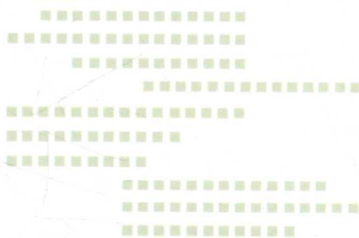




棉花机械化生产过程 视觉导航路径图像检测方法

◎ 李景彬 曹卫彬 陈兵旗 编著



中国农业科学技术出版社

棉花机械化生产过程

视觉导航路径图像检测方法

◎ 李景彬 曹卫彬 陈兵旗 编著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

棉花机械化生产过程视觉导航路径图像检测方法 / 李景彬, 曹卫彬, 陈兵旗编著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.4

ISBN 978-7-5116-2449-9

I. ①棉… II. ①李… ②曹… ③陈… III. ①棉花 - 机械化生产 - 视觉导航路 IV. ①S562.048

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 317445 号

责任编辑 张国锋

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82106636 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京卡乐富印刷有限公司

开 本 880mm × 1 230mm 1/32

印 张 4.625

字 数 150 千字

版 次 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元



摘 要

农业机械自动导航在提高农业机械的作业质量和生产效率,提升农艺水平,改善劳动者的劳动环境和安全状况,降低劳动强度等方面具有重要意义。视觉导航具有适应复杂的田间作业环境、探测范围宽、信息丰富完整等技术优势,是农业机械自动导航领域的研究热点,如何在自然环境下快速、准确、有效地提取行走路线是视觉导航技术的研究关键。

新疆生产建设兵团棉花产业的规模化、机械化生产模式为视觉导航技术的应用提供了良好的基础条件。本书以棉花播种、田管、收获等机械化生产环节为研究对象,重点探讨了棉花不同生育阶段的视觉导航目标特征、不同机械化生产过程中视觉导航候补点的检测算法、视觉导航路径检测算法及农田边界环境的检测算法等。主要研究内容如下。

(1) 构建棉花机械化生产过程视觉导航路径检测系统及图像采集方案。软件系统主要由图像采集、图像预处理、铺膜播种机视觉导航路径检测、棉花田管环节视觉导航路径检测、采棉机视觉导航路径检测模块等组成;图像采集系统的硬件选用爱国者 T60 型、三星 NV3 数码相机和 Lenovo 昭阳 E46 型计算机,并进行了不同生产环节的图像采集。

(2) 棉花机械化生产过程中不同作业环节的视觉导航候补点集群

的检测算法研究。针对棉花播种时期,首先利用 R 分量对棉田图像进行灰度化,并利用 Daubechies 小波($N=8$)进行平滑处理,而后基于寻找垂直累计分布图的最低波谷点的方法以及前后帧相互关联的方法检测候补点集群。针对田管时期,首先利用 $2G-R-B$ 颜色模型对图像进行灰度化,并利用中值滤波进行平滑处理,而后基于寻找棉苗行列中心线特征的方法以及前后帧相互关联的方法检测候补点集群。针对棉花收获时期,首先选用 $3B-R-G$ 颜色模型进行图像灰度化,并利用移动平均化进行平滑处理,而后基于最低波谷点寻找波峰上升沿临界点的方法以及前后帧相互关联的方法检测候补点集群。试验结果证明,各算法能够准确提取出候补点集群,且吻合视觉导航的目标特征。

(3) 基于过已知点 Hough 变换实现了棉花机械化生产过程中各环节的视觉导航路径拟合。试验结果表明,本书研究的导航直线检测算法检测准确率高,检出直线能够准确吻合各时期的视觉导航的目标特征,同时受外界的干扰较少,鲁棒性强,且算法速度快。在本书搭建的硬件系统下,对于采集的 $640\text{pixels} \times 480\text{pixels}$ 图像,棉花播种时期平均每帧图像检测导航路径的时间为 72.02ms ,棉花田管时期平均每帧图像检测导航路径的时间不超过 75ms ,棉花收获时期平均每帧图像检测导航路径的时间为 56.10ms ,能够满足各时期农业机械田间作业实时性的要求。

(4) 棉花不同生产时期棉田边界特征的提取与检测。基于局部图像处理窗口的候补点集群的坐标差值法、像素值突变法等实现了棉田田端的检测,同时开发了收获期棉田田侧边缘的检测算法,构建了棉田边界特征的检测算法,丰富完善了棉花机械化生产过程视觉导航路径检测系统。

关键词: 棉花; 机械化生产; 导航路径; 机器视觉; Hough 变换

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 农业机器人导航方式	3
1.3 国外农业机器人视觉导航技术研究现状	5
1.4 国内农业机器人视觉导航技术研究现状	7
1.5 研究目标与内容	12
1.6 研究方法与技术路线	13
 2 棉田视觉导航系统构成及图像采集	17
2.1 硬件系统构成	17
2.2 软件系统设计	19
2.3 视频采集与存储	24
2.4 棉田图像采集	26
2.5 小结	33
 3 不同时期棉田目标颜色特征分析与识别	35
3.1 常用的颜色空间及讨论	35
3.2 彩色图像颜色特征提取方法	43

3.3	棉花播种期颜色特征分析与识别	46
3.4	棉花田管阶段颜色特征分析与识别	48
3.5	棉花收获期颜色特征分析与识别	55
3.6	小结	57
4	视觉导航候补点集群提取算法研究	59
4.1	基于色差模型的图像灰度化	59
4.2	图像平滑处理	66
4.3	铺膜播种机视觉导航候补点集群提取算法	71
4.4	棉花田管机械作业时导航候补点集群的提取算法	75
4.5	采棉机作业时导航候补点集群的提取	80
4.6	小结	83
5	棉花生产机械化视觉导航路径检测及试验研究	85
5.1	常用的直线检测算法	85
5.2	过已知点 Hough 变换的已知点的计算	95
5.3	检测算法流程	95
5.4	铺膜播种机视觉导航路径检测与试验分析	97
5.5	棉花田管时期视觉导航路径检测及试验分析	101
5.6	采棉机视觉导航路径检测及试验分析	109
5.7	小结	113
6	棉田边界视觉检测算法研究	115
6.1	棉田边界分类	115
6.2	田端检测算法	116

6.3 田侧边缘检测算法	120
6.4 试验结果与分析	121
6.5 小结	126
7 结论与展望	127
7.1 结论	127
7.2 创新点	129
7.3 展望	129
参考文献	131

1 绪 论

1.1 研究背景与意义

农业机械是发展现代农业的重要物质基础,农业机械化是农业现代化的重要标志,是改善农业生产条件、农民生活水平、农村生态环境的重要途径。2010 年全国农机总动力达到 9.28 亿 kW,全国农作物耕种收综合机械化水平达到 52.3%,主要粮食作物生产机械化快速推进,水稻机械种植和收获水平分别达到 20.9% 和 64.5%,玉米机收水平达到 25.8%,马铃薯、油菜、棉花、花生、茶叶等主要经济作物生产机械化取得突破性进展^[1]。在《全国农业机械化发展第十二个五年规划(2011—2015 年)》的发展目标中明确指出:农业机械化科技创新能力和技术应用水平明显提升,农机农艺融合度、机械化与信息化融合度进一步提高,增产增效型、资源节约型、环境友好型农业机械化技术广泛应用。

棉花是重要的战略物资和棉纺工业原料,棉花产业在我国国民经济中占有重要地位。棉花是新疆生产建设兵团(全书简称“兵团”)的经济支柱产业之一,棉花产值占兵团农业总产值的 60%。兵团目前有 117 个植棉团场,分布在全疆各地州,植棉团场和棉区农工经济收入的 90% 来自棉花。据统计,2010 年兵团棉花播种面积 746.97 万亩(其中精量播种面积 546.80 万亩),棉花产量 115.01 万 t^[2],以仅占全国 9% 的棉花播种面积,生产出占全国棉花总产 1/6 的棉花。兵团的棉花生产初具现代农业雏形,具有了规模化、集约化、机械化等基本特征。

兵团是全国农业机械化推广示范基地,农业机械化已进入高级发展阶段,处于全国领先水平。“十一五”末,兵团农业机械总动

力达到 369.33 万 kW, 大中型拖拉机保有量为 3.68 万台, 大中型机引农具保有量 7.09 万部, 采棉机 705 台, 小型拖拉机保有量 3.73 万台, 小型机引农具保有量 3.35 万部。“十一五”末兵团实现机耕面积 1615 万亩, 机播面积 1 670 万亩, 机械覆膜面积 931 万亩 (1 亩 $\approx 667\text{m}^2$, 全书同), 机械中耕面积 977 万亩, 机械收割面积 1 037 万亩, 机械秸秆还田面积 1 064 万亩, 机械化肥深施面积 1 115 万亩, 飞机作业面积 350.37 万亩, 主要农作物的耕整地、播种、中耕、灌溉、植保、运输等主要生产环节已实现全部机械化, 农业机械化综合水平达到 89%, 其中耕作、播种、覆膜和中耕机械化程度均达到 100%, 收获机械化程度达到 55%。机采棉技术推广进一步加大, 机械采收棉花面积大幅增加, “十一五”末实现机械化采棉 258 万亩, 机械采收比例达到 36.6%^[3]。

精准农业是 21 世纪农业发展的方向。精准农业的本质就是各类信息的获取与智能处理, 因此信息技术是精准农业的核心^[4]。目前, 国内外很多专家学者围绕农业资源调查、精准农业田间信息采集^[5-6]、作物生长模拟模型及调控^[7-11]、智能农业决策支持系统^[12]及智能机械精准作业^[13]等领域开展了大量的研究工作。

农业机械的自动化、信息化和智能化 (简称“三化”), 是农业现代化的重要标志之一^[14], 自动驾驶技术是智能农业机械的重要组成部分, 是实现农业机械三化的关键技术之一。农业机械的自动驾驶系统具有广阔的应用前景, 不仅可以为精准农业提供研究和采集数据的载体平台^[15], 也可以提高农业机械的作业质量和生产效率, 提升农艺水平, 改善劳动者的劳动环境和安全状况, 降低劳动强度, 减少农作物的生产投入成本等。

在兵团机械化大农业生产体系中, 人工参与机械化生产的程度依然占有很高的比例。如在机械化生产过程中, 一般农业机械都是由单人独自操作, 劳动强度大, 且都是单调的重复性工作, 容易使人感觉到疲劳, 以致误操作经常发生; 同时随着机械化水平的提高, 现代化农业机械具备的作业功能越来越多, 驾驶员除了操纵方向盘外, 还有其他动作需要操纵。因此, 自动驾驶系统的研究十分符合兵团农业机

械化发展的需要,且应用前景广阔。

本书以兵团棉花机械化生产过程为例,从棉花种植、中耕、植保、收获等不同的生产阶段着手,基于机器视觉技术开展棉花机械化生产视觉导航技术研究,通过对不同生长阶段的棉花及农田特点进行研究,探索农业机械在棉田作业过程中行走路径的视觉检测技术,为棉花机械化生产过程中实现自动化、智能化奠定技术基础,同时也丰富完善公路车辆视觉导航技术体系。

1.2 农业机器人导航方式

自动驾驶技术是计算机技术、电子通信、控制技术等多种学科的综合,在现代农业生产中的应用越来越广,逐渐成为农业工程技术的重要组成部分。自动驾驶技术早期的方式主要有地下电缆有线引导^[16]、航位导航、激光导航^[17]等,其中电缆导航在大田农业生产中应用成本较大,航位导航不能满足高速度工作的要求,激光导航受到夜间和雾气等自然环境条件的限制。目前,农业工程中应用最为广泛的自动驾驶技术主要有 GPS、机器视觉以及多传感器融合技术等^[18]。

1.2.1 GPS (Global Positioning System) 全球定位系统

GPS 即全球定位系统,是由美国建立的一个卫星导航定位系统。目前,它在航空、航天、军事、交通、运输、资源勘探、通信、气象等几乎所有的领域中,都被作为一项非常重要的技术手段和方法,用来进行导航、定时、定位、地球物理参数测定和大气物理参数测定等。利用该系统,不仅可以在全球范围内实现全天候、连续、实时的三维导航定位和测速,还能够进行高精度的时间传递和高精度的精密定位。

目前 GPS 在精确灌溉、施肥和农业智能机器人以及农用车辆的自动驾驶定位等方面用途广泛^[19-20],主要可分为 DGPS (差分 GPS 定位技术)和 RTK-GPS (实时动态 GPS 定位技术),其中 DGPS 的能达到亚米级的精度而 RTK-GPS 可达到厘米级的精度。GPS 导航方式具

有广阔的应用前景,但其也存在一些技术缺陷,如GPS导航需要预先的精确导航路线,这在农作物行间进行精确作业时,该导航方式会变得不够灵活,同时GPS信息受卫星的几何分布、星历误差、时钟误差、船舶误差、多路径误差以及接收机噪声等因素的影响,且其可靠性也受山坡、树木以及建筑物等因素的影响。

1.2.2 视觉导航

农田环境的视觉导航一般是指利用视觉系统识别出农作物行或垄等区域的边界作为行走路径,根据农业机器人与行走路径的相对位置计算出控制量,通过转向执行机构调节其位置进而跟踪期望路径的一系列过程^[21]。视觉的适应能力强、比较灵活、不需要预定的导航路线图,非常适合行间作业的农业机械人的导航,同时视觉传感器探测的范围宽,信号丰富完整,在提供导航信息的同时,还可以获取田间农作物、杂草等信息^[22-23],有利于精确作业的实现。

1.2.3 多传感器融合技术

多传感器融合技术是指利用多个传感器共同工作,得到描述同一环境特征的冗余或互补信息,再运用一定的算法进行分析、综合和平衡,最后取得环境特征较为准确可靠的描述信息。多传感器融合的实质是多源不确定性信息的处理,在处理过程中信息的表示形式不断发生变化,从较低级的形式(如图像像素、超声波传感器探测数据等)直至系统需要的某种高级形式(如车辆位姿、农作物位置等)。按照信息的流通形式和综合处理模式,多传感器融合系统可分为集中式、多级式和分布式3种融合结构^[24],其融合方法常用主要有卡尔曼滤波、模糊逻辑推理和人工神经网络等方法。

目前视觉导航系统由于具有广泛的适用性、功能多样性以及高性价比的特点,目前已经成为导航系统的关键组成部分,被广泛地应用在农业机器人自动导航系统的研究中^[25]。本研究基于机器视觉技术着重研究新疆兵团棉花机械化生产过程中的视觉导航路径检测系统,为棉花铺膜播种、中耕、植保及收获等机械化生产过程中实现自动导

航奠定技术基础。

1.3 国外农业机器人视觉导航技术研究现状

发达国家对农业机器人的视觉导航技术研究起步较早,20 世纪 80 年代早期,随着相对价格低廉、性能可靠的 CCD 图像传感器的出现,基于机器视觉技术对农业机器人自动导航系统的研究便应运而生,当时主要运用在具有垄或行等结构的农田中。20 世纪 90 年代以来,随着计算机、微电子等相关技术的不断进步,一些复杂的图像处理和分析算法能够顺利实现,视觉导航技术在农业工程中的应用研究迅猛发展。

美国的 UIUC 的农业机器人研究团队长期农业机器人视觉导航技术的研究,并取得了丰富研究成果。Searcy (1986) 提出基于 Hough 变换提取农作物行的参数^[26]。Reid (1987) 指出近红外相机成像有利于把作物区从背景中分割出来,并提出动态阈值的方法分割图像^[27]。Reid 等 (2000) 利用带有近红外镜头的摄像机,采用聚类算法进行图像分割,最后运用 Hough 变换获取导航路径^[28]。Benson (2001) 基于多光谱图像的 3 个不同波段构造了农作物生长区的特征,分析了玉米收获期的多光谱图像,发现其彩色直方图可直接计算出分割阴影的阈值,而把图像作 HIS 变换,由色度 H 直方图可计算出分割作物边缘的阈值,每处理完一行图像时,就用线性回归方法提取割/未割边缘直线,然后采用模糊算法评估边缘识别的正确性,舍弃不合理特征点,若已经能确认直线参数,即可终止运算。这种算法能减少 77.1% 的处理工作量,大大提高了系统的实时性^[29]。

美国的 Carnegie-Mellon 大学的 Ollis M 和 Stentz A 基于机器视觉技术搭建了自动收获机器人^[30],利用彩色相机获取农作物的田间图像,并利用 RGB 分量比构建了收割作物的边缘特征,而后利用阶梯模型识别边缘,并提出利用阴影补偿的方法剔除车辆投影干扰边缘识别的问题^[31]。

英国的 Silsoe 研究所立足精准农业的发展,从农作物精准施药的

方面着手,开发了能自主行走的智能喷药机器人,并基于机器视觉在自动导航方面开展了很多研究^[32-36]。

Pla F. 提出用田间图像的虚交点作为导航目标的方法:预先用色彩训练法建立像素分类表,对实时图像查表分类;然后把已识别出的作物区建模为骨架,通过运算提取骨架的轮廓线,这些骨架的中心线将聚交于一个虚交点,此点即为导航参数^[37]。Sanchiz 提出用图像的4个边角点结合查表的方法加快图像的处理速度^[38],Tillett 依据取样图像的平均灰度和作物的生长阶段确定阈值,以此阈值为参照,用软件控制相机的积分时间,从而保证稳定的图像分割,然后通过寻找作物行中少数特征点来确定作物航的位置^[39],Hague T 提出用带通滤波器匹配小麦行,实验结果表明,RMS 误差为 15.6mm ^[40],Tillett N D 针对甜菜生长初期的特征不够明显,识别过程中容易受杂草的干扰,提出带负值的带通滤波器,实验结果为除草的偏差不超过 $\pm 10\text{mm}$ ^[41]。

法国 Cemagref 研究所的 Chateau 提出利用 MRF 处理收割作物边缘识别问题^[42],选用单元窗口的直方图最大值的灰度、二阶矩、同质和熵等4个统计特征参数,基于 Markov 随机场进行参数融合,再计算典型模型和当前图像的相关系数,定义参数的置信度,使用 dempster-shafer 证据推理理论计算最大可信度,得到确切的已割/未割的作物边缘。

Olsen 提出使用正弦函数模型匹配灰度图像寻找作物行中线位置的方法^[43],把灰度曲线变换到频率域,用8阶低通 Butterworth 滤波器滤波,再逆变换回时域,那么光滑曲线的每个峰值就是作物行所在位置,试验证明,该方法具有很好鲁棒性。H.T.Søgaard 和 H.J.Olsen 提出利用彩色分量之间的数值运算($2 \times G-R-B$)进行图像灰度化,用灰度重心确定作物的位置,最后结合 Hough 变换提取作物行^[44]。Bjorn Astrand 用图像分割、Hough 变换提取识别甜菜行,田间实验精度为侧向偏差为 2.4cm ^[45]。

在亚洲,开展视觉导航系统研究的主要集中在日本和韩国。

日本东京大学的 Torii 等把彩色图像从 RGB 空间变换到 HIS 空间

后,首先经过离线训练,然后在线用查表法分类各像素,分割作物与背景。通过在插秧机的实验应用中表明,偏移量误差小于2cm,偏向角误差小于 0.2° [46]。Yutaka Kaizu 研究了基于机器视觉的插秧机自动驾驶系统,并利用 Hough 变换提取了作物行及导航参数 [47]。

韩国汉城大学的 S.I.Cho 采用黑白相机寻找果园内的路径,同时利用超声波传感器检测障碍,应用模糊控制算法,实现车辆的自动驾驶,其输入量为视觉导航系统感知的前进方向和超声波传感器测定的障碍物距离,输出的控制信号为液压油缸的移动方向和动作时间 [48]。Shin 搭建了自动驾驶实验系统,利用视觉传感器获取行走路径,其早期系统主要由 WebCamera 和笔记本构成视觉系统,利用单片机控制车辆的运动 [49]。

1.4 国内农业机器人视觉导航技术研究现状

国内开展农业机器人视觉导航技术的研究始于20世纪末期,起步比较晚,主要集中在浙江大学、华南农业大学、中国农业大学、南京农业大学等高等院校。

南京农业大学的沈明霞 [50] 等从农田景物的图像区域的检测入手,通过图像二值膨胀处理,形态滤波器滤波,有效去除了图像中的小纹理,得到预期的农田景物有效区域 [51],而后基于零点反对称紧支撑二进小波基的图像小波变换,检测农田景物边缘,农田景物中各个边缘都被提取出来,且边缘细节丰富,景物图像边缘无像素平移、定位精确 [52],最后通过对机器人的近景成像几何建模,提出了利用虚点提取和检测实现从图像到场景现实空间的三维计算,并确定机器人与路径的相对位置、方向,从而获得了自定位信息的方法 [53]。

南京农业大学的周俊探讨了适宜于多分辨率路径识别时的彩色特征 $(2G-R-B)/4$,利用小波变换,把图像分解到第四个尺度,而后利用阈值分类法提取作物行的粗略轮廓,最后基于最小二乘法融合多分辨率检测结果,输出导航路径,并以油菜地农田图像为例,提取出油菜行直线 [54]。而后提到一种运用路径知识启发机制识别行走路径

的方法,且通过对农田自然环境图像的识别证明,该方法与传统阈值分割算法的相比具有明显的优势,可以在非结构化农田自然环境中有效地识别出行走路径^[21]。在导航参数获取方面,周俊提出了把 Hough 变换把图像空间中的线映射导航参数空间中的点,来直接获取所需的导航参数,实验结果表明,横向距离偏差均值为 -0.83cm ,标准差为 3cm ,偏向角偏差均值为 -0.38° ,标准差为 0.62° ^[55]。在障碍物识别方面,周俊提到一种在线检测运动障碍目标的方法:在移动机器人平台上连续采集两帧图像,提取其特征点并加以匹配,然后应用双线性模型描述对应特征点在图像之间的运动特性,并用最小二乘法对模型参数进行最优估计,得到两帧图像之间的变换矩阵,最后利用此变换矩阵补偿前帧图像来消除机器人自身运动的影响,再与后帧图像作帧差,在线检测出运动障碍目标^[56]。

南京农业大学的安秋等针对农业机器人视觉导航中存在的阴影干扰问题,采用基于光照无关图的方法去除导航图像中的阴影,然后采用增强的最大类间方差法进行图像分割和优化的 Hough 变换提取作物行中心线,最终通过坐标转换获得导航参数。最后,通过作物行跟踪试验表明,基于光照无关图的阴影去除方法不仅满足了导航实时性的要求,而且使农业机器人在光照变化的情况下导航参数提取的鲁棒性有了更大的提高^[57]。

华南农业大学的罗锡文院士带领研究小组搭建了农用智能作业移动平台,作为精准农业的研究平台^[58]。张志斌等根据田间作物垄行间杂草离散的特点,基于图像矩阵,运用像素子集的良好性,结合垄宽先验知识得到垄行轨迹中心,并在摄像头参数结构的可线性化映射区(图像中间约 $1/3$ 区域),考虑移动平台的速度和系统图像采样间隔,在系统处理速度大于平台移动速率条件下,建立了单目视觉导航系统的动态方程,通过对油菜地的试验表明,航向角和位置参数平均误差分别约为 1° 和 1mm ^[59]。同时为了提高农业机械自主作业视觉导航的精度,基于田间作物垄行的特点,首先选择作物的绿色为特征提取垄行结构,并基于 Hough 变换原理和 Fisher 准则建立提取垄线的新算法,得出了多垄识别的统一模型^[60]。2011 年张志斌提出一种基

于统计分析提出了一种绿色作物图像分割方法,该算法相对传统的 ExG+auto-threshold 绿色索引,对于早期生长的绿色作物是一种有效、简单的图像分割方法,对作物-土壤、光照变化不敏感^[61]。

中国农业大学的陈兵旗教授对耕作环境^[62]、高速公路环境^[63]、麦田初期管理环境^[64]等的行走目标直线检测、农田区域分界线的识别^[65]以及农田障碍物的检测^[66]等进行了深入的研究。吴刚提出一种基于改进随机 Hough 变换(RHT)的收获机器人行走目标直线检测算法,根据已收获区域、未收获区域和非农田区域的不同颜色特征,利用统计分析和边缘检测,确定行走目标直线的终点位置以及直线方向上的候选点,采用改进 RHT 完成直线检测,实验证明算法能够有效检测出直线参数,且处理时间在 200ms 左右^[67]。

籍颖从农田作业环境特点出发,利用颜色特征因子(2G-B-R)进行灰度化处理,使用 OTSU 法获得二值化图像,采用基于已知点的改进 Hough 变换方法,提取导航基准线,该算法处理 640 pixels × 480 pixels 像素的彩色图像平均用时 100 ms,正确识别率为 92%^[68]。

张红霞针对麦田图像中多列目标检测问题,提出基于水平线扫描的归类算法。首先对麦田彩色图像进行绿色强调,利用阈值分割方法提取苗列区域,而后对二值图像水平扫描,检测目标区域和目标点,根据目标点横坐标值的差值实现归类,最后利用过已知点的霍夫变换检测多列目标直线^[69]。

丁幼春提出一种农业车辆视觉导航路径识别算法—旋转投影算法,通过角度枚举对图像 ROI 实施旋转变换,由旋转后图像的列均值与枚举角度构成旋转投影矩阵 R,对其行向量实施差分运算得到差分旋转投影矩阵 Rd,由 Rd 的极值可确定图像导航路径,即航向偏差 θ 与航位偏差 d,进而可以求得世界坐标系下的导航路径参数,通过对不同条件下成熟小麦图像测试表明,该算法识别导航路径准确率达到 95%^[70],同时提出了一种基于单目彩色图像分割与立体视觉特征匹配相结合的障碍物检测方法^[71]。

姜国权提出基于最小二乘法检测早期作物行中心^[72]。曹倩提出