

农业机械导航技术发展分析*

姬长英 周 俊
(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 导航技术是农业机械在作业环境中进行自主控制的关键技术,目前是农业机械研究领域的热点。通过分析现有的国内外文献,从目前农业机械导航主要方式以及关键技术入手,阐述了国内外该领域的研究进展。详细介绍了广泛研究的 GPS 导航和视觉导航,同时简要地介绍了电磁导航、机械导航、激光导航、超声波导航、地磁导航等其他导航形式。对农业机械导航中的环境感知、导航控制、地图构建等关键技术进行了分析,指出了农业机械导航技术的未来发展趋势。

关键词: 农业机械 导航 综述

中图分类号: S22; V249.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0044-11

引言

科学技术的进步正推动着现代农业生产向着自动化、信息化、规模化、精确化方向快速发展。为了使农业机械能够在作业环境中完成自动除草、收获、施肥、修剪、耕耘等工作任务,要求其必须具备自主导航这一基础功能,即农业机械通过自身携带的各项传感器感知周围的环境,在对感知到的信息进行处理后,实时获取自身的位置和姿态信息,然后实时进行路径规划和导航控制,完成各项作业任务。

本文从农业机械导航技术入手,通过分析国内外文献,详细阐述目前农业机械导航中应用较多的 GPS 导航和视觉导航这两种主要方式,并简单综述电磁导航、机械导航、激光导航、超声波导航等其他导航形式。然后分析农业机械导航中环境感知、导航控制,以及地图构建等关键技术。最后对农业机械导航技术发展加以分析。

1 自主导航方式

1.1 卫星导航系统

美国、俄罗斯、中国、欧洲都建有各自独立的卫星导航系统。其中美国的全球定位系统 GPS (Global positioning system) 目前在农业机械导航领域应用最为广泛,展示了其技术的优越性和巨大潜力。它是美国国防部主要为满足军事部门对海上、陆地和空中运载体进行高精度导航和定位要求而建

立的,基本原理是空中卫星不间断发射自身的星历参数,用户接收机收到这些信号参数后,解算出接收机的三维位置、运动方向、运动速度,以及接收机所在地区的当地时间^[1]。

由于 GPS 的巨大成功,美国的农业机械卫星导航技术研究开展最早(表 1)。斯坦福大学的 Michael O'Connor 等成功地为约翰迪尔 7800 拖拉机开发了一套 GPS 导航系统,在拖拉机驾驶室的上方安装了 4 个单通道的 GPS 传感器,接收器以 10 Hz 的频率进行姿态测量,航向响应小于 1°,直线跟踪标准偏差小于 2.5 cm^[2]。伊利诺斯大学的 Benson 等混合使用 GDS (Geomagnetic direction sensor) 和一个中等精度的 GPS 系统(20 cm),引导拖拉机沿着直线行驶,其平均误差小于 1 cm^[2]。Zhang 等则运用 RTK-GPS 接收器和光纤陀螺仪,探索了拖拉机自动导航中的动态路径搜索算法,来满足农业作业的需求^[3]。

除美国外,其他国家也在积极开展农业机械的 GPS 导航技术的研究。日本的 Yoshisada Nagasaka 等为久保田 SPU-650 型插秧机开发了自动导航系统。在该系统中,使用 RTK-GPS 来提供插秧机的精确定位信息,并用光纤陀螺仪检测插秧机前进方向。为了避免由地面不平引起的 GPS 天线坐标的变化而引起测量误差,随时估算天线顶点的坐标

$$P_0 = R(-\phi)R(-\theta)R(-\psi)P \tag{1}$$

收稿日期: 2014-05-01 修回日期: 2014-05-19

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z259)、国家自然科学基金资助项目(31071325)和中央高校基本科研业务费自主创新项目(KYZ201006)

作者简介: 姬长英,教授,博士生导师,主要从事智能化农业装备和土壤-机器系统研究,E-mail: chyji@njau.edu.cn

表 1 美国农业机械卫星导航研究成果

Tab.1 Navigation systems based on GPS for US agriculture

研究单位	实验平台	传感器	实验结果
卡耐基梅隆大学(1994—1998)	NewHolland Speedrower	GPS、视觉	在 40 hm ² 面积上进行了自动收获作业 ^[4]
斯坦福大学(1996)	John Deere 7800 Tractor	GPS	航向精度为 1°, 直线跟踪精度偏差为 2.5 cm ^[5-6]
伊利诺斯大学(1996—2000)	Case 8920 MFD, 2WD Tractors	GPS、视觉、GDS	基于作物行的视觉导航速度达到 16 km/h ^[7-8]
伊利诺斯大学(2004)	Magnum MX240 tractor	RTK - GPS、FOG	12.6 km/h 行驶时横向精度标准差 3 cm, 最大误差小于 10 cm ^[3]

式中, P 和 P_0 分别为校正前后 GPS 天线顶点的坐标, $R(-\phi)$ 、 $R(-\theta)$ 和 $R(-\psi)$ 分别为车辆绕 X 、 Y 和 Z 轴的转角。另外, 为了解决在开始工作时光纤陀螺仪不能感知车辆的方位而引起光纤陀螺仪的漂移问题, 将运用车辆位姿角和车辆速度计算得到的在一定计算距离 l_n 时车辆横向偏差 d_{Gyro} 与运用 GPS 数据计算所得结果 d_{GPS} 进行比较, 给出补偿角

$$\psi_{offset} = \arctan\left(\frac{d_{Gyro}}{l_n}\right) - \arctan\left(\frac{d_{GPS}}{l_n}\right) \cong \frac{d_{Gyro} - d_{GPS}}{l_n} \tag{2}$$

水田实验表明, 当插秧机以 0.7 m/s 的速度行驶时, 与期望直线路径的均方根偏差为 5.5 cm, 最大偏差小于 12 cm。此精度已经可以满足水稻栽植的农艺要求, 但与水稻栽植后喷洒农药或除草作业所需的精度还有差距^[9-10]。荷兰的 Tijmen Bakker 等在甜菜地开展了农业机器人平台的自主导航研究, 同样使用了 RTK - GPS 进行导航, 田地实验精度达到了厘米级^[11]。

国内学者对农业机械 GPS 导航的研究起步相对较晚, 但近年来发展非常迅速。张智刚等在久保田插秧机上开发了基于 DGPS 和电子罗盘的导航控制系统, 当速度为 0.75 m/s, 直线路径跟踪时, 平均误差 0.04 m, 最大误差 0.13 m; 速度为 0.33 m/s, 圆曲线路径跟踪时, 平均误差 0.04 m, 最大误差 0.087 m^[12]。罗锡文等在东方红 X - 804 拖拉机上构建了基于 RTK - DGPS 的自动导航控制系统, 在拖拉机行进速度为 0.8 m/s 时, 直线跟踪的最大误差小于 0.15 m, 平均跟踪误差小于 0.03 m^[13]。伟利国等以 XDNZ630 型水稻插秧机为实验平台, 采用 RTK GPS 定位技术, 进行了农业机械自动导航实验, 采用 PID 控制方法, 构建转向闭环控制系统, 实现插秧机的自动对行导航及地头转向。车辆行进速度不大于 0.6 m/s 时, 对行跟踪误差小于 10 cm^[14]。为进一步消除 GPS 的定位误差, 提高导航精度, 周俊等建立了 GPS 静态和动态定位误差的 AR 模型, 处理后的定位误差信号的相关性明显下降, 接近于白噪声^[15]。

农业机械的卫星导航系统技术总体而言已经基

本成熟, 以美国为典型代表的世界各国正在开展各种形式的推广应用阶段。我国也不例外, 配有卫星导航系统的拖拉机已经进入了一些大型农场的田间地头, 可以改善作业质量、延长作业时间。这类导航系统的主要优点是结构比较简单, 技术比较成熟, 随着卫星导航系统产品的普及, 其成本也不断下降。存在的主要问题是卫星信号有时受环境的影响较大。

1.2 视觉导航

与 GPS 导航相比, 机器视觉导航灵活性更大, 特别是机器视觉图像收集的环境信息丰富、范围宽、目标信息完整。农田环境中, 作物通常是整齐地按直线、彼此间平行的方式种植, 因此机器视觉导航的主要任务是从图像中识别出作物行, 检测出跟踪路径线, 为确定车辆的相对位置提供依据^[16]。

英国在此领域开展研究较早, Marchant 等自 20 世纪 80 年代起就开展了基于视觉导航的农业机械作物行跟踪研究。使用了里程计和视觉等传感器, 通过卡尔曼滤波来融合这两个传感器的信号, 并在花椰菜田地场景中进行了实验, 车辆横向位置控制的均方根误差大约为 20 mm^[17]。欧洲的其他一些国家也在积极开展此项研究, 并且部分成果已经有商品化产品面世。荷兰的 Bakker 等运用机器视觉检测甜菜作物行, 每帧图片处理时间在 0.5 ~ 1.3 s 之间^[18]。瑞典的 Astrand 等利用 Hough 变换融合来自两行或者多行的信息, 有效地应对了存在的杂草干扰, 同时该视觉系统也可以独自检测出作物行尽头等信息^[19]。

美国几乎与英国同时开展了农业机械的视觉导航研究。伊利诺伊大学的 Han 等通过 K 均值聚类算法分割作物行, 辅助以作物行空间等先验信息, 并利用大豆田和玉米田的两个图像数据集对程序的精确性进行了评估^[20]。为了克服柑橘树冠阻碍 GPS 传感器接收卫星信号, 佛罗里达大学的 Subramanian 等进行了基于机器视觉和激光雷达的柑橘园作业车辆自动导航系统的研究。当车辆沿着弯曲路径以 3.1 m/s 行驶时, 使用视觉导航平均误差为 2.8 cm, 使用激光雷达导航时平均误差为 2.5 cm^[21]。为了

克服缺失部分大豆植株的影响,伊利诺伊大学的 Kise 等为农业车辆的自动驾驶系统开发出一套基于立体视觉作物行检测的算法(图 1)^[22]。亚洲的日

本和韩国与欧美等国家一样,对此领域都积极加以研究。日本北海道大学的研究人员在车辆的前面安装了立体相机,来获取环境的深度和灰度信息^[23]。

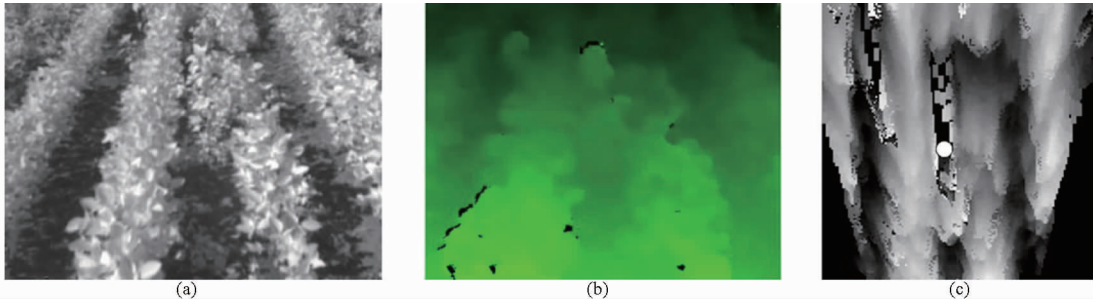


图 1 长满杂草的弯曲作物行立体视觉处理过程
Fig. 1 Stereovision process for a weedy field with curved crop rows
(a) 原始图 (b) 视差图 (c) 带有导航节点(白点)的高度图

国内,农业车辆视觉导航研究始于 20 世纪 90 年代中后期,南京农业大学等研究单位都陆续参与其中。沈明霞等提出了利用虚点检测确定农业车辆与路径的相对位置和航向^[24],周俊等^[25-33]构建了视觉导航实验平台(图 2),使用小波变换方法进行导航路径的多分辨率检测,运用 Hough 变换直接获取视觉导航的位姿参数,并基于扩展 Kalman 滤波进行了视觉导航传感器数据融合和导航控制。针对农田耕作机器人,赵颖等在耕作过程中采集农田场景图像,根据已耕作区域、未耕作区域和非农田区域的不同颜色特征,判断出田端和犁沟线的位置^[34]。为研究棉田农药喷洒机器人导航路径识别方法,孙元义等在 Lab 色彩空间处理棉田图像,在图像坐标系中根据垄的走势特征,通过 Hough 变换得到导航路径^[35]。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,最终获得导航参数^[36]。冯娟等针对果园导航环境的复杂性,提取主干与地面的交点作为特征点;以此为基础生成果园导航基准线。导航基准线的生成准确率高于 90.7%^[37]。孟庆宽等针对现有作物行检测算法速度慢、易受外界干扰等问题,设计了一种基于线性相关系数约束的作物行中心线检测方法^[38]。李景彬等研究了棉花铺膜播种机田间作业时导航路线和田端的图像检测算法^[39]。田光兆等提出基于立体视觉的车辆实时运动检测方案。该方案通过多线程特征点检测提高传统 SIFT 特征检测算法的效率,通过归一化综合距离法剔除误匹配的特征点,最后通过相邻时刻同一特征点坐标的变化反推车辆的运动。实验表明:当车速为 0.8 m/s,图像采集频率为 5 Hz 时,车辆在 x 方向和 z 方向单次测量误差小于 0.004 5 m,当持续运动时间达到 10 s 时,2 个方向累积测量误差均小于



图 2 机器视觉导航农用轮式移动机器人原型
Fig. 2 Prototype of agricultural wheeled mobile robot navigated based on machine vision

0.15 m^[40]。

视觉传感器可以检测农业机械相对目标作物行的位置和航向,同时还可以获取田间杂草、障碍等其它信息,因而具有明显的应用潜力,被广泛关注。但是,与卫星导航相比,视觉导航由于农田环境中光照、作物生长状态等因素的不可控性,技术成熟度尚且不够,市场上还没有出现能够满足农业生产实际需求的可靠产品。消除或降低图像获取和处理中光照影响的技术将是机器视觉导航领域最核心的研究方向。

1.3 其他导航形式

卫星导航和视觉导航由于能够为农业车辆提供绝对定位以及相对定位信息,成为农业机械导航领域中的两种最受重视的技术方式。但是除此之外,为了充分发挥特定农业环境中典型引导特征的天然优势,如玉米收获中的玉米秸秆等,农业车辆导航方式还包括电磁导航、机械导航、激光导航、超声波导航、地磁导航等其他形式。这些导航方式一般只针对具体应用,受特定农业环境的局限。

1.3.1 电磁导航

电磁导航也称埋线导航,因为这种导航方式具

有实用简单、寿命长、抗干扰能力强等特点,20 世纪 70 年代迅速发展,并被广泛地应用于实际生产当中。日本的 Tosaki 等研制出了一种在果园环境使用的无人驾驶鼓风喷雾机器人,该机器人利用埋在工作路径上的导向线进行导航。导向线被埋在 0.3 m 深的地下,信号为交流信号(1.5 kHz,185 mA)。用模糊控制方法引导机器人沿着电缆线行驶。当机器人以 0.76 m/s 速度行驶时,偏移误差为 0.1 m,在转弯处增大到 0.3 m^[41-42]。

在国内,宋健等针对喷雾机器人的工作要求,研制了电磁诱导式导航系统。机器人行走轨迹的诱导信号由埋设在田间的通有高频电流的导线产生,利用一对电磁感应传感器的信号电压差值判断机器人位置。采用 PID 算法规划行驶路径,由 PWM 系统驱动直流电动机完成机器人的行走。实验结果表明,10 m 范围内直线导航精度 ± 1 cm;转弯半径 0.5 m 时导航精度 ± 2.5 cm^[43]。杨世胜等针对温室 内农药喷洒作业自动化的需求,设计了一种电磁诱导式农用喷雾机器人路径导航系统。机器人路径导航系统由机器人控制器、诱导信号发生器、诱导线、磁标志、传感器和遥控器组成(图 3)^[44]。

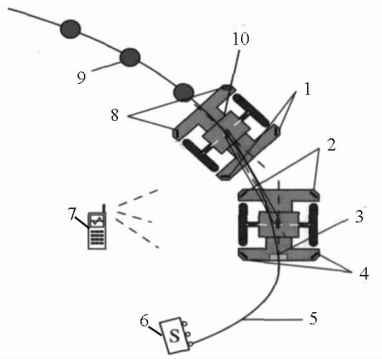


图 3 电磁导航系统示意图

Fig.3 Schematic sketch of the electromagnetic navigation system

1、2、4、8. 位置检测传感器阵列 3. 磁标志检测传感器 5. 诱导线 6. 信号发生器 7. 遥控器 9. 磁标志 10. 机器人

由于电磁导航需要埋设引导线,故改变路径比较困难,比较适用于温室等环境比较固定或长期不需要改变导航路径的场合。

1.3.2 机械导航

在农业机械导航的早期研究中,许多研究者将目光投向了机械导航。机械导航具有成本低、实用性强、原理简单、可靠性高、易于维护等诸多特点。国外有许多农机生产单位将机械导航系统投入到了实际应用之中,解决如玉米收获过程中的对行等问题。从 1978 年开始,Claas 自动导航仪就使用了机械接触传感器,可以引导车辆沿着由作物行形成的

固体引导线行驶。但是,当不存在有效的接触引导目标时,传感器将会失效^[45]。

国内在农业机械领域针对机械导航的研究较少。朱磊磊等针对果园田间作业,设计了基于曲柄滑块机构原理导航的履带机器人。该机器人以 0.15 m/s 的速度直线行走时,最大跟踪误差小于 0.02 m;转弯半径为 2 m 时,最大跟踪误差小于 0.05 m^[46]。何卿等为提高接触式拖拉机导航系统性能和导航精度,针对玉米秸秆行间作业,设计了双层控制器的接触式导航控制系统,行驶速度不超过 1 m/s 时,拖拉机导航精度在 50 mm 以内^[47]。张明颖等为实现果园机械自动化,开发了一种拖拉机机械式导航系统,最大横向偏差小于 0.1 m(图 4)^[48]。

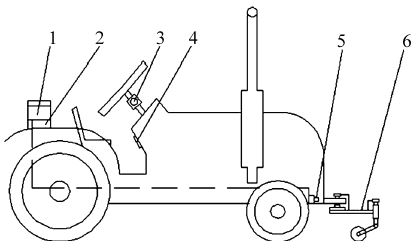


图 4 机械式导航拖拉机系统结构示意图

Fig.4 System structure of tractor with mechanical navigation

1. PC 机 2. 电源 3. 直流伺服电动机 4. 电动机驱动器 5. 拉线位移传感器 6. 导向机构

1.3.3 激光导航

激光雷达具有测距精度高、分辨率好、抗干扰能力强、体积小、质量轻等诸多优点,在农业机械导航中的应用也较为普遍。法国的 Chateau 等进行了基于激光传感器的农业车辆自动导航研究。在研究中,植被的体积和高度被计算出,并被用来控制车辆的速度^[49]。日本的 Noguchi 等利用二维激光扫描仪开发出了一种可以在果园环境应用的自动导航系统,使用一辆 52 kW 的拖拉机作为实验平台,导航中横向误差为 0.11 m,航向角误差为 1.5°(图 5)^[50]。荷兰的 Hiremath 等为了使农业机器人能够在玉米地中进行自主导航,基于粒子滤波器构建了激光测距仪模型,机器人的航向角和横向偏差的均方根误差分别为 2.4°和 0.04 m^[51]。

在国内,刘沛等为实现果园作业的自动化,以拖拉机为研究对象,采用激光导航方式实现了果园机械的自动导航。当拖拉机以 0.27 m/s 速度直线行走 30 m,最大横向偏差为 0.15 m^[52]。陈军等在研究中,利用激光扫描获取果树位置信息,提出了一种果园环境下曲线导航路径的拟合算法。当农业机器人以 0.54 m/s 的速度沿正弦曲线行走,最大横向偏差为 0.40 m,平均偏差为 0.12 m^[53]。除成本较高



图5 自主导航拖拉机上安装的激光扫描仪

Fig. 5 Attachment position of the laser scanner in front of the robot tractor

外,激光导航须有固定的用于反射激光的目标,目标可以人为设置,也可以利用自然景物,如建筑物、树木等。但机器与反射物之间不能存在遮挡。

1.3.4 超声波导航

超声波传感器测量具有非接触性、方向性好、定向传播、频率高、波长短、绕射现象小等特点,特别是遇到杂质或者分界面会产生明显的反射现象,以及在遇到动态物体时会产生多普勒效应,因而目前被广泛地用作机器人定位和障碍物的检测中,在农业机械导航中也不例外。日本的 Toda 等利用超声波传感器绘制作物行的地图,应用模糊逻辑方法控制转向。结果表明,位置和方向标准误差在建图测试中分别为 12.7 mm 和 2.4°;在驾驶测试中为 16.3 mm 和 2.2°;在综合实验中为 33.6 mm 和 3.2° (图6)^[54]。英国的 Hague 等为自主导航农业车辆开发的地基感知系统中,也使用了声呐传感器来进行局部特征检测,并通过使用扩展卡尔曼滤波器对传感器的信号进行融合^[55]。

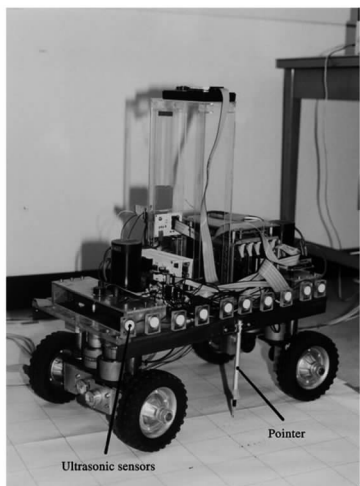


图6 Toda 的农业移动机器人平台

Fig. 6 Toda's agricultural mobile robot

国内,郑天鹏等开发了一种基于红外触发的农业机器人超声波定位系统,结合了温度补偿模块和线性修正因子来提高测量精度,当发射端发射角小于 40°、纵向距离小于 4 000 mm 时,检测误差在

10 mm 以内^[56]。高云等也进行了类似定位研究,以期辅助农业机器人的视觉系统提高识别功能^[57]。

超声波测距或定位的精度不太高,仅适用于短距离的测量。

1.3.5 地磁导航

由于廉价,地磁传感器最近也被应用到了农业机械导航研究之中。日本的 Noguchi 等研发了一种利用地磁导向传感器和图像传感器进行导航的农业移动机器人。该机器人利用图像传感器进行定位,通过地磁导向传感器获得航向角。然而地磁导向传感器在使用中易受周围磁场、机器人倾角等干扰,为了有效利用地磁导向传感器,利用神经网络重新定义地磁导向传感器输出。田地实验表明,机器人相对于目标位置的最终位置平均误差为 0.4 m。机器人相对于预规划路径的位置绝对最大误差和均方根误差分别为 0.51 m 和 0.23 m^[58]。

国内有关地磁导航的研究还主要集中在仿真和预研阶段^[59]。相关研究多集中在航空、船舰等领域,尚未看到农业机械相关的研究报道。

2 农业机械导航关键技术

2.1 环境感知技术

导航中的环境感知技术,即移动载体能够根据自身所携带的传感器对所处周围环境进行环境信息的获取,并提取环境中有效的特征信息加以处理和理解,最终建立所在环境的模型^[60]。该技术是机器人实现环境建模、定位、路径规划等自主导航控制的前提,环境感知能力的强弱直接影响到机器人的控制决策能力。

随着信息获取技术的发展,各种传感器以及新型传感器信息处理方法在移动机器人中得到了充分的使用,有力地提高了智能移动机器人对环境信息的获取能力,针对环境信息的提取、分类,近年来很多学者不断加大在该领域的研究工作。杨俊友等提出一种基于颜色直方图和 SIFT 混合特征的机器人环境感知方法,将颜色直方图的“色”与 SIFT 算法的“形”有机结合^[61]。Correa 等在安装了视觉传感器的移动机器人平台上使用了主动感知策略,使用环境拓扑地图和基于粒子滤波的贝叶斯非参数估计来估测机器人位置^[62]。

在农业机械导航领域也是一样,环境感知的方式和信息处理方法在不断进步。Åstrand Björn 等设计一种机械除草机器人,感知系统包括一个识别农作物行的灰度级视觉系统,以及一个能够从杂草中识别农作物的彩色视觉系统^[63]。Freitas 等使用扩展卡尔曼滤波来融合转向编码器和激光距离两种传

传感器数据,更新通过点和线特征的检测来实现轮式机器人在果园中的定位^[64]。He 等根据果园图像的特点,使用水平投影方法动态地识别主要的树干区域,借助于最小二乘法来提取树干行线^[65]。为使车辆有效地避开障碍物,韩永华等针对基于颜色或高度信息的农田障碍物检测方法仅能实现部分障碍物检测的缺点,提出了基于频率信息的障碍物检测方法^[66]。周俊等通过连续采集两帧图像,提取其特征点并加以匹配;然后利用对应特征点在图像间的运动特征来检测运动障碍目标^[67]。李盛辉等提出了一种基于全景视觉的运动障碍目标检测方法。与传统的单目和双目视觉相比,全景视觉具有 360°无盲区检测的优点。首先系统使用多线程技术采集多目视觉图像,并用改进 RANSAC-SIFT 算法进行特征点提取与匹配,进而拼接全景视觉图像;其次采用改进的 CLG 光流法处理全景图像,检测运动障碍目标。试验表明:基于多线程技术和改进 RANSAC-SIFT 的全景拼接算法,与传统 SIFT 算法相比,平均提高特征点匹配准确度 25.6%,加快运算速度 25.0%;采用改进 CLG 光流法进行运动障碍检测,平均检测时间为 1.55 s,检测成功率为 95.0%^[68]。

2.2 导航控制技术

农业机械导航控制技术主要包括横向控制和纵向控制。其中,纵向控制为速度控制,农业机械作业时一般速度不高,而且速度的变化范围小,所以在导航控制研究中往往把研究的重点放在横向控制上。横向控制是指车辆的转向控制,而转向控制的重点在于导航控制器的设计。导航控制器可以将农业车辆的位置信息与规划路径相比较得到的偏差信号发送给转向控制机构,通过转向操作机构控制农业机械按照理想路径运行。目前,设计这类导航控制器的方法主要包括:智能控制方法、PID 的控制方法、最优控制方法、预瞄控制方法、预测控制方法等。

在智能控制当中,使用较多的为神经网络控制和模糊控制。通过模拟人的智能行为,神经网络控制和模糊控制在不需要精确数学模型的情况下就能解决不确定性、非线性问题^[69]。陈军等将神经网络控制技术应用于农用车辆的自动行驶控制中,使控制器具有良好的自学习功能,提高了控制器的环境适应能力和现场处理能力。在牧草地上的实车实验结果表明:农用车辆沿直线路径自动行驶时,95%的偏差绝对值小于 5 cm^[70]。Noguchi 等使用神经网络和遗传算法为农业移动机器人进行路径规划,其中神经网络描述的模拟器被用来生成路径,遗传算法被作为优化方法,使用转向角度的时间序列作为控制的输入被优化^[71]。Toda 等利用模糊逻辑控制

机器人的转向,转向控制系统所能提供的直线跟踪结果中的位置标准转向误差为 16.3 mm,方向误差为 2.2°^[54]。李逃昌等提出了一种基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法。该方法基于纯追踪模型进行农业机械路径跟踪控制,采用模糊自适应控制在线自适应地确定纯追踪模型中的前视距离,提高了路径跟踪的精度。农业机械的路径跟踪实验结果表明,路径跟踪的最大误差不超过 10 cm,平均误差小于 5 cm^[72]。

PID 控制以其算法简单、可靠性高、鲁棒性好、调整方便而在工程界中广泛应用。Yin 等利用 PID 控制器来决定农业车辆的合适速度^[23]。罗锡文等在东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统的开发中,也使用了基于 PID 算法的导航控制器^[13]。

最优控制理论是现代控制理论的重要组成部分,它所研究的对象是控制系统,核心是针对一个控制系统,寻求控制策略,使系统在某种意义上是最优的。陈军等利用车辆运动学模型,根据最优控制理论设计了拖拉机自动行走控制器^[73]。Vougioukas 等为自主农业车辆设计了两阶段最优运动规划算法^[74]。Dong 等进行了差速驱动农业机器人作物行引导系统的时间最优控制,田地实验表明该方法能达到 ± 3 cm 的精度^[75]。

预瞄控制具有很好的鲁棒性与智能性,其工作原理与驾驶员的驾驶行为相似。农业车辆对前方的路径进行预瞄,得到自身相对于预瞄点的偏差数据来设计控制器,以实现自动导航。周建军等在农用车辆直线导航跟踪控制中采用了该控制算法,取前视距离为车辆当前车速下 4 s 内所走的距离,实验中横向位置偏差小于 0.2 m^[76]。

预测控制先预测系统未来的输出状态,再确定当前时刻的控制动作,因此,控制动作具有明显的预见性,适合移动机器人的运动控制。任永新等针对温室环境下机器人自主导航问题,提出了基于模糊预测控制的实时路径规划和跟踪方法^[77]。周俊等分析了轮式拖拉机跟踪引导路径的行为特点,基于卡尔曼滤波理论融合各传感器的测量信号实现预测跟踪控制,以抵消状态反馈滞后严重造成的不良影响^[30]。

2.3 地图构建技术

地图技术主要指的是地图构建,即获得农业机器人所在的实际作业环境的空间模型。通过视觉传感器、激光雷达、声纳等农业机器人外部传感器获取实际作业环境的信息,经过对获取的信息进行处理,构建出环境地图。精确的农业地图可以被用来进行

农业机械人的导航、路径规划和作业环境的管理监督等。

地图的表示方式大致可以分为栅格地图、几何地图和拓扑地图。栅格地图适合用于局部导航,例如机器人的自主避障。但是栅格方法很少用来定位,因为其在感知特征时需要很大的计算代价。在几何地图表示方法中,环境由三维坐标系下的几何信息来表示,机器人的位置通过匹配感知到的特征来估计。拓扑地图表示方法的关键在于拓扑点和拓扑边的定义^[78]。Rovira - Mas 利用农用车辆在葡萄园环境下,通过融合来自三维立体视觉的信息与 GPS 的信号数据,创建出全局参照导航栅格地图(图 7)。并指出,对于在野外环境工作的智能农业车辆来说,最有效地构建环境模型的方式是将二维常规栅格与全局参照信息相结合^[79]。

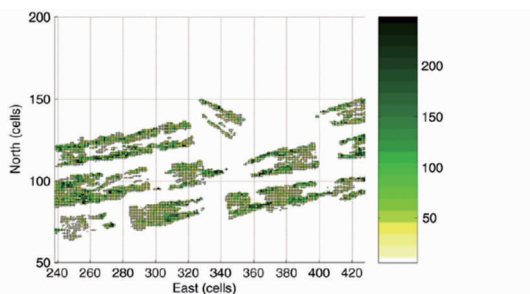


图 7 葡萄园全局栅格地图中的三行作物

Fig. 7 Detail of three rows belonging to the universal grid of a vineyard

在很多情况下,机器人不能获得自己的准确位置信息,事先获取环境地图也很困难,甚至是不可能的。最初,机器人的地图构建与定位问题是被分开来研究的,但是后来这两项内容被认为是互相依赖的,这就是移动机器人的同时定位与地图创建(Simultaneous localization and mapping, SLAM)问题。Cheein 等针对农业环境(橄榄园)提出了一种 EIF - SLAM 算法,基于种植园中橄榄树树干的检测实现

环境地图的创建,该地图将被存储,用于后期的精准农业生产进程^[80]。田光兆等进行了基于 Gray - EKF 算法的智能农业车辆同时定位与地图创建研究,将灰色预测理论和扩展卡尔曼滤波融合,算法具有更高的精度^[81]。

3 发展分析

导航技术作为自动化农业装备的关键技术之一,成为该领域的研究热点。其中部分成果,如卫星导航中的 GPS 导航、玉米收获自动对行中的机械导航等技术已经被商业化应用,有效地提高了农业机械的作业效率和作业质量,同时降低了驾驶人员的劳动强度。

但是,农业环境存在着多样性和复杂性,这就要求农业机械在不同的情况下需采取不同的导航策略,来完成相应的作业任务。例如在开阔的农田环境中,卫星信号可靠有效,且技术已经成熟,机器人可以应用 GPS 导航完成自主行驶。而面对密植果园这类树冠交错,导航卫星信号极易受到干扰的情况,相对而言研究运用视觉导航、激光导航等技术将更加有效。

其次,农业机械导航中应用到的各种传感器均存在自身的优缺点,并由于农业环境存在多种噪声,不同传感器均会不同程度地受到噪声的干扰,例如视觉传感器的优点是采集的信息丰富,但是对于光照的变化敏感,易受环境噪声的影响。因此在未来的农业机械导航技术中,应该针对具体应用设计适当的传感器组合形式,选择可靠有效的传感器融合策略,以此来提高农业机器人导航的鲁棒性、稳定性、精确性和抗干扰性。

最后,现有的农业机械自主导航技术较多关注各独立装备,未来应侧重研究需要多装备协同作业的导航问题。

参 考 文 献

- 1 李建平,林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 232 - 236.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 232 - 236. (in Chinese)
- 2 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.
- 3 Zhang Q, Qiu H C. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2): 639 - 646.
- 4 Pilarski T, Happold M, Pangels H, et al. The demeter system for automated harvesting [J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1): 9 - 20.
- 5 O'Connor M, Elkaim G, Parkinson B. Kinematic GPS for closed-loop control of farm and construction vehicles[C] // Proceedings of ION GPS - 95, 1995: 1261 - 1268.
- 6 Bell T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1 - 2): 53 - 66.

- 7 Zhang Q, Reid J F, Noguchi N. Agricultural vehicle navigation using multiple guidance sensors [C] // Proceedings of the International Conference of Field and Service Robotics, 1999: 293 – 298.
- 8 Benson E R, Stombaugh T S, Noguchi N, et al. An evaluation of a geomagnetic direction sensor for vehicle guidance in precision agriculture applications [C]. ASAE Paper, 983203, 1998.
- 9 Nagasaka Y, Saito H, Tamaki K, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6 – 7): 537 – 548.
- 10 Nagasaka Y, Umeda N, Kanetani Y, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 223 – 234.
- 11 Bakker T, Asselt K V, Bontsema J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 357 – 368.
- 12 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95 – 96, 82.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 95 – 96, 82. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 186 – 190.
Wei Ligu, Zhang Quan, Yan Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186 – 190. (in Chinese)
- 15 周俊, 张鹏, 宋百华. 农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 189 – 192, 198.
Zhou Jun, Zhang Peng, Song Baihua. Analysis and modeling of GPS positioning error for navigation of agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 189 – 192, 198. (in Chinese)
- 16 张方明, 应义斌. 机器视觉在农业车辆导航系统中的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 133 – 136.
Zhang Fangming, Ying Yibin. Review of machine vision research in agricultural vehicle guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 133 – 136. (in Chinese)
- 17 Marchant J A, Hague T, Tillett N D. Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1997, 16(2): 165 – 175.
- 18 Bakker T, Wouters H, Asselt K V, et al. A vision based row detection system for sugar beet [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 87 – 95.
- 19 Astrand B, Baerveldt A J. A vision based row-following system for agricultural field machinery [J]. Mechatronics, 2005, 15(2): 251 – 269.
- 20 Han S, Zhang Q, Ni B, et al. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 179 – 195.
- 21 Subramanian V, Burks T F, Arroyo A A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 53(2): 130 – 143.
- 22 Kise M, Zhang Q, Más F R. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 357 – 367.
- 23 Yin X, Noguchi N, Choi J. Development of a target recognition and following system for a field robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 17 – 24.
- 24 沈明霞, 姬长英, 张瑞合. 基于农田景物边缘的农业机器人自定位方法[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 49 – 51.
Shen Mingxia, Ji Changying, Zhang Ruihe. Self-location of an agricultural robot based on cropland edges [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 49 – 51. (in Chinese)
- 25 周俊, 姬长英. 基于视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制[J]. 机器人, 2002, 24(3): 209 – 212.
Zhou Jun, Ji Changying. Lateral optimal control for wheeled mobile robot navigated by machine vision [J]. Robot, 2002, 24(3): 209 – 212. (in Chinese)
- 26 周俊, 姬长英. 视觉导航轮式移动机器人横向预测模糊控制[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 76 – 79.
Zhou Jun, Ji Changying. Lateral predictive fuzzy logic control for wheeled mobile robot navigated by machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 76 – 79. (in Chinese)
- 27 周俊, 姬长英. 智能车辆横向控制研究[J]. 机器人, 2003, 25(1): 26 – 30.
Zhou Jun, Ji Changying. Lateral control of intelligent vehicle[J]. Robot, 2003, 25(1): 26 – 30. (in Chinese)
- 28 周俊, 姬长英. 基于知识的视觉导航农业机器人行走路径识别[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 101 – 105.
Zhou Jun, Ji Changying. Road recognition for agricultural robot guided by machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 101 – 105. (in Chinese)
- 29 周俊, 姬长英. 农业机器人视觉导航中多分辨率路径识别[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 120 – 123.
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-resolution road recognition for vision navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for

- Agricultural Machinery, 2003,34(6):120-123. (in Chinese)
- 30 周俊,刘成良,姬长英. 农业机器人视觉导航的预测跟踪控制方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(6):106-110.
Zhou Jun, Liu Chengliang, Ji Changying. Predictive tracking and control method for vision-guided navigation of agricultural robot [J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(6):106-110. (in Chinese)
- 31 周俊,姬长英,刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报,2005,36(3):90-94.
Zhou Jun, Ji Changying, Liu Chengliang. Visual navigation system of agricultural wheeled-mobile robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(3):90-194. (in Chinese)
- 32 周俊,刘成良,姬长英. 农用轮式移动机器人相对位姿的求解方法[J]. 中国图象图形学报,2005,10(3):310-314.
Zhou Jun, Liu Chengliang, Ji Changying. Pose sensing of agricultural wheeled mobile robot [J]. Journal of Image and Graphics, 2005,10(3):310-314. (in Chinese)
- 33 Zhou Jun, Ji Changying, Liu Chengliang. Novel pose measurement for agricultural vehicle guided by machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(6):110-114.
- 34 赵颖,陈兵旗,王书茂,等. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报,2006,37(4):83-86.
Zhao Ying, Chen Bingqi, Wang Shumao, et al. Fast detection of furrows based on machine vision on autonomous mobile robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(4):83-86. (in Chinese)
- 35 孙元义,张绍磊,李伟. 棉田喷药农业机器人的导航路径识别[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(2):206-209.
Sun Yuanyi, Zhang Shaolei, Li Wei. Guidance lane detection for pesticide spraying robot in cotton fields [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007,47(2):206-209. (in Chinese)
- 36 安秋,李志臣,姬长英,等. 基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J]. 农业工程学报,2009,25(11):208-212.
An Qiu, Li Zhichen, Ji Changying, et al. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(11):208-212. (in Chinese)
- 37 冯娟,刘刚,司永胜,等. 果园视觉导航基准线生成算法[J]. 农业机械学报,2012,43(7):185-189,184.
Feng Juan, Liu Gang, Si Yongsheng, et al. Algorithm based on image processing technology to generate navigation directrix in orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):185-189,184. (in Chinese)
- 38 孟庆宽,刘刚,张漫,等. 基于线性相关系数约束的作物行中心线检测方法[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):216-223.
Meng Qingkuan, Liu Gang, Zhang Man, et al. Crop rows detection based on constraint of liner correlation coefficient [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 216-223. (in Chinese)
- 39 李景彬,陈兵旗,刘阳. 棉花铺膜播种机导航路线图像检测方法[J]. 农业机械学报,2014,45(1):40-45.
Li Jingbin, Chen Bingqi, Liu Yang. Study on image detection method of navigation route of the cotton plastic film mulch planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):40-45. (in Chinese)
- 40 田光兆,安秋,姬长英,等. 基于立体视觉的智能农业车辆实时运动检测[J]. 农业机械学报,2013,44(7):210-215.
Tian Guangzhao, An Qiu, Ji Changying, et al. Real-time motion detection for intelligent agricultural vehicle based on stereo vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 210-215. (in Chinese)
- 41 Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25(1-2): 133-153.
- 42 Tosaki K, Miyahara S, Ichikawa T, et al. Development of microcomputer controlled driverless air blast sprayer part 1: unmanned traveling system [J]. Journal of the Japanese Society of Agriculture Machinery, 1996,58(6): 101-110.
- 43 宋健,张宾,张铁中. 电磁诱导式喷雾机器人导航系统[J]. 农业机械学报,2005,36(12):91-94.
Song Jian, Zhang Bin, Zhang Tiezhong. Navigation system of spraying robot by electromagnetic guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(12):91-94. (in Chinese)
- 44 杨世胜,张宾,于曙风,等. 电磁诱导农用喷雾机器人路径导航系统的设计与实现[J]. 机器人,2007,29(1):78-81,87.
Yang Shisheng, Zhang Bin, Yu Shufeng, et al. Design and implementation of the navigation system for an electromagnetic guided agricultural spraying robot [J]. Robot, 2007,29(1):78-81,87. (in Chinese)
- 45 Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25(1-2): 169-194.
- 46 朱磊磊,陈军,白晓鸽,等. 基于曲柄滑块机构原理导航的农业机器人设计[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):33-36.
Zhu Leilei, Chen Jun, Bai Xiaoge, et al. Design of agricultural robot navigated by the slider-crank mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):33-36. (in Chinese)
- 47 何卿,高焕文,李洪文. 接触式拖拉机导航控制系统[J]. 农业机械学报,2008,39(1):97-101.
He Qing, Gao Huanwen, Li Hongwen. Automatic guidance control system of tractors with contact sensor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(1):97-101. (in Chinese)
- 48 张明颖,陈军. 轮式拖拉机机械诱导导航技术研究[J]. 农机化研究,2011,33(6):210-213.
Zhang Mingying, Chen Jun. Machine-induced navigation technology of wheeled tractor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(6):210-213. (in Chinese)
- 49 Chateau T, Debain C, Collange F, et al. Automatic guidance of agricultural vehicles using a laser sensor [J]. Computers and

- Electronics in Agriculture, 2000,28(3): 243 – 257.
- 50 Oscar C, Mizushima A, Ishii K, et al. Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application [J]. Biosystems Engineering, 2007,96(2): 139 – 149.
- 51 Hiremath S A, Heijden G W, Evert F K, et al. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014,100: 41 – 50.
- 52 刘沛, 陈军, 张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 196 – 199.
Liu Pei, Chen Jun, Zhang Mingying. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 196 – 199. (in Chinese)
- 53 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)
- 54 Toda M, Kitani O, Okamoto T, et al. Navigation method for a mobile robot via sonar-based crop row mapping and fuzzy logic control [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(4): 299 – 309.
- 55 Hague T, Marchant J A, Tillett N D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1 – 2): 11 – 28.
- 56 郑天鹏, 陈军, 夏文斌. 基于红外触发的农业机器人超声波定位系统研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(6): 133 – 136.
Zheng Tianpeng, Chen Jun, Xia Wenbin. Research on ultrasonic positioning system of agricultural robot based on infrared trigger [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(6): 133 – 136. (in Chinese)
- 57 高云. 农业机器人的超声波测距系统设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(4): 76 – 79.
Gao Yun. The design of ultrasonic ranging system in agriculture robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 76 – 79. (in Chinese)
- 58 Noguchi N, Ishii K, Terao H. Development of an agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensors [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(1): 1 – 15.
- 59 傅慷, 余杰, 钱富. 地磁导航的相关技术研究[J]. 船电技术, 2013, 33(4): 31 – 33.
Fu Kang, Yu Jie, Qian Fu. Study on geomagnetic navigation [J]. Marine Electric & Electric Technology, 2013, 33(4): 31 – 33. (in Chinese)
- 60 王东署, 王佳. 未知环境中移动机器人环境感知技术研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(15): 187 – 191.
Wang Dongshu, Wang Jia. Overview of mobile robots environmental perception technology research in unknown environments [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(15): 187 – 191. (in Chinese)
- 61 杨俊友, 马乐, 白殿春, 等. 机器人的混合特征视觉环境感知方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 114 – 122.
Yang Junyou, Ma Le, Bai Dianchun, et al. Mixing characteristics of the robot visual environment sensing method [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(1): 114 – 122. (in Chinese)
- 62 Correa J, Soto A. Active visual perception for mobile robot localization [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 58(3 – 4): 339 – 354.
- 63 Åstrand B, Baerveldt A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control [J]. Autonomous Robots, 2002, 12(1): 21 – 35.
- 64 Freitas G, Zhang J, Hamner B, et al. A low-cost, practical localization system for agricultural vehicles [C] // Intelligent Robotics and Applications, Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7508: 365 – 375.
- 65 He B, Liu G, Ji Y, et al. Auto recognition of navigation path for harvest robot based on machine vision [C] // Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, 2011, 344: 138 – 148.
- 66 韩永华, 汪亚明, 康锋, 等. 基于小波多分辨率分解的农田障碍物检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 215 – 221.
Han Yonghua, Wang Yaming, Kang Feng, et al. Detection of obstacles in farmland based on wavelet multi-resolution transform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 215 – 221. (in Chinese)
- 67 周俊, 程嘉煜. 基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 154 – 158.
Zhou Jun, Cheng Jiayu. Moving obstacle detection based on machine vision for agricultural mobile robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 154 – 158. (in Chinese)
- 68 李盛辉, 周俊, 姬长英, 等. 基于全景视觉的智能农业车辆运动障碍目标检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 239 – 244.
Li Shenghui, Zhou Jun, Ji Changying, et al. Moving obstacle detection based on panoramic vision for intelligent agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 239 – 244. (in Chinese)
- 69 田海清, 应义斌, 张方明. 农业车辆导航系统中自动控制技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 148 – 152.
Tian Haiqing, Ying Yibin, Zhang Fangming. Development of automatic control technique for agricultural vehicle guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 148 – 152. (in Chinese)
- 70 陈军, 朱忠祥, 鸟巢京, 等. 基于神经网络的农用车辆自动跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 131 – 133, 121.
Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu Ryo, et al. Automatic on-tracking control of farm vehicle based on neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 131 – 133, 121. (in Chinese)
- 71 Noguchi N, Terao H. Path planning of an agricultural mobile robot by neural net work and genetic algorithm [J]. Computer and

- Electronics in Agriculture, 1997, 18(2-3): 187-204.
- 72 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205-210.
Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205-210. (in Chinese)
- 73 陈军, 鸟巢谅, 朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 104-107.
Chen Jun, Torisu Ryo, Zhu Zhongxiang. Study on automatic guidance for tractor on grassland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 104-107. (in Chinese)
- 74 Vougioukas S, Blackmore S, Nielsen J, et al. A two-stage optimal motion planner for autonomous agricultural vehicles [J]. Precision Agriculture, 2006, 7(5): 361-377.
- 75 Dong F H, Petzold O, Heinemann W, et al. Time-optimal guidance control for an agricultural robot with orientation constraints [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 99: 124-131.
- 76 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 151-156.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151-156. (in Chinese)
- 77 任永新, 李伟, 陈晓, 等. 非结构环境下基于机器视觉的机器人路径跟踪方法[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(10): 1021-1025.
Ren Yongxin, Li Wei, Chen Xiao, et al. Path following control for mobile robot based on machine vision in unstructured environment [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(10): 1021-1025. (in Chinese)
- 78 Ryu B S, Yang H S. An enhanced topological map for efficient and reliable mobile robot navigation with imprecise sensors [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1998, 14(3): 185-197.
- 79 Rovira-Mús F. Global-referenced navigation grids for off-road vehicles and environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(2): 278-287.
- 80 Cheein F A, Steiner G, Paina G P, et al. Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(2): 195-207.
- 81 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 基于 Gray-EKF 算法的智能农业车辆同时定位与地图创建[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 17-25.
Tian Guangzhao, An Qiu, Ji Changying, et al. Simultaneous localization and mapping based on Gray EKF for intelligent agricultural vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 17-25. (in Chinese)

Current Situation of Navigation Technologies for Agricultural Machinery

Ji Changying Zhou Jun

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Navigation is a key technology for agriculture machinery when it works automatically, and it becomes a hotspot in research field of agricultural machinery at present. In this paper, literatures are reviewed according to the main ways and key technologies of navigation of agricultural machinery. First of all, navigation technologies based on global positioning system and machine vision were reviewed in detail. Then other ways such as electromagnetic navigation, mechanical navigation, laser navigation, ultrasonic navigation, geomagnetic navigation were reviewed briefly. Sensing of environment, control methods and mapping of environment as the key technologies of the navigation were introduced respectively. Finally, the future development of navigation technologies for agricultural machinery was analyzed.

Key words: Agricultural Machinery Navigation Review