

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001

# 农业机械导航技术研究进展

张漫 季宇寒 李世超 曹如月 徐弘祯 张振乾

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 农业机械自动导航技术是实施精细农业的基础,可有效减轻农机操作人员的劳动强度,提高作业精度与作业效率。经典的农机自动导航关键技术包括定位测姿、路径规划和运动控制,针对这3项关键技术,分别阐述了基于全球导航卫星系统、惯性导航系统、机器视觉导航系统及多传感器信息融合的农机定位测姿方法,总结归纳了农机自动导航系统中的全局路径与局部路径规划算法,以及农机的运动学模型、导航决策控制方法、转向制动控制系统。随着信息技术的发展,农机智能导航技术受到越来越多的关注,保证作业安全与提高作业效率成为农机智能导航不同于传统自动导航的关键技术。以激光雷达和RGB相机为例综述了农机自主避障技术,并从协同导航模式、通信技术、协同控制、远程监控平台等角度阐明了多农机协同作业的关键技术。最后,结合无人农场和智慧农业对农机智能导航技术未来的发展方向进行了展望。

**关键词:** 农机导航; 定位测姿; 路径规划; 运动控制; 自主避障; 多机协同

中图分类号: S24; TP23 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0001-18

OSID:



## Research Progress of Agricultural Machinery Navigation Technology

ZHANG Man JI Yuhan LI Shichao CAO Ruyue XU Hongzhen ZHANG Zhenqian

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,  
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The automatic navigation technology of agricultural machinery is the basis for the implementation of precision agriculture, which can effectively reduce the labor intensity of agricultural machinery operators, improve the operation accuracy and efficiency. The classic automatic navigation of agricultural machinery includes three key technologies: positioning and attitude measurement, path planning and motion control. Based on the global navigation satellite system, the inertial navigation system, the machine vision navigation system and the multi-sensor data fusion algorithms, the methods of agricultural machinery positioning and attitude measurement were introduced firstly, and then the global path and local path planning algorithms in the agricultural machinery automatic navigation system were summarized, and the kinematic models, control methods and actuators for steering and braking were analyzed on agricultural machinery. With the development of information technology, the intelligent navigation technology of agricultural machinery had attracted more and more attention. Ensuring the safety of operation and improving the efficiency of cooperation were the key technologies of intelligent navigation of agricultural machinery different from traditional automatic navigation. LiDAR and RGB camera were taking as examples, the autonomous obstacle avoidance technology of agricultural machinery was analyzed, and the cooperative operation technology of multiple agricultural machinery was expounded, including cooperative mode, the perspectives of communication technology, cooperative controlling and remote management platform respectively. Finally, the future development direction of intelligent navigation technology for agricultural machinery was prospected with the specific example of "Hands Free Hectare" and smart agriculture.

**Key words:** agriculture machinery navigation; positioning and attitude measurement; path planning; motion control; autonomous obstacle avoidance; multi machine cooperation

收稿日期: 2020-02-19 修回日期: 2020-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)和国家自然科学基金项目(31571570)

作者简介: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

## 0 引言

农业机械自动驾驶技术是实施精细农业的基础,可以有效减轻农机操作人员的劳动强度,提高作业精度与作业效率<sup>[1-2]</sup>。目前,农机自动驾驶已广泛应用于耕作、播种、施肥、喷药、收获等农业生产过程<sup>[3]</sup>。

经典的农机自动驾驶关键技术包括导航位姿信息获取、导航路径规划和导航控制等。导航位姿信息的准确、可靠获取是路径规划与车体控制的前提条件<sup>[4-5]</sup>;优化的导航路径可有效减少资源浪费,如减少重复、遗漏作业,减少地头转弯路径等,提高作业效率<sup>[6-7]</sup>;快速、稳定的导航控制能够应对农田的复杂路面环境,实现对导航路径的准确跟踪<sup>[8-9]</sup>。国内外学者针对以上技术进行了广泛而深入的研究,取得了丰硕的成果。

随着农机作业速度的不断提高,作业任务的逐渐复杂,经典的农机自动驾驶技术已难以应对新形势下的安全性挑战和突破效率瓶颈。因此,智能农机导航技术逐渐成为研究热点。智能农机导航在经典农机自动驾驶框架的基础上,结合传感器、物联网、云计算、深度学习等技术,旨在提高农机在自动驾驶作业过程中的安全性与协同性,其核心技术包括自主避障与多机协同等。自主避障可实现对复杂农田环境中的机器、行人等障碍物的识别与避让,保证人机安全作业;多机协同可在复杂作业需求下,通过对农机状态信息监测,进行任务调配、多机路径规划,提高农农机群整体作业效率。

本文分析国内外农机自动驾驶技术研究进展,在对农机定位测姿、路径规划、运动控制等经典导航关键技术进行总结分析的基础上,阐述自主避障和多机协同等智能导航关键技术的发展趋势,并结合无人农场与智慧农业,对农机智能导航技术未来应用场景进行展望。

## 1 自动驾驶关键技术

### 1.1 定位测姿

国内外学者针对全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)、惯性导航系统(Inertial navigation system, INS)和机器视觉(Machine vision, MV)导航系统进行了深入的研究,主要进展如下。

#### 1.1.1 全球导航卫星系统

目前,全球导航卫星系统主要包括美国的GPS系统(Global positioning system)、俄罗斯的GLONASS系统(Global navigation satellite system)、

欧盟的Galileo系统和中国的北斗导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)。其中,北斗导航系统自2012年正式向亚太大部分地区提供区域服务,2019年北斗导航系统全球组网进入冲刺期,2020年可按计划提供全球范围的定位、导航、授时等服务。闫飞等<sup>[10]</sup>采用多频三星接收机和多星座接收模块,通过BDS和GPS数据,得到更多的卫星可见数和更稳定的信噪比。

为实现农机自动驾驶过程中的精细作业,需要获取分米级甚至厘米级的定位数据,常采用差分GNSS技术,即通过将位置已知基准站测量的伪距修正值或相位信息发送到移动站来提高精度。OKSANEN等<sup>[11]</sup>设计了一台采用GNSS信号为引导的四轮驱动农业拖拉机,考虑了当前位置、速度、航向和调控角度对导航的影响。罗锡文等<sup>[12]</sup>基于东方红拖拉机,采用自主差分方式,开发了基于RTK-DGPS的自动驾驶控制系统,设计了导航控制器、转向控制器和转向装置等。

通过GNSS接收机还可得到农机的航向信息,根据测量原理,分为双天线测向法和单天线测向法,表1对两种GNSS测向方法进行了对比。

表1 GNSS测向方法

Tab.1 Heading measurement methods based on GNSS

天线配置	航向基线	测量姿态	优点	缺点
双天线	横向	航向角、 横滚角	不受农机运动 速度影响	移动站需两套 GNSS采集硬件、 成本较高
	纵向	航向角、 俯仰角		
单天线	运动方向	航向角	不增加额外的 硬件成本	速度过低会导致 航向测量误差较大

O'CONNOR等<sup>[13]</sup>将RTK-GPS应用于农机导航中,并使用了四天线GPS系统为拖拉机提供位姿信息。刘兆朋等<sup>[14]</sup>在山地隙喷雾机顶端横向安装GNSS双天线,可同时实现对位置信息、航向信息的直接测量。

GNSS可提供全天时、全天候的绝对位置与航向信息,但极端天气或遮挡造成的GNSS信号丢失,限制了其在复杂农田环境中的应用。

#### 1.1.2 惯性导航系统

惯性导航系统是以陀螺仪和加速度计为敏感元件的相对参数解算系统,不依赖于外部信息、也不向外部辐射能量,通过航迹推测获取位置与姿态。

##### (1) 陀螺仪

陀螺仪基于惯性原理,输出参考轴向的角速度,

通过积分计算出角度。目前,陀螺仪主要包括机械陀螺仪、光纤陀螺仪和微机电陀螺仪。表2对比了3种陀螺仪的特性。

表2 3种陀螺仪特性对比

Tab.2 Comparison of characteristics of three kinds of gyroscopes

类型	测量原理	优点	缺点
机械陀螺仪	角动量守恒	精度高	制造维护困难、成本较高
光纤陀螺仪	萨格纳克效应	精度高、灵敏度好、可靠性高	成本较高
微机电陀螺仪	科氏力	体积小、能耗低	精度较低

由于陀螺仪测量角度的本质在于对角速度积分,故具有漂移误差,且陀螺仪受温度影响较大,所以需要温度变化进行补偿。

#### (2) 加速度计

加速度计基于惯性原理,可输出参考轴向的加速度,通过积分计算出速度,通过二次积分计算出位移。加速度计具有较好的偏差稳定性,以及对冲击、振动和温度适应性,且成本较低,因而广泛应用于惯性测量系统。

#### (3) 磁偏计

磁偏计通过检测地球磁场,输出行进方向与磁北的偏角,是航姿参考系统(Attitude and heading reference system, AHRS)等设备的重要航向参考。磁偏计的主要误差包括:自身误差、地磁场变化、周围环境磁效应等,需要进行磁场映射校准,以降低环境干扰。

#### (4) 捷联惯导

捷联惯导(Strapdown inertial navigation system, SINS)是典型的INS设备,其将陀螺仪、加速度计、磁偏计按笛卡尔空间直角坐标系三轴方向组合,构成复合式传感器。表3为3种捷联惯导的特性对比。

表3 3种捷联惯导特性对比

Tab.3 Comparison of characteristics of three kinds of SINS

类型	敏感器件	输出
惯性测量单元	陀螺仪、加速度计	角速度、加速度
垂直陀螺	陀螺仪、加速度计	角速度、加速度、横滚角、俯仰角
航姿参考系统	陀螺仪、加速度计、磁偏计	角速度、加速度、横滚角、俯仰角、航向角

NOGUCHI等<sup>[15]</sup>提出了一种由RTK-GPS、光纤陀螺仪和惯性测量装置组成的导航传感器,同时获取农机的位置、航向、姿态信息,并校正偏差。朱忠祥等<sup>[16]</sup>设计了基于加速度计、陀螺仪、电子罗盘

的航迹推算系统,并结合GPS定位,通过卡尔曼滤波器估计姿态,获得了厘米级定位精度。

INS可提供高精度、高频率姿态数据,通过航迹推测获得位置,但温度与积分产生的漂移导致其长时间工作精度无法保证。

#### 1.1.3 机器视觉导航系统

机器视觉具有成本低、信息丰富等特点,适用于不规则地块或信号遮挡环境。采用视觉导航时,通常将视觉传感器安装在农机驾驶室上方,采集农机前方图像信息,通过预处理、作物行检测,最终提取导航基准线。

##### (1) 图像预处理

农田环境下天气、杂草、阴影、非目标区域等因素会对作物行检测产生干扰,直接检测较难获得理想效果。通过特殊波段视觉传感器<sup>[17-18]</sup>或灰度化特征因子<sup>[19-20]</sup>可增大目标区域和非目标区域的颜色区分;通过将RGB色彩模型转换为HSV、HSI、YCbCr等色彩模型<sup>[21-22]</sup>可消除部分阴影干扰;通过合理设置图像中待处理的感兴趣区域(Region of interest, ROI)可减少非目标作物行的干扰,同时降低计算量<sup>[23]</sup>。

##### (2) 作物行检测

目前国内外对于作物行提取方法已展开了大量研究,主要包括垂直投影<sup>[24]</sup>、Hough变换<sup>[25]</sup>、线性回归<sup>[26]</sup>、立体视觉<sup>[27]</sup>等,特点如表4所示。

表4 作物行检测方法特点

Tab.4 Characteristics of crop row detection methods

检测方法	优点	缺点
垂直投影	计算简单,抗噪声效果好	受杂草影响较大
Hough变换	抗干扰能力强	复杂度较高、耗时较长
线性回归	计算简单	受噪声影响较大
立体视觉	深度信息受光线影响较小	计算量大、只适用于较高的作物

目前,视觉导航技术已经应用到自动施药<sup>[28]</sup>、自动除草<sup>[29]</sup>、自动收割<sup>[30]</sup>等方面,但由于农田环境对图像采集稳定性的影响,仍存在图像模糊、信息缺失等问题,视觉导航技术鲁棒性需要进一步提高。

#### 1.1.4 多传感器信息融合

单一传感器都有一定的局限性,为提高导航定位精度和可靠性,常采用多传感器融合。多传感器信息融合,指利用各传感器的优势特征,构成数据冗余或数据互补特性,提高测量结果的鲁棒性和准确性。

多传感器信息融合是一个多层次、多级别的处理过程。根据数据和处理的复杂程度来对融合级别分类,可分为数据级融合、特征级融合和决策级融

合,性能分析如表5所示。3个融合级别各有利弊,需要根据系统所需的融合精度与实时性需求合理选择融合级别。

表5 多传感器融合级别

Tab.5 Multi-sensor fusion level

融合级别	层次	优点	缺点
数据级融合	低	信息丢失量较少、融合精度最高	复杂度高、实时性差、抗干扰能力差
特征级融合	中	实时性较好、通信要求较低	损失部分信息、融合性能下降
决策级融合	高	实时性好、抗干扰能力强	信息丢失量最大、相对精度最低

在农田复杂的非结构化环境中,地形、光照、气候条件多变,使用GNSS、INS、MV单独提供的农机位姿信息均有一定局限性,如:GNSS受遮挡产生信号丢失、INS随时间不可避免的漂移、MV受外界光照和阴影的影响等。因此,单传感器难以应对复杂的农田环境,多传感器间的数据融合是必要手段。

表7 多传感器信息融合算法及其特点

Tab.7 Characteristics of multisensor fusion algorithm

算法类别	算法	特点
随机方法	加权法	简单直观、计算量小、实时性好、测量方差具有不确定性
	贝叶斯估计法	利用概率规则进行学习或推理,结果为随机变量的概率分布
	DS证据推理法	不需要先验概率和条件概率密度,人为因素较大
	产生式规则法	采用符号表示特征与信息间联系,修改相对困难
	卡尔曼滤波	考虑系统噪声,不断迭代提供最优状态估计,仅适用于线性模型
人工智能方法	模糊逻辑推理	处理非精确描述问题,在信息很少的情况下效果较佳
	人工神经网络法	非线性映射、大规模并行处理、容错性好、速度、泛化性差
	群智能算法	无需全局模型,分布式,解决优化问题

目前,在农机导航系统中应用的信息融合方法,应用广泛的是卡尔曼滤波与粒子滤波。

表8归纳了卡尔曼滤波器及粒子滤波器的特性。

表8 融合算法特性对比

Tab.8 Comparison of fusion algorithms

多传感器融合算法	模型线性度	随机变量分布	时间成本
卡尔曼滤波(KF)	线性	高斯分布	低
扩展卡尔曼滤波(EKF)	局部线性	高斯分布	低或中
无迹卡尔曼滤波(UKF)	非线性	高斯分布	中
粒子滤波(PF)	非线性	任意分布	高

注:扩展卡尔曼滤波时间成本取决于雅可比矩阵求解难易程度。

## 1.2 路径规划

对于复杂农田作业环境下的农业机械,路径规划是农机根据已知作业信息和环境信息,并结合自身传感器对动态环境信息的感知,按照某一性能指标(如距离、时间等),自行规划出一条安全无碰撞的运动路线,同时高效地完成作业任务。根据环境信息的掌握情况,路径规划可分为全局路径规划和

表6对3种定位测向传感器的特点进行了分析比较。

由表6可知,GNSS/INS具有良好的数据互补特性,适用于农机在农田环境中的定位测姿。刘进一等<sup>[31]</sup>采用全球导航卫星系统、微机械惯性测量单元及航位推算相融合的组合导航定位系统,通过改进的自适应系统协方差矩阵的扩展卡尔曼滤波算法融合导航。张京等<sup>[32]</sup>提出了一种以GNSS信号与航向角变化幅度信息为指导的INS与GNSS航向信息融合策略。

表6 3种传感器特点

Tab.6 Characteristics of three kinds of sensors

传感器	定位参考	数据漂移	测量频率/Hz	环境适应性
GNSS	绝对	无	1~20	受遮挡影响
INS	相对	有	100~400	不受外界影响
MV	相对	无	1~50	受光照、阴影影响

多传感器信息融合的几种主要方法如表7所示。

局部路径规划<sup>[33]</sup>。

### 1.2.1 全局路径规划

全局路径规划是在环境信息已知的情况下,基于先验完全信息的路径规划方法。全局路径规划算法注重寻求最优解,设计目标是使规划路径尽可能达到最优,主要包括可视图法<sup>[34-35]</sup>、切线图法<sup>[36]</sup>、Voronoi图法<sup>[37]</sup>、自由空间法<sup>[38]</sup>、栅格法<sup>[39]</sup>等,几种算法的特点如表9所示。

### 1.2.2 局部路径规划

局部路径规划是在环境信息完全或部分未知的情况下,根据传感器信息获取农机自身与环境障碍物信息进行的实时路径规划。局部路径规划算法注重路径安全性与实时性,以提高农机避障能力。目前已有方法主要包括动态窗口法<sup>[40]</sup>、人工势场法<sup>[41-42]</sup>、模糊控制算法<sup>[43-44]</sup>、人工神经网络<sup>[45-46]</sup>、A\*算法<sup>[47-48]</sup>、遗传算法<sup>[49]</sup>、模拟退火算法<sup>[50]</sup>、蚁群优化算法<sup>[51-52]</sup>和粒子群算法<sup>[53]</sup>等,几种算法的特点如表10所示。

表 9 全局路径规划算法对比

Tab.9 Comparison of global path planning algorithms

算法	优点	缺点
可视图法	直观明了,易求得最短路径	缺乏灵活性,局部路径规划能力差
切线图法	路径较短	安全性较低
Voronoi 图法	有效避障,安全性较高	路径增长时,重绘图比较费时
自由空间法	应变性,不需要整个图的重绘	障碍物多时会加大算法的复杂度,算法实现困难
栅格法	直观明了,安全系数高	不易解决复杂环境信息的问题

表 10 局部路径规划算法对比

Tab.10 Comparison of local path planning algorithms

算法	优点	缺点
动态窗口法	充分考虑了物理限制、环境约束以及当前速度等因素,鲁棒性好	障碍物多时长度增加,速度和安全性不能兼顾
人工势场法	结构简单,容易做到实时控制	存在局部最优解问题
模糊控制算法	计算量较小,鲁棒性好	应变性差
人工神经网络	学习能力强,鲁棒性好	泛化能力差
A* 算法	具有最优性、完备性和高效性	未考虑实际的运动和消耗,可能损耗更多能量
遗传算法	全局搜索能力强,易与其他算法结合	存在局部最优解问题
模拟退火算法	描述简单,初始条件限制少,运行效率高	收敛速度慢,具有一定的随机性
蚁群优化算法	易于实现,具有全局优化能力和并行性	计算量大,存在局部最优解问题
粒子群算法	收敛速度快,算法简单、鲁棒性好	存在局部最优解问题,粒子多样性容易受参数影响

通过对比分析可知,全局路径规划算法和局部路径规划算法在实时性、鲁棒性和安全性等方面各有特点,实际使用时,要根据具体的作业环境和作业要求采用不同的路径规划方法,从而规划出一条安全高效、全局近似最优的作业路径。

### 1.3 运动控制

经过规划的导航路径是农机作业的期望轨迹,为实现导航路径的跟踪控制,需要在农机运动模型、导航决策控制以及转向与制动控制等方面开展研究。

#### 1.3.1 运动模型

在复杂农田环境下,运动模型的准确性将直接影响农机导航作业的精度。农机导航广泛应用的运动学模型有阿克曼四轮车模型和简化二轮车模型,其特征如表 11 所示。

由表 11 可知,阿克曼四轮车模型适用于更复杂的水田作业场景,在旱地作业中,简化二轮车模型具有简单实用的优势。陈哲明等<sup>[54]</sup>针对传统四轮转向系统,根据阿克曼转向定理,设计了能够改善转向运动协调性和操纵稳定性的控制策略。白晓平等<sup>[55]</sup>提出了一种农机导航自校正模型控制方法,采

表 11 农机运动学模型特征对比

Tab.11 Comparison of kinematic model of agricultural machinery

运动学模型	优点	缺点
阿克曼四轮车模型	接近农机实际情况	复杂度高、自由度多、参数间存在耦合
简化二轮车模型	参数简明,实用性强	不适用于轮胎存在侧向滑动或左右轮不对称情况

用简化二轮车模型设计了控制律,提高了稳定性和快速响应性。

#### 1.3.2 导航决策控制

导航决策控制是导航系统的核心,期望转向角的决策是否合理,直接影响后续的转向执行动作,进而影响整个导航系统的性能,其基本原理如图 1 所示。

由于农田作业环境复杂多变,农机自身大延迟、大惯性和高度非线性特征,使导航决策控制算法需具备一定的自适应性和鲁棒性。常用的农机导航控制方法包括 PID 控制、模糊控制、纯追踪控制、滑模变结构控制、最优控制和模型预测等,对比分析如

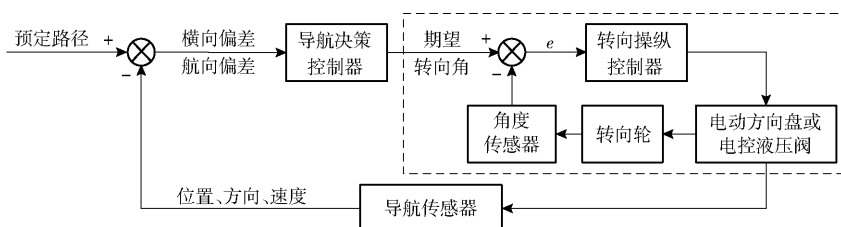


图 1 导航决策控制原理图

Fig. 1 Schematic of navigation decision control

表 12 所示。丁幼春等<sup>[56]</sup> 基于免疫 PID 方法设计了小型履带式油菜播种机导航控制器,提升了响应速度,并减小了跟随偏差。张雁等<sup>[8]</sup> 针对自主导航水稻直播机,构建了一种模糊自适应控制方法,提高了导航精度和动态性能。王辉等<sup>[57]</sup> 采用预瞄追踪模型进行农机导航控制,提高了路面适应性和上线动态性

能。焦俊等<sup>[58]</sup> 构建了等效控制和切换控制组成的自适应滑模控制,提升了导航精度。李逃昌等<sup>[59]</sup> 基于 Frenet 坐标系构建了运动学模型,并根据反馈线性化和线性二次型调节器设计了最优控制律。刘正铎等<sup>[60]</sup> 基于线性模型预测控制方法,将松弛因子引入目标函数,实现了偏差快速回调的优化控制。

表 12 控制方法特征比较

Tab. 12 Comparison of control method characteristics

控制方法	是否建模	优点	缺点	适用系统
PID 控制	否	鲁棒性强、结构简单且易实现	超调量和响应时间存在矛盾	线性
模糊控制	否	对参数变化鲁棒性和适应性强	规则选择缺乏系统性	非线性
纯追踪控制	是	控制参数少、稳定性强	结构固定、性能优化较困难	非线性
滑模变结构控制	是	抗摄动和抗干扰能力强、响应快	存在抖振现象	非线性
最优控制	是	可以使性能指标达到最优	依赖模型精确性	非线性
模型预测	是	能及时弥补不确定性、增强稳定性	计算负担大、易陷入最小解	非线性

综上,传统的算法大多存在一些问题,如:PID 控制由于其控制参数固定,当遇到非线性、时变和结构不确定系统,控制效果并不理想;模糊控制规则需要根据专家经验进行判定;滑模变结构控制方法需采用一定手段消弱抖振。针对这些问题,也有研究人员提供了新的思路,尝试将不同的控制方法结合,优势互补以得到更好的控制效果。唐小涛等<sup>[61]</sup> 采用模糊算法动态确定纯追踪模型的前视距离,实现了精准平稳的跟踪效果。籍颖等<sup>[62]</sup> 为了消弱滑

模控制的颤抖现象,采用模糊控制方法改进了滑模变结构控制系统,提高了系统控制准确性和鲁棒性。

### 1.3.3 转向与制动控制

#### (1) 转向控制

转向控制系统是导航系统的执行部分,其原理如图 1 中虚线框所示。目前广泛应用的转向方式包括电动方向盘转向和电控液压阀转向,性能对比如表 13 所示。

表 13 转向控制系统性能对比

Tab. 13 Comparison of steering control system

转向控制系统	工作原理	优点	缺点
电动方向盘	加装电机驱动方向盘转动	安装灵活、维护简单	方向盘存在转动余量,精度较低
电控液压阀	加装电控比例换向液压阀驱动车轮	精度较高、响应快	后装难度较大

在农机平台,电动方向盘相对电控液压转向,容易改装且便于移植,而电控液压转向的控制精度较高。张漫等<sup>[63]</sup> 通过 PLC 和步进电机控制方向盘转动,进而实现农机自动导航。李伟等<sup>[64]</sup> 为提高喷雾剂的机动性能和作业效率,设计了全液压多轮转向系统,并提出了基于 PID 控制方法的四轮转向系统控制方法。

#### (2) 制动控制

在导航过程中,制动控制模块一方面用于紧急情况下的及时停车,另一方面用于农机作业行驶速度的协助控制。王致情<sup>[65]</sup> 使用数字信号处理器的 I/O 端口输出高低电平,并配合继电器电路控制电动推杆的正反转,实现了推杆对制动踏板的往返控制。

## 2 智能导航技术

近年来,随着传感器技术、深度学习算法、物联

网和云计算等的突破性进展,智能农机导航及其相关技术成为新的研究热点。

自主避障与多机协同技术是智能导航技术重要的研究方向<sup>[66]</sup>。前者保证了智能农机在复杂农田环境中的作业安全,后者提高了智能导航农机的作业效率。本文主要分析自主避障与多机协同两项技术的研究现状与发展趋势。

### 2.1 自主避障

自主避障技术可使农机在复杂农田环境中,仅通过自身车载传感器感知、检测、识别障碍物,为局部避障路径的合理规划提供可靠依据。

农田是典型的非结构化环境,具有地面不平整、障碍物种类多等特点,增加了传感器环境感知、障碍物检测与识别、避障行为决策等环节的难度。农田环境感知传感器及性能分析如表 14 所示。

表 14 农田环境感知传感器及性能分析

Tab. 14 Performance analysis of farmland environmental sensors

传感器	类型	优点	缺点
激光雷达	主动式	精度高、频率高、范围大	成本高
毫米波雷达	主动式	穿透性好、环境适应性好	分辨率较低、小尺寸绕射干扰
超声波阵列	主动式	体积小、成本低	方向性差、易受温度影响
RGB/深度相机	被动式	信息丰富、分辨率高、成本低	易受外界光照、阴影等影响
红外相机	被动式	可辨别具有温度差异的障碍	易受环境温度影响

通过对比上述传感器的性能、成本和适用情景等,归纳激光雷达与 RGB 相机在农田数据采集,以及障碍物检测、识别、跟踪的相关研究成果与发展趋势。

### 2.1.1 激光雷达

激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)探测周围环境中目标点与自身的距离,结合测量角度,获得目标点的极坐标位置。表 15 为激光雷达分类对比。

表 15 激光雷达分类及对比

Tab. 15 Classification and comparison of LiDAR

分类标准	类型	优点	缺点
飞行时间	结构光	精度高、速度快、距离远	近距离测量效果差
		分辨率高	环境适应性差,存在互相干扰
测距原理	三角测距	成本较低	测量精度较低
	二维	扫描频率高	数据维度单一
测量维度	三维	三维空间数据丰富	扫描线数提升成本高
	机械结构	机械	水平视场可达 360°
固态		扫描线数提升成本低	水平视场角范围较小

由表 15 可知,基于飞行时间原理的三维机械式激光雷达,能够适应农田复杂多变的光照情况,并提供高精度、高速率、广视角的三维点云。但其成本较高,国内外的智能农机平台多采用二维激光雷达<sup>[67-68]</sup>。目前,研发高线数、低成本的固态三维激光雷达已成为行业发展趋势。

激光雷达采集的点云,需先进行点云配准、点云去噪等预处理,再通过分割、聚类等算法检测障碍物,最终应用分类、跟踪算法实现障碍物识别。

#### (1) 点云配准

激光雷达采集的原始点云数据,是以视点为原点的极坐标点,需进行时间配准和空间配准,得到全局一致点云。时间配准可保证激光雷达与 GNSS/INS 采集时间的同步性,空间配准利用农机的位姿信息对点云进行坐标变换,获得全局一致的点云。

点云配准为农田动静态障碍物的识别及动态障碍物的跟踪提供了可靠数据基础。季宇寒等<sup>[69]</sup>搭建了基于三维激光雷达的农田环境信息采集系统,通过在农机上安装 GNSS/AHRS 获取位姿信息,对 GNSS 定位和点云数据偏差进行姿态补偿。

#### (2) 点云去噪

激光雷达受自身与外界因素的影响,点云存在噪声,需进行滤波去噪。点云噪声主要表现为:漂移点、孤立点、冗余点、混杂点等。其中,前 3 种噪声具有较明显的密度或距离特征,比较容易去除。混杂点与正确点云易混淆,通常采用平滑算法进行修正。表 16 对点云平滑滤波算法进行了总结。

表 16 点云平滑滤波算法

Tab. 16 Filtering algorithms for smoothing point cloud

点云种类	滤波算法	算法原理
有序点云	中值滤波	用中值代替点云序列中心位置的值
	均值滤波	用统计平均值代替点云序列中心位置的点云
	高斯滤波	假设点云服从高斯分布,邻域点加权平均
	维纳滤波	根据最小均方误差准则求得最佳线性滤波器
无序点云	拉普拉斯滤波	将高频几何噪声能量扩散到局部邻域
	双边滤波	利用邻域点的距离与法线方向等加权平均
	平均曲率流滤波	利用曲率流引导对网络模型的平滑
	均值漂移滤波	将点云沿梯度方向移动至其梯度为零

由表 16 可知,有序点云的点与点之间存在拓扑关系,滤波算法简单高效,实时性好。无序点云的点分布散乱,滤波算法复杂,实时性差。智能农机自主避障对实时性要求较高,有序点云滤波算法有更实际的研究与应用价值。

#### (3) 点云分割

经过预处理的点云仍可能包含非障碍点云,如:超出距离范围的点云、农机自身的点云、地面点云等,需进行分割剔除。表 17 归纳了非障碍点云分割剔除的算法。

由表 17 可知,对前两类非障碍点云,使用合理

表 17 点云分割算法

Tab. 17 Segmentation algorithms for removing outlier of point cloud

非障碍点云种类	特征	分割算法
超出距离范围的点云	距离超出阈值、稀疏点	直通滤波 方盒滤波
	相对位置不变、冗余点	直通滤波 方盒滤波
农机自身的点云		高度变化阈值
地面点云	紧密连接障碍物、干扰点	平面模型拟合 网格区域生长

的经验阈值分割即可获得较好效果。地面点云与障碍物点云紧密连接,干扰后续点云聚类效果。国内外学者针对不同的场景提出多种方法,如:斯坦福大学的 stanley 无人车,先通过投影法获得前方道路点云高度栅格图,后利用相邻栅格的高度差和一阶马尔科夫模型实现地面点云的快速分割<sup>[70]</sup>。董敏等<sup>[71]</sup>提出了基于三维网格图的点云分离方法,通过找到地面基准点并将地面属性蔓延至其他各点,实现地面点的分离。

#### (4) 点云聚类

经过地面点云分割的点云,按照特定的聚类规则分成相互独立的簇,即完成农田障碍物的检测。聚类算法根据聚类规则的不同,分为基于划分、层次、密度、模型等,表 18 总结了点云聚类算法及其特点。

表 18 点云聚类算法

Tab. 18 Clustering algorithms of point cloud

聚类规则	特点	聚类算法
划分	时间空间复杂度低、容易陷入局部最优	欧氏聚类、K-means 聚类
层次	可解释性好、时间复杂度高	区域生长聚类、超体素聚类
密度	噪声不敏感、任意形状聚类、参数敏感	DBSCAN 聚类
模型	针对符合模型特性点云进行特异性识别	基于几何模型聚类

国内外学者主要采用基于划分和基于密度的聚类方法,前者具有很高的时间空间效率,后者在参数合适的情况下,具有良好的密度适应性并具有一定抗噪能力。基于层次的聚类主要应用于离线系统下的点云聚类。基于模型的点云聚类主要应用于已知点云分布模型的前提下。BEHLEY 等<sup>[72]</sup>针对三维点云数据,提出了基于改进的索引八叉树的半径邻域检索法,通过在聚类过程中对不相关子树进行剪枝,提高半径邻域检索的速度。刘家银等<sup>[73]</sup>针对非结构化环境的负障碍物检测问题,根据贝叶斯法则

进行多帧特征点对融合,采用 DBSCAN 对融合后点对进行聚类和过滤。

#### (5) 障碍物分类

通过聚类获得障碍物团簇,为进一步确定障碍物的类别,需要对聚类团簇进行特征提取与分类。根据选取特征是否是人为定义,可将特征分为人工特征与学习特征。表 19 归纳了点云团簇的人工特征及其特点。

表 19 点云团簇的人工特征

Tab. 19 Artificial characteristics of point cloud clusters

类型	常见特征	特点
几何特征	质心、密度、圆形度、包围盒尺寸、中心等	提取简单、快速,无法精确分类
	占据栅格、动静态标记、运动矢量	仅区分动静态障碍,无法区分种类
特征描述子	VFH、FPFH、RoPs	刚体变换不变性、抗密度干扰性、抗噪

学习特征是通过有监督的机器学习算法自动归纳的特征。目前,点云分类应用的传统机器学习分类器包括 Adaboost<sup>[74]</sup>、SVM<sup>[75]</sup>等。随着深度学习发展,直接使用三维点云数据进行训练与验证的深度学习算法已成为新的发展趋势<sup>[76]</sup>。

#### (6) 障碍物跟踪

通过对障碍物的形状、位置、运动等状态进行识别后,利用相同障碍物特征自相关度高于不同障碍物的特点,对相邻帧间的相同障碍物进行关联,最终实现对运动障碍物的跟踪。

障碍物跟踪的关键算法为数据关联与跟踪算法。其中,经典的数据关联算法包括概率统计与确定性方法,根据障碍物属性合理构造特征向量十分关键。跟踪算法最常见的依然是卡尔曼滤波<sup>[77]</sup>、粒子滤波等传统状态估计方法。通过对比多帧数据中障碍物的位置与速度变化,确定障碍物的静动态属性,进而确定动态障碍物的航迹起点、运动矢量、航迹终点等。

### 2.1.2 RGB 相机

以 RGB 相机为代表的机器视觉,以其设备价格低、便于安装、数据信息量丰富、且处理算法较为成熟的特点,在农机自动驾驶避障方面有着广泛的研究与应用。首先,使用相机获取彩色图像,后对图像进行预处理、运动目标检测、运动目标追踪等步骤,最终从图像中获得障碍物信息。

#### (1) 图像获取

在农机自动驾驶避障方面,图像的获取常使用单目相机<sup>[78]</sup>、双目相机<sup>[79]</sup>或全景相机<sup>[80-83]</sup>,其获取图像的优缺点如表 20 所示。



表 20 3种相机设备的优缺点对比

Tab. 20 Advantages and disadvantages of three camera devices

类型	优点	缺点
单目相机	成本最低,设备安装简便,数据量较小,处理速度快	视野最狭窄,单目测距误差较大,较难满足作业需求
双目相机	视野范围较大,双目测距误差较小,可以满足大多数作业需求,成本较低	数据量较大,处理耗时较大,视野范围较狭窄
全景相机	视野范围最大,实现全景避障,多镜头可实现测距	成本较高,数据量最大,处理耗时最长

目前,在农机自动驾驶避障方面,凭借价格低廉、测距较为准确等优点,双目相机得到了较多的应用,技术较为成熟。而全景相机因其超广角的视野

表 21 主要障碍物检测方法的优缺点对比

Tab. 21 Advantages and disadvantages of main obstacle detection methods

方法	主要优点	主要缺点	能否在静态背景下检测		能否在动态背景下检测		能否较完整提取障碍物
			静止目标	运动目标	静止目标	运动目标	
阈值分割法	算法简单,能较完整提取出障碍物	通用性较差	能	能	能	能	能
背景差分法	算法简单,能较完整提取出障碍物	对背景模型的建立效果要求较高	能	能	不能	不能	能
帧差法	算法简单,能较完整提取出障碍物	若背景发生变化,则检测效果差	不能	能	不能	不能	能
光流法	针对静态背景与动态背景皆有较好的检测效果,适用性广、灵活	计算复杂度高,耗时较长,难以完整提取出障碍物	不能	能	不能	能	不能
机器学习	鲁棒性强,能够检测出多种环境下的障碍物	计算复杂度高,需要预先知道障碍物的信息,对于样本的选取要求较高	能	能	能	能	能

景图像的差异,选定合适的阈值,分割出前景障碍物。该方法计算简单,但对于纹理、颜色复杂的图像则效果较差。侯之旭等<sup>[87]</sup>提出一种基于彩色图像分割的障碍物检测方法。

背景差分法:通过建立背景模型,从图像中将背景减去,提取出前景目标。该方法计算简单,但对背景建模的要求较高,且动态背景下难以检测到运动目标。LIU等<sup>[88]</sup>提出一种基于背景差分,与Otsu、形态学运算相结合的运动目标检测算法。

帧差法:通过连续两帧图像差分,从而获得运动的前景目标。该方法操作简单,但对于动态背景,难以检测到运动目标,需要通过多种补偿才能取得较好的效果<sup>[89-90]</sup>。

光流法:通过算法追踪图像中的像素点或检测出的特征点,实现运动目标的检测<sup>[91]</sup>。该方法适用性广、灵活,能够检测多种情况下的障碍物,但计算复杂度较高,且不能完整提取出障碍目标。YANG

范围,有着良好的发展前景。

### (2) 图像预处理

在实际农田作业环境下,光照、灰尘、相机抖动等都对图像有着较大的影响,进而影响障碍物的检测效果。可以通过使用特殊的颜色空间模型<sup>[84]</sup>、光线自适应法<sup>[85]</sup>以及图像复原<sup>[86]</sup>等进行图像预处理,提高成像质量。

### (3) 障碍目标检测

农机在农田作业时,可能遇到多种障碍目标,如运动的人、其他农机等。目前,常用于图像中障碍目标检测的方法有阈值分割法、背景差分法、帧差法、光流法以及机器学习等方法。上述方法在障碍物检测方面的主要优缺点如表 21 所示。

阈值分割法:通过图像中障碍目标的颜色与背

景<sup>[92]</sup>使用 Lucas-Kanade 光流法在景深全景图像中进行行人检测。

机器学习<sup>[93-94]</sup>:通过机器学习的方法,对农田中可能会出现障碍物进行检测。机器学习方法具有无需考虑模型、识别分类准确率高等优点,但同时也有分类器学习网络设计复杂、训练时间长等缺点。

### (4) 障碍目标跟踪

在检测并确定障碍目标后,可以通过核函数<sup>[95]</sup>、Camshift<sup>[96]</sup>等算法实现对障碍目标的跟踪。

综上,激光雷达与机器视觉在农机自动驾驶避障方面的研究与应用,受到国内外学者的广泛关注,取得了很好的效果。但仍存在数据易受环境干扰、数据量大、实时性差等问题,针对检测算法的鲁棒性还需要进一步提高。

## 2.2 多机协同作业

随着中国农业集约化、规模化、产业化发展,以及导航作业需求的提高,多机协同导航成为农机

导航研究的热点。多机协同导航系统由一个主机、多个从机和一个远程服务器端构成,系统示意图如图2所示。主机在前方引导作业,各从机通过车间通信和远程通信,实时接收来自主机或远程服务器任务指令,配合主机协同导航完成总体作业任务。

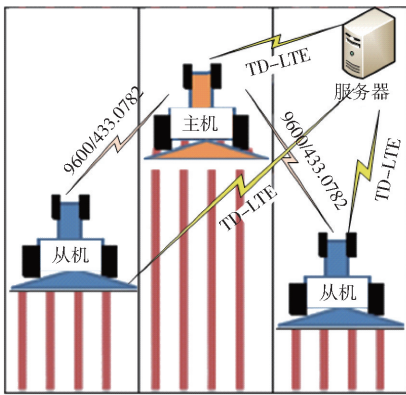


图2 多机协同导航系统示意图

Fig.2 Schematic of multi machine cooperative navigation system

目前,国内的研究工作主要集中于单一农机自动导航作业,关于多机协同导航技术的研究相对较少。国外在多机协同导航领域研究起步较早,取得了一定研究成果<sup>[97-98]</sup>。多机协同导航的关键技术涉及协同导航模式、通信技术、协同控制技术以及远程监控平台等。

### 2.2.1 协同导航模式

多机协同作业模式主要分为跟随型协同作业模式和命令型协同作业模式<sup>[99-100]</sup>。

跟随型协同作业,即以多机中的一台为主机,其他农机为从机。从机以预定的相对距离和角度跟随主机作业。例如,多台同种旋耕机可以进行跟随型协同作业,以其中一台作为主机,其余旋耕机作为从机,以不同相对位置跟随主机协同完成旋耕任务。

命令型协同作业,即远程监控平台发布总体任务,命令各农机去特定区域执行作业任务。主机根据作业任务,基于此目标作业区域信息和当前位置、航向进行全局路径规划,并考虑自身需求向从机发布子任务。各从机接收到子任务,通过任务完成代价对比,由代价相对较低的从机完成相应子任务。例如,打捆机利用自身导航系统确定草捆的位置,并通过无线网络发送给各草捆运送机,各草捆运送机根据自身及草捆的位置信息进行路径规划,路径最优者获得该任务,并通过自身导航系统完成草捆运送,实现命令型协同作业。

### 2.2.2 通信技术

协同导航的通信任务,涉及底层通信、车间通信和远程通信3部分。

#### (1) 底层通信

底层通信是导航系统内部各传感器与控制终端的通信。在底层通信技术方面,由于各控制系统均有独立的ECU作为控制单元,随着电控技术应用领域的不断拓宽,传统点对点的通信方式已很难适应现代农机智能导航对于多节点控制系统的需求。

目前底层通信的主流实现方案为控制器局域网总线(Controller area network, CAN)。CAN总线可以实现众多电子单元之间的数据交换和共享,且线路简单、实时性好、抗干扰能力强、可靠性高,适用于复杂农田环境下的农机智能导航数据通信。刘阳<sup>[101]</sup>为拖拉机自动导航系统开发了CAN总线网络,主要包括转向控制、播种和智能控制终端3个节点。

#### (2) 车间通信

要实现多机协同导航,多机之间的通信技术方案选取十分关键。短距离无线通信技术包括Bluetooth、IrDA、ZigBee、超宽带、数传电台等技术,在传输速度、距离、耗电量、功能扩充以及单机应用方面各有优劣<sup>[102-103]</sup>。多机协同作业,各农机之间需要进行状态信息交互,LI等<sup>[104]</sup>设计了车间通信协议帧格式,进行状态信息传输。

#### (3) 远程通信

远程通信指作业农机与远程监控平台间的通信,主要用于控制命令的下发和农机状态信息的上传。目前,广泛应用的远距离无线通信技术为GPRS、4G和5G,目前4G应用较为广泛,未来5G将成为主流技术。李世超等<sup>[105]</sup>设计了远程通信协议,通过4G网络和无线通信模块实现了各农机信息与服务器之间双向通信。

### 2.2.3 协同控制

多机协同导航控制方法旨在协调控制多机协作过程中相互之间的位置关系,或根据任务需求协调从机配合主机共同完成作业。白晓平等<sup>[106]</sup>针对领航-跟随结构,结合反馈线性化及滑模控制理论设计了收获机群路径跟踪控制律和队形保持控制律。李翰博<sup>[107]</sup>针对动态竞争环境中的多自主车辆系统的协作控制与分布式优化问题,研究了车辆编队中的跟随和队形控制、道路交叉口区域多车协作以及自主车辆任务规划等协同控制方法。

综上,要实现高精度的田间协同导航作业,需要高性能的通信网络和协同控制方法。未来可以考虑5G在多机协同导航技术中的应用,此外还需加强多机地头转向时为避免冲突的协同控制方法研究。

### 2.2.4 远程监控平台

多机协同作业远程监控平台是多机协同导航系

统的重要组成部分,可以实现对区域内多机协同作业的实时远程监控,并对作业农机实现作业管理和调度管理<sup>[1,66,100]</sup>。

多机协同作业远程监控平台主要涉及农机与平台之间的远程通信、多机协同作业信息管理和多机协同调度管理<sup>[108]</sup>。远程监控平台利用无线网络与车载终端进行远程通信<sup>[105]</sup>,实现对多机协同作业的作业管理和调度管理。其中,作业管理主要涉及多机协同导航作业信息远程监测、作业进度实时分析以及作业质量在线评估等;调度管理主要是为了实现区域农田内的多机协同作业任务分配和路径规划。

目前,国内外很多大型农业机械均已安装远程监控终端<sup>[109-110]</sup>,但大多针对农机作业的远程监测和作业信息管理,对于区域内多个农机协同作业的调度管理,国内外的研究和应用相对较少。

多机协同作业远程管理调度<sup>[111]</sup>需要在多台农

机和多个作业地块间建立一种映射关系,综合考虑地块位置、任务数量、作业能力、路径代价和时间期限等因素,在满足实际作业约束条件的前提下,以最小化调度成本和损失为目标,生成最优的调度方案,使农机有序地为农田作业地块服务,从而实现区域内多机协同作业的调度管理。

### (1) 多机协同作业任务分配

多机协同作业任务分配的关键是在具有多个农机、多个任务的农田作业环境中,将多个任务合理地分配给各个农机,并且各个农机根据分配的任务寻找一条最优的作业序列,从而建立一个路径短、效率高、资源配置合理的调度模型。

目前,解决任务分配问题的方法<sup>[112-113]</sup>主要包括线性规划法<sup>[114]</sup>、市场机制法<sup>[115-116]</sup>、行为激励法<sup>[117]</sup>、情感招募法<sup>[118-119]</sup>、空闲链法<sup>[120]</sup>以及基于群体智能的方法<sup>[121-122]</sup>等,几种算法的优缺点如表22所示。

表22 任务分配方法性能对比

Tab. 22 Comparison of task allocation methods

方法	优点	缺点
线性规划法	易于理解分析,模型简单,求解效率高	实时性差
市场机制法	鲁棒性好,可扩展性,分配效率较高	系统通信负载较大
行为激励法	自适应能力较强,实时性、容错性和鲁棒性好,系统通信负载较小	分配效率较低,局部最优解问题
情感招募法	引入情感机制,无需彼此建模,灵活性好	模糊性、时变性、缺乏规律性
空闲链法	动态分配效果较好	存在限制条件
群体智能法	系统通信负载较小,灵活性和鲁棒性好	解的质量受参数影响

### (2) 多机协同作业路径规划

在多机协同作业过程中,农田作业环境中障碍物较多,农机之间也存在相互影响,成为彼此的障碍物,因此,多机协同作业路径规划难度较大,单一的路径规划算法无法得到很好的规划效果。

有研究将多种路径规划方法进行改进和整合<sup>[123-124]</sup>,取长补短,从而实现最优路径规划。要想解决复杂农田作业环境下的多机协同作业路径规划,需要在全局路径规划的前提下,进行局部路径的调整,不发生冲突时要保证全局规划最优,冲突发生时进行局部规划,冲突解决以后继续以全局最优进行再规划<sup>[125-126]</sup>。

多机协同作业任务分配和路径规划是多机协同导航系统研究的关键问题,高效合理的任务分配和路径规划可以提高整个系统的执行效率,同时降低执行代价。当前国内外的研究工作已经取得了一些成果<sup>[127]</sup>,研究方法也在不断的创新,但是还有一些问题亟待解决。由于农田作业环境具有复杂性和动态性,多机协同作业对任务分配和路径规划方法提出了更高的要求,主要集中在以下几方面:任务分配

和路径规划的动态性和实时性问题;复杂任务的分解问题;农机-任务的供需匹配问题;实验室研究成果的推广应用问题等。

## 3 无人农场与智慧农业

随着人工智能、大数据、物联网等前沿技术的发展,农业生产方式从机械化向自动化、智能化迅速迈进。信息与通信技术也促进了精细农业技术体系的更新换代,新时代的精农业技术体系被称为精细农业2.0,也被称为“智慧农业”(Smart agriculture)。农业机器人不仅越发多元化、智能化,还推动了“无人农场”等新兴概念的出现。

智慧农业示意图如图3所示,远程管理系统实现任务规划和作业路径规划并发布,智能农机装备完成耕地、播种、施肥、喷药和收获等作业,全程实现无人管理。

全球首个“无人农场”诞生在英国,哈珀亚当斯大学(Harper Adams University)与精准决策公司(Precision Decisions)合作,推出了“Hands Free Hectare”项目,实现了全球第一批全程没有人工介

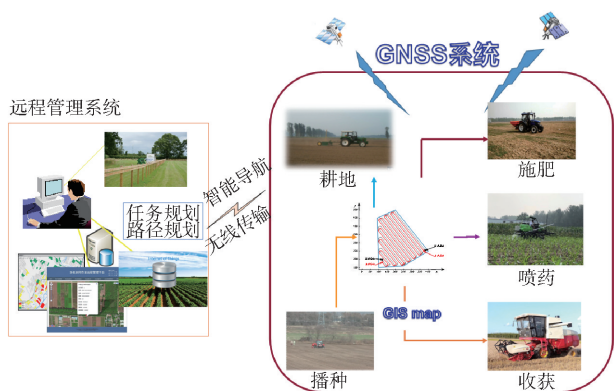


图3 智慧农业示意图

Fig. 3 Smart agriculture

人的大麦种植管理。在 $1\text{ hm}^2$ 的实验田内,实现了全过程自动化,整个种植过程不允许任何人进入农田,采用无人机进行作物长势检测,自动驾驶农机进行土壤采样、喷药等管理,自动驾驶联合收获机进行收获,整个过程只需要参与者在操作间完成。实验田的产量虽仅为 $4.5\text{ t/hm}^2$ ,低于人力密集型种植方式(平均产量为 $6.8\text{ t/hm}^2$ ),但为未来农业的发展指明了方向。

日本在政府的支持下,开展了智慧农业的研究与示范,在智慧农场示范区推广应用日本研发的智慧农业先进技术。主要技术包括:远程操控无人驾驶农业机械,无人机感知和人工智能相结合的精准施肥施药技术,适应无人智能农机的土地整治,智能手机在种植和养殖中的应用,农业大数据的共享与应用等。

我国从农业发展实际出发,大力研究、推广、应用智慧农业技术,我国北斗导航卫星系统的建设,助推了智慧农业,农机智能导航技术的研发与应用成为我国发展智慧农业的亮点。在黑龙江农垦区和新疆生产建设兵团,由于作业面积、作物、作业要求的特点,农机自动驾驶装备得到了广泛应用,特别是在新疆棉花产区,棉花穴播播种的同时需要测深施肥,播种施肥的同时又需要铺膜,铺膜的同时还需要铺设滴灌管,这些农艺特点使得农机自动驾驶装备成为不可缺少的配置。

## 4 结论与展望

(1)为实现复杂农田环境下农业机械的自动驾驶,国内外学者进行了广泛而深入的研究,取得了丰硕的成果。GNSS、INS、MV融合的定位测姿、全局与局部结合的路径规划和精确的运动控制是实现农机自动驾驶的关键技术。

(2)随着农机自动驾驶技术的推广,智能农机及其导航技术成为智慧农业的发展趋势。自主避障技术可保证人机作业安全,多机协同作业技术可发挥机群作业优势,提高农机作业效率,以上研究已逐渐成为新的研究热点。

(3)信息与通信技术促进了智慧农业的发展。我国北斗导航卫星系统的建设,进一步助推了智慧农业,农机智能导航技术的研发与应用已成为我国发展智慧农业的亮点。

## 参 考 文 献

- [1] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17. XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180801&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180801&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [2] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54. JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140908&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140908&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008. (in Chinese)
- [3] 戴增辉, 何凤琴. 智能农机自动驾驶系统应用研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 202-206. DAI Zenghui, HE Fengqin. Research on the application of intelligent automatic navigation system of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 202-206. (in Chinese)
- [4] 夏友祥, 刘刚, 康熙, 等. 基于GNSS的农田平整定位精度优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 40-44. XIA Youxiang, LIU Gang, KANG Xi, et al. Optimization and analysis of location accuracy based on GNSS-controlled precise land leveling system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 40-44. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s007&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s007&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.007. (in Chinese)
- [5] WANG Hao, NOGUCHI N. Navigation of a robot tractor using the centimeter level augmentation information via Quasi-Zenith Satellite System[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2019, 12(4): 414-419.
- [6] 刘刚, 康熙, 夏友祥, 等. 基于GNSS农田平整全局路径规划方法与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 27-33. LIU Gang, KANG Xi, XIA Youxiang, et al. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27-33. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180503&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180503&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.003. (in Chinese)
- [7] 贾全, 张小超, 苑严伟, 等. 拖拉机自动驾驶系统上线轨迹规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 36-44.

- JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 36-44. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180404&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180404&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.004. (in Chinese)
- [8] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):30-37. ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):30-37. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181004&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181004&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004. (in Chinese)
- [9] 张硕,刘进一,杜岳峰,等. 基于速度自适应的拖拉机自动驾驶控制方法[J]. 农业工程学报,2017,33(23):48-55. ZHANG Shuo, LIU Jinyi, DU Yuefeng, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 48-55. (in Chinese)
- [10] 闫飞,王春博,吴永睿,等. 森林 BDS/GPS 组合定位算法与精度分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):221-227,373. YAN Fei, WANG Chunbo, WU Yongrui, et al. Algorithm implementation and precision analysis of forest BDS/GPS combined positioning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 221-227, 373. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190425&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190425&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.025. (in Chinese)
- [11] OKSANEN T, BACKMAN J. Guidance system for agricultural tractor with four wheel steering[C]//IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(4):124-129.
- [12] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11):139-145. LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- [13] O'CONNOR M, BELL T, ELKAIM G, et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[C]//Precision Agriculture, Minneapolis,1996:767-777.
- [14] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15-21. LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15-21. (in Chinese)
- [15] NOGUCHI N, TERAOKA H, SAKATA C. Performance improvement by control of flow rates and diesel injection timing on dual-fuel engine with ethanol[J]. Bioresource Technology, 1996, 56(1): 35-39.
- [16] 朱忠祥,韩科立,宋正河,等. 基于置信度加权的拖拉机组合导航融合定位方法[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):210-215,223. ZHU Zhongxiang, HAN Keli, SONG Zhenghe, et al. Fusion positioning method based on weighted-confidence for tractor integrated navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 210-215, 223. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s138&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s138&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.038. (in Chinese)
- [17] OLLIS M, STENTZ A. First results in vision-based crop line tracking[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis,1996.
- [18] REID J F, ZHANG Q, NOGUCHI N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2): 155-167.
- [19] 钱丹. 作物与杂草识别中图像分割影响因素的研究[D]. 镇江:江苏大学,2006. QIAN Dan. Research on influencing factors of image segmentation for crop and weed identification[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006. (in Chinese)
- [20] 张甜. 高茬水田耕整路径机器视觉识别方法研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014. ZHANG Tian. Study on the method of machine vision recognition of high stubble paddyfield-tillage's path[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [21] MENG Q, QIU R, HE J, et al. Development of agricultural implement system based on machine vision and fuzzy control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 128-138.
- [22] 孟庆宽,何洁,仇瑞承,等. 基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取[J]. 光学学报,2014,34(7):180-186. MENG Qingkuan, HE Jie, QIU Ruicheng, et al. Crop recognition and navigation line detection in natural environment based on machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7):180-186. (in Chinese)
- [23] 汪博. 基于机器视觉的农业导航系统[D]. 杭州:浙江理工大学,2016. WANG Bo. The agricultural navigation system based on machine vision[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-tech University, 2016. (in Chinese)
- [24] 徐璟雪. 基于直线检测技术的垄线识别方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015. XU Jingxue. Crop-row recognition based on line detection[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [25] 赵瑞娇,李民赞,张漫,等. 基于改进 Hough 变换的农田作物行快速检测算法[J]. 农业机械学报,2009,40(7):163-165,221. ZHAO Ruijiao, LI Minzan, ZHANG Man, et al. Rapid crop-row detection based on improved Hough transformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 163-165, 221. (in Chinese)
- [26] 汪博,桂江生,周建平,等. 基于最小二乘法的早期玉米作物行检测研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2015,36(7):122-126. WANG Bo, GUI Jiangsheng, ZHOU Jianping, et al. Detection of early crop rows base on least square method[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences), 2015, 36(7):122-126. (in Chinese)
- [27] 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):213-221. 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): 213-221. (in Chinese)
- [28] 刁智华, 赵明珍, 宋寅卯, 等. 基于机器视觉的玉米精准施药系统作物识别算法及系统实现[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 47-52.  
DIAO Zhihua, ZHAO Mingzhen, SONG Yinmao, et al. Crop line recognition algorithm and realization in precision pesticide system based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 47-52. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 郭翰林, 洪瑛杰, 张翔, 等. 再生稻收割机的视觉导航路径检测方法[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(3): 118-122.  
GUO Hanlin, HONG Yingjie, ZHANG Xiang, et al. Method of identifying the vision navigation path for ratooning rice harvester[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 46(3): 118-122. (in Chinese)
- [31] 刘进一, 杜岳峰, 张硕, 等. 基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 1-7.  
LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuo, et al. Automatic navigation method for agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR information fusion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 1-7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s001&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s001&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.001. (in Chinese)
- [32] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农机 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 1-7.  
ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Research of INS/GNSS heading information fusion method for agricultural machinery automatic navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 1-7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2015S001&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S001&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.001. (in Chinese)
- [33] 张国亮. 动态环境中移动机器人路径规划研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 157-162.  
ZHANG Guoliang. Survey on path planning for mobile robot under dynamic environment[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(1): 157-162. (in Chinese)
- [34] 刘娅. 基于可视图法的避障路径生成及优化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.  
LIU Ya. Path generation and optimization of obstacle avoidance based on visibility graph[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [35] 杨淮清, 肖兴贵, 姚栋. 一种基于可视图法的机器人全局路径规划算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(2): 225-229.  
YANG Huaiqing, XIAO Xinggui, YAO Dong. A v-graph based global path planning algorithm for mobile robot[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(2): 225-229. (in Chinese)
- [36] CANNY J F. The complexity of robot motion planning[M]. Boston: MIT Press, 1988.
- [37] AVNEESH S, ERIK A, SEAN C, et al. Real-time path planning in dynamic virtual environment using multiagent navigation graphs[J]. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(3): 526-538.
- [38] 常淮阳. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划问题研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.  
CHANG Huaiyang. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [39] 陈智. 基于栅格法多目标路径规划研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
CHEN Zhi. Study on the method of multi-objective path planning based on grid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [40] 宋晓茹, 任怡悦, 高嵩, 等. 移动机器人路径规划综述[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4): 1-5, 17.  
SONG Xiaoru, REN Yiyue, GAO Song, et al. Survey on technology of mobile robot path planning[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(4): 1-5, 17. (in Chinese)
- [41] 吴镜开, 黄远灿, 王世兴. 基于势场法的移动机器人避障路径规划[J]. 微计算机信息, 2007(5): 228-230.  
WU Jingkai, HUANG Yuancan, WANG Shixing. Anti-collision path planning for mobile robot based on potential field method[J]. Microcomputer Information, 2007(5): 228-230. (in Chinese)
- [42] DENNIS B, JEROEN H, RENVAN M. Real-time motion path generation using sub-targets in a rapidly changing environment[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(3): 470-479.
- [43] PEREZ D A, MELENDEZ W M, GUZMAN J, et al. Fuzzy logic based speed planning for autonomous navigation under velocity field control[C]//IEEE Int. Conf. on Mechatronics, Malaga, 2009: 14-17.
- [44] ANISH P, DAYAL R P. Optimum path planning of mobile robot in unknown static and dynamic environments using fuzzy-wind driven optimization algorithm[J]. Defence Technology, 2017, 13(1): 47-58.
- [45] GHATEE M, MOHADES A. Motion planning in order to optimize the length and clearance applying a Hopfield neural network[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 4688-4695.
- [46] LI H, YANG S X, SETO M L. Neural-network-based path planning for a multirobot system with moving obstacles[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2009, 39(4): 410-419.
- [47] SARAH U, BJORN E, LUDGER O. Combining a fuzzy inference system with an A\* algorithm for the automated generation of roadmaps for automated guided vehicles[J]. AT-Automatisierungstechnik, 2017, 65(3): 189-197.
- [48] 殷建军, 董文龙, 梁利华, 等. 复杂环境下农业机器人路径规划优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 17-22.  
YIN Jianjun, DONG Wenlong, LIANG Lihua, et al. Optimization method of agricultural robot path planning in complex environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 17-22. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190502&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190502&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.002. (in Chinese)

- [49] QU Hong, XING Ke, ALEXANDER T. An improved genetic algorithm with co-evolutionary strategy for global path planning of multiple mobile robots[J]. *Neurocomputing*, 2013, 120: 509–517.
- [50] 陶重霖, 雷祝兵, 李春光, 等. 基于改进模拟退火算法的搬运机器人路径规划[J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(7): 182–185.  
TAO Chongben, LEI Zhubing, LI Chunguang, et al. Path planning of handling robot based on improved simulated annealing algorithm[J]. *Computer Measurement & Control*, 2018, 26(7): 182–185. (in Chinese)
- [51] 王晨晔. 蚁群算法在复杂室内环境路径规划中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2018.  
WANG Chenyang. Application research of ant colony algorithm in complex indoor environment path planning[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2018. (in Chinese)
- [52] 褚凌慧. 基于蚁群算法的农业信息采集机器人路径规划研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.  
CHU Linghui. Research on the path planning of agricultural information collecting robot based on ant colony algorithm[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [53] 贾会群, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于改进粒子群算法的路径规划[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 371–377.  
JIA Huiqun, WEI Zhonghui, HE Xin, et al. Path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 371–377. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181244&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181244&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.044. (in Chinese)
- [54] 陈哲明, 周鹏, 陈宝, 等. 汽车四轮独立转向稳定性控制策略研究[J]. *计算机仿真*, 2018(7): 93–97, 147.  
CHEN Zheming, ZHOU Peng, CHEN Bao, et al. Research on four-wheel independent steering control strategy of automobile stability[J]. *Computer Simulation*, 2018(7): 93–97, 147. (in Chinese)
- [55] 白晓平, 胡静涛, 高雷, 等. 农机导航自校正模型控制方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 1–7.  
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 1–7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150201&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150201&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001. (in Chinese)
- [56] 丁幼春, 何志博, 夏中州, 等. 小型履带式油菜播种机导航免疫PID控制器设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 20–28.  
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(7): 20–28. (in Chinese)
- [57] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 19–27.  
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(4): 19–27. (in Chinese)
- [58] 焦俊, 陈靖, 乔焰, 等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 64–70.  
JIAO Jun, CHEN Jing, QIAO Yan, et al. Adaptive sliding mode control of trajectory tracking based on DC motor drive for agricultural tracked robot[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4): 64–70. (in Chinese)
- [59] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 59–65.  
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 59–65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140211&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140211&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.011. (in Chinese)
- [60] 刘正铎, 张万枝, 吕钊钦, 等. 扰动下农用运输车辆路径跟踪控制器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 385–393.  
LIU Zhengduo, ZHANG Wanzhi, LÜ Zhaoqin, et al. Design on trajectory tracking controller of agricultural vehicles under disturbances[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 385–393. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181245&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181245&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.045. (in Chinese)
- [61] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 29–34.  
TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 29–34. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180103&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180103&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.003. (in Chinese)
- [62] 籍颖, 刘兆祥. 基于模糊补偿的离散全局滑模控制自动驾驶系统研究[J]. *农机化研究*, 2015, 37(7): 74–78.  
JI Ying, LIU Zhaoxiang. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on discrete global sliding mode control with fuzzy compensatory[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(7): 74–78. (in Chinese)
- [63] 张漫, 项明, 魏爽, 等. 玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊): 8–14.  
ZHANG Man, XIANG Ming, WEI Shuang, et al. Design and implementation of a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.): 8–14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2015S002&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S002&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.002. (in Chinese)
- [64] 李伟, 薛涛, 毛恩荣, 等. 高地隙自走式喷雾机多轮转向系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 148–158.  
LI Wei, XUE Tao, MAO Enrong, et al. Design and experiment of multifunctional steering system for high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 148–158. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190115&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190115&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.

- issn. 1000-1298. 2019. 01. 015. (in Chinese)
- [65] 王致情. 农业车辆自主跟随控制系统的设计与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.  
WANG Zhiqing. Design and realization on autonomous following control system of agricultural vehicles[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [66] 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)
- [67] OKSANEN T. Laser scanner based collision prevention system for autonomous agricultural tractor[J]. Agronomy Research, 2015, 13(1): 167-172.
- [68] 陈军, 蒋浩然, 刘沛, 等. 果园移动机器人曲线路径导航控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 179-182, 187.  
CHEN Jun, JIANG Haoran, LIU Pei, et al. Navigation control for orchard mobile robot in curve path[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 179-182, 187. (in Chinese)
- [69] 季宇寒, 徐弘祯, 张漫, 等. 基于激光雷达的农田环境点云采集系统设计[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 1-7.  
JI Yuhan, XU Hongzhen, ZHANG Man, et al. Design of point cloud acquisition system for farmland environment based on LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 1-7. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s001&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s001&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.001. (in Chinese)
- [70] THRUN S, MONTEMERLO M, PALATUCCI M. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 23(9): 661-692.
- [71] 董敏, 陈铁桩, 杨浩. 基于 Mesh 的地面激光点云分离方法研究[J]. 计算机工程, 2019, 45(6): 32-36, 44.  
DONG Min, CHEN Tiezhuang, YANG Hao. Research on separation method of ground laser point cloud based on Mesh[J]. Computer Engineering, 2019, 45(6): 32-36, 44. (in Chinese)
- [72] BEHLEY J, STEINHAGE V, CREMERS A B. Efficient radius neighbor search in three-dimensional point clouds[C]// Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, WA, 2015: 3625-3630.
- [73] 刘家银, 唐振民, 王安东, 等. 基于多激光雷达与组合特征的非结构化环境障碍物检测[J]. 机器人, 2017, 39(5): 638-651.  
LIU Jiayin, TANG Zhenmin, WANG Andong, et al. Negative obstacle detection in unstructured environment based on multiple LiDARs and compositional features[J]. Robot, 2017, 39(5): 638-651. (in Chinese)
- [74] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 1-197.
- [75] 黄如林, 梁华为, 陈佳佳, 等. 基于激光雷达的无人驾驶汽车动态障碍物检测、跟踪与识别方法[J]. 机器人, 2016, 38(4): 437-443.  
HUANG Rulin, LIANG Huawei, CHEN Jiajia, et al. LiDAR based dynamic obstacle detection, tracking and recognition method for driverless cars[J]. Robot, 2016, 38(4): 437-443. (in Chinese)
- [76] 张银, 任国全, 程子阳, 等. 三维激光雷达在无人车环境感知中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 9-19.  
ZHANG Yin, REN Guoquan, CHENG Ziyang, et al. Application research of three-dimensional LiDAR in unmanned vehicle environment perception[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 9-19. (in Chinese)
- [77] 谢德胜, 徐友春, 王任栋, 等. 基于三维激光雷达的无人车障碍物检测与跟踪[J]. 汽车工程, 2018, 40(8): 952-959.  
XIE Desheng, XU Youchun, WANG Rendong, et al. Obstacle detection and tracking for unmanned vehicles based on 3D laser radar[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(8): 952-959. (in Chinese)
- [78] 王泽民, 高俊钊. 单目视觉障碍物测距精度分析[J]. 电子测试, 2016(18): 36-37.  
WANG Zemin, GAO Junchai. Accuracy analysis of monocular vision obstacle ranging[J]. Electronic Test, 2016(18): 36-37. (in Chinese)
- [79] 黄玉强, 叶磊. 基于双目视觉的目标测距[J]. 汽车实用技术, 2017(1): 148-151.  
HUANG Yuqiang, YE Lei. Range-measuring of target based on binocular stereo vision[J]. Automobile Applied Technology, 2017(1): 148-151. (in Chinese)
- [80] 曹文君. 全景视觉环境避障测距方法研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.  
CAO Wenjun. Study on omnidirectional camera obstacle avoidance and measuring of application in environment[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [81] 曹文君, 赵祚喜, 刘雄, 等. 一种单双目结合的全景避障测距方法[J]. 现代电子技术, 2017, 40(5): 38-41.  
CAO Wenjun, ZHAO Zuoxi, LIU Xiong, et al. An omnidirectional obstacle avoidance range finding method combining binocular vision with monocular vision[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(5): 38-41. (in Chinese)
- [82] 王健, 张振海, 李科杰, 等. 全景视觉系统发展与应用[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(6): 1664-1679.  
WANG Jian, ZHANG Zhenhai, LI Kejie, et al. Development and application of panoramic vision system[J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(6): 1664-1679. (in Chinese)
- [83] 曹文君, 赵祚喜. Ladybug 系列多目全景视觉技术的应用研究[J]. 机械与电子, 2017, 35(12): 27-30.  
CAO Wenjun, ZHAO Zuoxi. Study on application of multi-view panoramic vision technology to Ladybug series[J]. Machinery and Electronics, 2017, 35(12): 27-30. (in Chinese)
- [84] 钟鹏飞. 基于机器视觉的非结构化道路识别与障碍物检测研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.  
ZHONG Pengfei. Study on unstructured road recognition and obstacle detection based on machine vision[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [85] 李盛辉, 周俊, 姬长英, 等. 自主导航农业车辆全景视觉光线的自适应方法研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 177-184.
- [86] 胡晓辉, 苏晓许, 孙苗强. 运动模糊情况下障碍物检测预处理[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(21): 230-234.  
HU Xiaohui, SU Xiaoxu, SUN Miaoqiang. Pre-obstacle detection in the case of motion blur[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(21): 230-234. (in Chinese)



- [87] 侯之旭, 张建勋. 一种彩色图像分割的障碍物识别方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(3): 94-111. HOU Zhixu, ZHANG Jianxun. A method of color image segmentation used in obstacle recognition[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016, 30(3): 94-111. (in Chinese)
- [88] LIU Zhongmin, HE Shengjiao, HU Wenjin, et al. Moving object detection based on background subtraction for video sequence[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(6): 1777-1781.
- [89] 张苑欣. 动态背景下运动目标的检测与跟踪[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015. ZHANG Yuanxin. Research on the moving targets detection and tracking methods under the dynamic scenes[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [90] 汤一平, 胡大卫, 蔡盈梅, 等. 基于全景视觉的移动机器人的运动目标检测[J]. 计算机科学, 2015, 42(11): 314-319. TANG Yiping, HU Dawei, CAI Yingmei, et al. Moving object detection in omnidirectional vision-based mobile robot[J]. Computer Science, 2015, 42(11): 314-319. (in Chinese)
- [91] 张拯, 贾鹤萍. 光流算法研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(7): 105-109. ZHANG Zheng, JIA Heping. A survey on optical flow algorithms[J]. Fire Control and Command Control, 2017, 42(7): 105-109. (in Chinese)
- [92] YANG L, NOGUCHI N. Human detection for a robot tractor using omni-directional stereo vision[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2012, 89(3): 116-125.
- [93] 薛金林, 闫嘉, 范博文. 多类农田障碍物卷积神经网络分类识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 35-41. XUE Jinlin, YAN Jia, FAN Bowen. Classification and identification method of multiple kinds of farm obstacles based on convolutional neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 35-41. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s006&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s006&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.006. (in Chinese)
- [94] 何春燕. 基于卷积神经网络的行车环境多类障碍物检测与识别[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017. HE Chunyan. Study on multi-obstacles detection and recognition under the car driving environment based on convolutional neural network[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)
- [95] 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](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)
- [96] 侯红娜, 武婷. 基于多特征自适应融合的 Camshift 行人跟踪算法[J]. 电子质量, 2017(3): 26-31. HOU Hongna, WU Ting. Pedestrian tracking algorithm based on Camshaft multi feature adaptive fusion[J]. Electronics Quality, 2017(3): 26-31. (in Chinese)
- [97] LUIS E, MARIANO G, GONZALO P, et al. New trends in robotics for agriculture: integration and assessment of a real fleet of robots[J]. Scientific World Journal, Article ID 404059, 2014: 1-21.
- [98] VOUGIOUKAS S G. A distributed control framework for motion coordination of teams of autonomous agricultural vehicles[J]. Biosystems Engineering, 2012, 11(3): 284-297.
- [99] SHEARER S A, PITLA S K, LUCK J D. Trends in the automation of agricultural field machinery[C]//Proc. of the 21st Annual Meeting of the Club of Bologna, Italy, 2010.
- [100] NOGUCHI N, WILL J, REID J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.
- [101] 刘阳. 拖拉机自动导航系统 CAN 总线的设计与实现[D]. 石河子: 石河子大学, 2012. LIU Yang. Design and implement CAN-bus of automatic navigation system on the tractor[D]. Shihezi: Shihezi University, 2012. (in Chinese)
- [102] 王利敏. 基于 nRF2401 的模拟蓝牙实现及其与 GPRS 的连接[D]. 南京: 南京理工大学, 2005. WANG Limin. Implementation of analog bluetooth based on nRF2401 and its connection with GPRS[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [103] WEISMAN C J. 射频和无线技术入门[M]. 2版. 刘志华, 徐红艳, 李萍, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005: 151-166.
- [104] LI Shichao, XU Hongzhen, JI Yuhan, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335-344.
- [105] 李世超, 曹如月, 魏爽, 等. 基于 TD-LTE 的多机协同导航通信系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 45-51, 65. LI Shichao, CAO Ruyue, WEI Shuang, et al. Development of multi-vehicle cooperative navigation communication system based on TD-LTE[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 45-51, 65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s008&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s008&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.008. (in Chinese)
- [106] 白晓平, 王卓, 胡静涛, 等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14-21. BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14-21. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170702&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170702&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.002. (in Chinese)
- [107] 李翰博. 动态竞争环境中多自主车辆系统协作控制与分布式优化[D]. 长春: 吉林大学, 2016. LI Hanbo. The cooperative control and distribution optimization of multiple autonomous vehicle system in dynamic competition environment[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [108] 曹如月, 李世超, 魏爽, 等. 基于 Web-GIS 的多机协同作业远程监控平台设计[J/OL]. 农业机械学报, 2017,

48(增刊): 52-57, 14.

CAO Ruyue, LI Shichao, WEI Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web-GIS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 52-57, 14. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s009&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s009&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.009. (in Chinese)

- [109] WANG Hao. Development of robot vehicles adaptable to changing ground conditions and their work management system[D]. Sapporo: Hokkaido University, 2019.
- [110] 刘阳春, 苑严伟, 张俊宁, 等. 深松作业远程管理系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 43-48. LIU Yangchun, YUAN Yanwei, ZHANG Junning, et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 43-48. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s007&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s007&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.007. (in Chinese)
- [111] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34-39. CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhuan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 34-39. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s006&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s006&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.006. (in Chinese)
- [112] 吴军, 徐昕, 连传强, 等. 协作多机器人系统研究进展综述[J]. 智能系统学报, 2011, 6(1): 13-27. WU Jun, XU Xin, LIAN Chuanqiang, et al. A survey of recent advances in cooperative multi-robot systems[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2011, 6(1): 13-27. (in Chinese)
- [113] 吕云峰. 障碍环境中多机器人路径规划及任务分配[D]. 长沙: 湖南大学, 2017. LÜ Yunfeng. Multi-robot path planning and task allocation in obstacle environment[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)
- [114] HICHAM H, RAVI P, JOHN M W. Comparative study of task allocation strategies in multirobot systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(1): 253-262.
- [115] JONES E G, DIAS M B, STENTZ A. Time-extended multi-robot coordination for domains with intra-path constraints[J]. Autonomous Robots, 2011, 30(1): 41-56.
- [116] 柳林, 季秀才, 郑志强. 基于市场法及能力分类的多机器人任务分配方法[J]. 机器人, 2006(3): 337-343. LIU Lin, JI Xiucai, ZHENG Zhiqiang. Multi-robot task allocation based on market and capability classification[J]. Robot, 2006(3): 337-343. (in Chinese)
- [117] GAGE A, MURPH Y R, VALAVANIS K P, et al. Affective task allocation for distributed multi-robot teams, CRASAR-TR 26[R]. Center for Robot Assisted Search & Rescue, 2004.
- [118] FANG Baofu, CHEN Lu, WANG Hao, et al. Research on multirobot pursuit task allocation algorithm based on emotional cooperation factor[J]. Scientific World Journal, Article ID 864180, 2014: 1-6.
- [119] 张崱, 刘淑华. 多机器人任务分配的研究与进展[J]. 智能系统学报, 2008, 3(2): 115-120. ZHANG Yu, LIU Shuhua. Survey of multi-robot task allocation[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3(2): 115-120. (in Chinese)
- [120] TORBJORN S D, MAJA M, GAURAV S S. Multi-robot task allocation through vacancy chain scheduling[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(6-7): 674-687.
- [121] 冯珊珊. 基于适应度与蚁群分散搜索的多机器人任务分配[D]. 郑州: 郑州大学, 2018. FENG Shanshan. Multi-robot task allocation based on fitness and ant colony scattered search[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [122] 王宇. 多机器人多任务分配及路径规划研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017. WANG Yu. Research on multitask assignment and path planning of multi robots[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [123] 赵珍. 基于改进蚁群算法的多机器人路径规划研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016. ZHAO Zhen. Study on multi-robot path planning based on an improved ant colony algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [124] 郑延斌, 王林林, 席鹏雪, 等. 动态环境下改进蚁群算法的多Agent路径规划[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(6): 1078-1085. ZHENG Yanbin, WANG Linlin, XI Pengxue, et al. An improved ant colony algorithm for multi-Agent path planning in dynamic environments[J]. Computer Engineering & Science, 2019, 41(6): 1078-1085. (in Chinese)
- [125] 张衡. 基于蚁群算法的多农业机器人路径规划研究[J]. 数字技术与应用, 2017(6): 147-149. ZHANG Heng. Research on path planning of multi farm robot based on ant colony algorithm[J]. Digital Technology and Application, 2017(6): 147-149. (in Chinese)
- [126] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 多机协同导航作业远程管理平台开发[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 92-99. CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhuan, et al. Development of remote monitoring platform for multi-machine cooperative navigation operation[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(10): 92-99. (in Chinese)
- [127] 李世超. 跟随式农机主从导航系统设计与开发[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. LI Shichao. Design and development of a follow agricultural machinery master-slave navigation system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)