较短,且提取精度仍能保持在可接受范围内,适合进行无人机航拍图大规模棉田作物行识别和定位。

4 结论

(1)以新疆地区大规模棉田棉花作物行作为识别对象,采用无人机航拍方式获取棉田影像,采用超绿特征提取法对影像进行灰度化处理,采用 OSTU 最大类间方差法将棉花冠层与土壤背景分离,进而采用影像分割投影法实现了棉花作物行的特征点提取。针对传统聚类算法在处理平行条形簇感知能力不强且参数鲁棒性差的问题,提出了一种基于截距

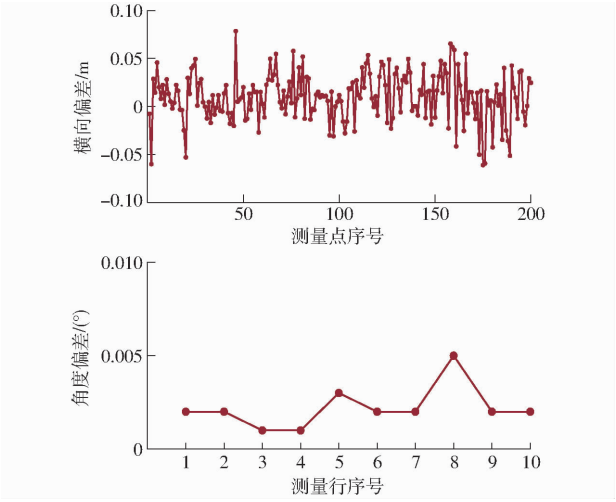


图 13 测量点横向偏差与测量行角度偏差变化曲线

Fig. 13 Curves of lateral deviation of measurement points and angular deviation of measurement lines

密度的聚类算法对航拍影像作物行特征点进行聚类分割,在处理大规模棉田图像时展现良好适应性,准确识别了不同作物行特征点,提高了作物行特征点提取和聚类效率。

(2)以 RTK - GNSS 接收机的高精度实地采样数据为参照,对大规模棉田作物行识别定位方法进行了实验验证。在试验验证过程中,影像分割投影法的分割子图分别采取不同分割间距(15、45、75、105 像素)提取作物行特征点及中心线。试验结果表明,兼顾精度和效率,分割间距取 75 像素为较优选择。在此间距下,17 hm^2 棉田处理时长为 76.29 s,作物行识别定位横向偏差平均值不大于 0.025 m,角度偏差平均值为 0.002°。该方法提取的作物行中心线标准差低、精度高,适合进行无人机航拍图大规模棉田作物行识别和定位,能够满足农机导航作业的高精度路径要求。

参 考 文 献

[1] 罗锡文,廖娟,臧英,等.我国农业生产的发展方向:从机械化到智慧化[J].中国工程科学,2022,24(1):46 - 54.
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZANG Ying, et al. Developing from mechanized to smart agricultural production in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022,24(1):46 - 54. (in Chinese)

[2] 胡伟,于春生,付明刚,等.北斗导航在精准农业上的应用研究进展[J].科技通报,2022,38(11):1 - 4,8.
HU Wei, YU Chunsheng, FU Minggang, et al. Application and research progress of Beidou navigation in precision agriculture [J]. Bulletin of Science and Technology 2022,38(11):1 - 4,8. (in Chinese)

[3] 史扬杰,程馨慧,奚小波,等.农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J].农业工程学报,2023,39(15):1 - 14.
SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(15): 1 - 14. (in Chinese)

[4] XAUD M F S, LEITE A C, FROM P J. Thermal image based navigation system for skid-steering mobile robots in sugarcane crops[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 1808 - 1814.

[5] RODSAI S, IAMRURKSIRI A, MITSANTISUK C, et al. Point cloud based guidance for autonomous mobile robot in sugarcane plantation[C]//2023 Third International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA - SYMP). IEEE, 2023: 15 - 18.

[6] 蒋林,方东君,雷斌,等.单目视觉移动机器人导航算法研究现状及趋势[J].计算机工程与应用,2021,57(5):1 - 9.
JIANG Lin, FANG Dongjun, LEI Bin, et al. Research status and trend of navigation algorithm for mobile robot with monocular vision[J]. Computer Engineering and Applications, 2021,57(5):1 - 9. (in Chinese)

[7] SUGIURA R, NOGUCHI N, ISHII K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 369 - 379.

[8] 陈鹏飞,马啸.作物种植行自动检测研究现状与趋势[J].中国农业科学,2021,54(13):2737 - 2745.
CHEN Pengfei, MA Xiao. Research status and trends of automatic detection of crop planting rows[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(13):2737 - 2745. (in Chinese)

[9] FERREIRA R P, HERNANDES A C. Sugarcane crop line angle estimation based on pixel accumulation and Savitzky - Golay filtering[C]//2021 Latin American Robotics Symposium (LARS). IEEE, 2021: 102 - 107.

[10] COMBA L, GAY P, PRIMICREIO J, et al. Vineyard detection from unmanned aerial systems images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 114: 78 - 87.

[11] PÉREZ-ORTIZ M, PEÑA J M, GUTIÉRREZ P A, et al. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 533 - 544.

[12] ROCHA B M, DA FONSECA A U, PEDRINI H, et al. Automatic detection and evaluation of sugarcane planting rows in aerial images[J]. Information Processing in Agriculture, 2023, 10(3): 400 - 415.

[13] 傅灯斌,江茜,齐龙,等.基于区域生长顺序聚类- RANSAC 的水稻苗带中心线检测[J].农业工程学报,2023,39(7):47 - 57.
FU Dengbin, JIANG Qian, QI Long, et al. Detection of the centerline of rice seedling belts based on region growth sequential clustering - RANSAC[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7): 47 - 57. (in Chinese)

[14] HE R, LUO X, ZHANG Z, et al. Identification method of rice seedlings rows based on Gaussian heatmap[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1736.

[15] 孟庆宽,张漫,杨耿煌,等.自然光照下基于粒子群算法的农业机械导航路径识别[J].农业机械学报,2016,47(6):11 - 20.
MENG Qingkuan, ZHANG Man, YANG Genghuang, et al. Guidance line recognition of agricultural machinery based on particle swarm optimization under natural illumination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(6):11 - 20. (in Chinese)

[16] 杨蜀秦,林丰山,徐鹏辉,等.基于无人机遥感影像的多生育期冬小麦种植行检测方法[J].农业机械学报,2023,54(2):181 - 188.
YANG Shuqin, LIN Fengshan, XU Penghui, et al. Planting row detection of multi-growth winter wheat field based on UAV remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):181 - 188. (in Chinese)

[17] 高婧,李茂春,毛荣,等.1991 — 2022 年新疆塔城地区植棉区气候变化对棉花生育期的影响[J].中国棉花,2024,51(2):16 - 23.
GAO Jing, LI Maochun, MAO Rong, et al. Effects of climate change on the growth period of cotton in main cotton areas of Tacheng Prefecture, Xinjiang[J]. China Cotton,2024,51(2):16 - 23. (in Chinese)

[18] 吴俊.基于大疆精灵 4 RTK 的实时差分模式航测精度分析[J].电子技术,2022,51(12):14 - 15.
WU Jun. Analysis of precision of real time differential aerial survey based on Dajiang Phantom 4 RTK[J]. Electronic Technology,2022,51(12):14 - 15. (in Chinese)

[19] 李霞,苏筠皓,岳振超,等.基于中值点 Hough 变换玉米行检测的导航线提取方法[J].农业工程学报,2022,38(5):167 - 174.
LI Xia, SU Junhao, YUE Zhenchao, et al. Extracting navigation line to detect the maize seedling line using median-point Hough transform[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 167 - 174. (in Chinese)

[20] 董忠言,蒋理兴,王俊亚,等.基于图像复杂度的一维 Otsu 改进算法[J].计算机科学,2015,42(增刊 1):171 - 174.

DONG Zhongyan, JIANG Lixing, WANG Junya, et al. Modified one-dimensional Otsu algorithm based on image complexity[J]. Computer Science, 2015, 42(Supp. 1): 171 - 174. (in Chinese)

[21] 苏伟,蒋坤萍,闫安,等. 基于无人机遥感影像的育种玉米垄数统计监测[J]. 农业工程学报,2018,34(10):92 - 98.
SU Wei, JIANG Kunping, YAN An, et al. Monitoring of planted lines for breeding corn using UAV remote sensing image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 92 - 98. (in Chinese)

[22] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 34 - 41. (in Chinese)

[23] TENHUNEN H, PAHIKKALA T, NEVALAINEN O, et al. Automatic detection of cereal rows by means of pattern recognition techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 677 - 688.

[24] SCHOLKMANN F, BOSS J, WOLF M. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals[J]. Algorithms, 2012, 5(4): 588 - 603.

[25] 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 - 167,185.

[26] ZHANG J, XU S, ZHAO Y, et al. Aerial orthoimage generation for UAV remote sensing[J]. Information Fusion, 2023, 89: 91 - 120.

[27] 罗锡文,胡炼,何杰,等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报,2024,40(1):1 - 16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1 - 16. (in Chinese)

[28] 张闻宇,胡力文,王辉,等. 基于 B 样条优化的改进纯追踪农机导航曲线跟踪方法[J]. 农业机械学报,2024,55(9):42 - 51,115.
ZHANG Wenyu, HU Liwen, WANG Hui, et al. Improved pure pursuit agricultural machinery navigation curve tracking method based on B-spline optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 42 - 51,115. (in Chinese)

(上接第 31 页)

[24] 兰玉彬,韩金钢,张同升,等. 正态分布规律变量调节式多功能条播装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):75 - 88.
LAN Yubin, HAN Jin'gang, ZHANG Tongsheng, et al. Design and testing of multifunctional strip-tillage device based on normal distribution regular variable conditioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 75 - 88. (in Chinese)

[25] 杨丽,李治民,张东兴,等. 离心式高速玉米精量排种器 T 形槽型孔设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(7):50 - 60.
YANG Li, LI Zhimin, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of the T-shaped hole of centrifugal high-speed maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 50 - 60. (in Chinese)

[26] 丁幼春,王凯阳,刘晓东,等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(8):30 - 41.
DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small- size seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 30 - 41. (in Chinese)

[27] 王兴波. 空间任意方向圆柱面的参数方程[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版),2010,28(6):58 - 63.
WANG Xingbo. Parametric equations of arbitrary directional cylindrical surfaces in space [J]. Journal of Foshan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 28(6): 58 - 63. (in Chinese)

[28] 赵湛,李耀明,陈义,等. 水稻籽粒碰撞力学特性研究[J]. 农业机械学报,2013,44(6):88 - 92.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Yi, et al. Impact mechanical characteristics analysis of rice grain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 88 - 92. (in Chinese)

[29] 翟萌萌. 基于 EDEM 的小麦宽幅精量播种装置优化设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
ZHAI Mengmeng. Optimization design and experimental study of a wide-row precision sowing device for wheat based on EDEM [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[30] 谢建华,张洪梁,冯浩,等. 摩擦调节式小区小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):164 - 173.
XIE Jianhua, ZHANG Hongliang, FENG Hao, et al. Design and experiment of friction adjustable precision seed feeder device for wheat experimental sowing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 164 - 173. (in Chinese)

[31] 丁永前,陈冲,余洪锋,等. 小麦播种机播量控制参数自校正方法[J]. 农业机械学报,2023,54(4):31 - 37,275.
DING Yongqian, CHEN Chong, YU Hongfeng, et al. Self-correcting method for application rate control parameters of wheat seed drill machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 31 - 37,275. (in Chinese)