

DOI:CNKI:61-1390/S.20111025.2133.032

网络出版时间:2011-10-25 21:33

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111025.2133.032.html>

# 移动机器人自动导航技术研究进展

蒋浩然, 陈 军, 王 虎, 雷王利, 袁 池

(西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**[摘 要]** 针对目前果园移动机器人自动导航技术研究现状, 综合分析现有的有关文献, 依据环境感知方式的不同, 分别讨论了以激光、视觉、机械、电磁、GPS、超声波为感知系统的导航方法的研究进展, 分析了现有几种导航方法在精度、实时性、抗干扰能力及系统适应性等方面的优缺点, 认为多传感器融合技术可为果园移动机器人的导航提供更高的精度和稳定性。在此基础上, 提出了未来果园移动机器人自动导航技术的发展趋势, 即多传感器融合技术是果园移动机器人感知环境的主要手段, 满足果园移动机器人精度和稳定性要求的导航系统将是今后研究的重点。

**[关键词]** 果园; 移动机器人; 导航技术; 多传感器融合

**[中图分类号]** TP242.6

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2011)12-0207-07

## Research progress of automatic navigation technology for orchard mobile robot

JIANG Hao-ran, CHEN Jun, WANG Hu, LEI Wang-li, YUAN Chi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The existing related literatures were analyzed based on the current research progress of the orchard mobile robot's automatic navigation technology. According to the different environmental perception methods, the current research status of the navigation methods with perception systems based on laser, vision, machinery, electromagnetism, ultrasonic and GPS were discussed respectively; the advantages and disadvantages of each method in terms of navigation accuracy, real time, anti-jamming capability and the flexibility of the system were also discussed. Then we believe that the multi-sensor fusion technology could provide higher precision and stability for the orchard mobile robots' automatic navigation. On that basis, this paper proposed the development tendency of automatic navigation technology for orchard mobile robot in the future, multi-sensor fusion technology would become the main method of the environment perception for orchard mobile robot. Therefore, the development of the navigation system with required accuracy and stability for the orchard mobile robot would be the emphasis of the future research.

**Key words:** orchard; mobile robot; navigation technique; multi-sensor fusion

中国是水果生产大国, 但并不是水果产业强国<sup>[1]</sup>。目前, 我国果园无论面积还是产量均居世界第一, 但果树种植和管理技术落后, 果园作业呈现机械化程度低、劳动强度高、生产成本中劳动力比重大

的特点。针对这一现状, 开发适合果园作业的先进装备势在必行。

农业机器人研究在 1982 年始于日本京都大学<sup>[2]</sup>。近 30 年来, 随着科学技术的飞速发展, 农业

\* [收稿日期] 2011-05-20

[基金项目] 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2009JM3018); 中央高校基本科研业务费项目(QN2009041)

[作者简介] 蒋浩然(1987—), 男, 安徽宁国人, 在读硕士, 主要从事智能化农业装备技术研究。

[通信作者] 陈 军(1970—), 男, 宁夏固原人, 副教授, 博士生导师, 主要从事智能化农业装备技术研究。

机器人已经成为现代化农业装备研究的重要组成部分。目前,农业机器人相关理论研究在大田农业领域已经取得了重要进展<sup>[3-10]</sup>。而果园作业现场受自然环境(坡度、地面障碍、地表条件、气候条件)影响很大,因此,适用于果园的农业机器人研究难度相对较大<sup>[11]</sup>。自动驾驶技术是移动机器人研究中的一项重要内容<sup>[12]</sup>,通过导航系统对周围环境的感知,对机器人进行实时精准定位,能够使机器人完成多项工作。作为果园移动机器人研究开发的基础工作,果园移动机器人自动驾驶系统的研究受到各国学者的重视,目前使用的导航方式有激光导航、视觉导航、机械导航、电磁导航、超声波导航、GPS 导航等。但由于感知方式及不同果园环境的差异,不同导航方式在果园中的导航精度和稳定性存在差异。为了建立果园移动机器人精确稳定的导航系统,本研究对现有导航方式的研究进展进行了综述,分析了各种导航方式的异同及优劣,以期为今后果园移动机器人导航系统的研究提供参考。

## 1 机械导航

在果园移动机器人导航系统的早期研究中,众多学者重点关注了机械导航。机械导航具有机构简单、可靠性高、容易维护等优点。日本生研中心针对树冠较矮、坡度在 $6^{\circ}$ 以下、转弯半径确保在 1 m 以上的果园开发出了基于管道导航的植保机器人,在果园内的作业道路上铺设聚乙烯管道,辅助诱导轮沿管道前进实现无人驾驶作业,机器人行进方向由复式前轮的辅助诱导轮决定<sup>[13]</sup>。这种植保机器人在日本已经投入到实际应用,但其使用条件有一定限制,在一些转弯半径较小,坡度较大的果园中尚无法应用。针对陡坡果园的情况,日本生研中心开发了回行式和直线式 2 种多用途单轨车<sup>[14]</sup>,日本四国农业研究中心也开发了在树冠上方行走的单轨车<sup>[15]</sup>。使用单轨车后,农药使用量仅为普通喷洒植保作业的 50% 左右,同时搬运和施肥作业的劳动强度也大大降低,但在果园中大量铺设这种轨道会提高成本,而且并没有实现劳动力的完全解放。

国内关于机械导航的研究起步较晚,并且多处于试验阶段。朱磊磊等<sup>[16]</sup>基于曲柄滑块机构原理开发了一种果园用履带式移动机器人自动驾驶系统,该系统采用模糊 PID 控制,测试结果表明,当机器人以 0.15 m/s 的速度直线行走时,最大跟踪误差小于 0.02 m;机器人转弯半径为 2 m 时,最大跟踪误差小于 0.05 m。此研究目前还处于模拟果园试验阶段,同时机器

人运行速度较低,导致作业效率不高。

## 2 电磁导航

电磁导航又称地下埋线导航,由美国在 20 世纪 50 年代最先开发成功,因其具有抗干扰能力强、技术简单实用、使用寿命长等优点,到 20 世纪 70 年代这种导航方式迅速发展并广泛应用于生产<sup>[17]</sup>。国内外学者基于电磁导航原理开发了多款果园移动机器人导航系统。日本生研中心研究开发了诱导电缆式果树无人植保机,沿园内作业路线在地下、地面或空中铺设电缆,机器人沿电缆行走,基于模糊控制理论设计行走控制算法<sup>[18]</sup>,这款无人植保机已达到了实用化程度,其不仅可以防止操作者受到农药伤害,也能够减轻劳动强度。但此种导航方式在铺设电缆时,电缆的位置和结构计算较为复杂,电缆铺设好后,改造和维护也较为困难,这些缺点限制了电磁导航的大规模应用。在国内,中国农业大学的宋健等<sup>[19]</sup>在电磁导航方面进行了深入的研究,研制了多代电磁诱导农用喷雾机器人,并进行了直线行走和转弯试验,取得较好的试验结果,但离实际应用仍有距离。

## 3 超声波导航

超声波传感器因为其不可接触性,在距离测量与避障等方面具有显著优势<sup>[20]</sup>,因此广泛应用在移动机器人的障碍物检测、定位等领域。Ogawa 等<sup>[21]</sup>开发了基于超声波导航定位的果园喷药机器人,该机器人能在葡萄架下自动精确喷洒农药,并准确记录操作过程。其优点在于通过精确操控和准确记录,可以实现化学药剂的精确管理,减少了农药的施用量,符合精细农业的发展方向。但超声波不适合高速测量,且易受外界环境干扰,探测波束角大<sup>[22]</sup>,同时由于其能量会随着传播距离的增加而衰减,不能进行远距离测量。因此,超声波传感器多与其他传感器结合用于果园移动机器人的导航。日本东京大学结合超声波传感器和红外线传感器开发了车辆跟随系统,可以由一人操作实现多台机器同时作业,既减轻了劳动强度,又提高了工作效率<sup>[23]</sup>,因此,车辆跟随系统是今后果园移动机器人的发展趋势。Iida 等<sup>[24]</sup>利用超声波传感器和 DGPS 对果园移动机器人进行导航,利用超声波传感器测量果树与机器人之间的相对位置,其传感器为 3 对超声波发射接收装置,两两相距 30 cm。当机器人处于静止状态时,3 个传感器最大平均误差为 0.03 m;当机器人以 1.8 m/s 的速度行驶时,平均误差为 0.2 m。该研究

表明,将 GPS 和超声波传感器共同用于果园移动机器人的导航,可以有效提高导航精度。

## 4 GPS 导航

GPS 是美国于 20 世纪 70 年代开始研制,并于 1994 年完全建成的具有三维导航与定位能力的卫星定位系统。因为具有精度高、速度快、全天候作业、精准授时测速等优点,GPS 在车辆导航、精准农业等领域得到了广泛的应用。但 GPS 信号在果园中会受到果树树冠的阻挡,导致果园移动机器人不能稳定地接收卫星信号,因此在果园中应用 GPS 导航会有一定的局限性。Min 等<sup>[25]</sup>研究了 6 种常用的 GPS 接收器在果园中的静态和动态精度,发现 GPS 接收器的类型对静态和动态精度均有显著影响,GPS 天线高度对动态精度有影响。Lee 等<sup>[26]</sup>以 DGPS 为导航传感器,采用模糊控制理论和遗传算法作为控制方法,研究开发了一款果园植保机器人的自动驾驶系统,其 RMS 误差不超过 0.3 m。王万章等<sup>[27]</sup>利用 DGPS 和超声波传感器测量果树的冠径,利用 DGPS 描述拖拉机的行驶轨迹,其从初始的拖拉机行驶轨迹看出,GPS 信号接收效果及定位精度均不理想,因此又用电子罗盘修正 GPS 信号,但误差仍相对较大。通过该研究可以看出,GPS 导航在果树行间的应用尚存在局限性,只适于树干较小及枝叶稀疏的果园。在地头转弯时,由于不存在树冠阻挡,GPS 接收机可以稳定接收卫星信号。因此,将 GPS 和其他导航方式综合应用,可以实现移动机器人在整个果园的自动驾驶。

## 5 激光导航

随着计算技术、电子技术以及控制技术的不断发展,因激光导航和视觉导航具有能够完全解放劳动力的优点,研究人员对其给予了更多的关注。近年来,激光雷达因其测量精度高,能够以较高频率提供大量距离信息等优点,在移动机器人导航中应用越来越多<sup>[28]</sup>。在室外移动机器人研究中,激光多用于避障,而在果园环境下,可以利用激光扫描获取的果树位置信息作为导航信息,实现果园环境下移动机器人的导航。日本学者开发了基于激光导航的果园移动机器人导航系统,其采用 Hough 变换检测果树行,实现了移动机器人在果树行间的直线行走,试验得到的横向和航向误差分别为 0.11 m 和 1.5°<sup>[29-31]</sup>,这个精度能够满足移动机器人在果园中自动行走的要求。Lee 等<sup>[32]</sup>基于佛罗里达州柑橘收获现

状,设计了以 LMS 200 激光扫描仪为导航设备,采用 PID 控制的移动机器人跟随控制系统。但上述研究只对果树行间的直线路径进行了探讨,并未涉及到曲线路径和地头转弯情况,存在一定的局限性。Hamner 等<sup>[33]</sup>开发了利用激光感知周围环境的果园多用途自主移动机器人 APM,并基于开环控制理论控制机器人的地头转弯,在不同果园中的转弯成功率为 50%~90%,尚缺乏稳定性;该研究中机器人的转弯性能随果园自身环境的变化而变化,如果地头存在障碍物缺失情况,系统就无法获取有效导航信息,因此系统不具有果园环境的普遍适应性。

国内学者将激光导航用于果园移动机器人的研究起步较晚。刘沛等<sup>[34]</sup>设计了基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统,实现了拖拉机在模拟果园环境下的直线行走功能,在 30 m 的行驶距离内,最大横向偏差为 0.15 m。此系统的优点在于能够快速、准确采集果树位置信息,模拟果园环境试验结果显示该系统可靠性较高,但拖拉机测试速度较低,当速度提高时,可靠性会随之降低,同时缺乏真实果园环境的实车试验。于金霞等<sup>[35]</sup>对激光的测距性能进行了研究,分析了激光雷达在不同测量距离、不同反射率、不同灰度及速度下的统计特性。袁夏等<sup>[36]</sup>以激光雷达为导航传感器,提出了一种可应用于结构化和半结构化环境的路面提取算法,试验结果表明,该算法不仅能在结构化环境下提取路面信息,而且可在路边形状不规则的半结构环境下提取路面信息。以上研究成果虽对果园移动机器人导航系统的研究具有一定的参考价值,但由于果园环境非结构化的特点,还需对以上算法进行改进,使其适于果园这种特殊环境。

## 6 视觉导航

随着计算机技术、数码技术、图像传感器和图像算法的不断改进,机器视觉在农业工程中的应用更加广泛<sup>[37-39]</sup>。视觉图像具有收集信息丰富、目标信息完整等特点,因此成为果园移动机器人导航系统的一个重要研究方向。目前,果园移动机器人视觉导航技术的研究主要集中在导航参数的获取和导航控制算法的设计方面<sup>[40]</sup>。

从果园环境中获取的图像存在大量噪声干扰,果树信息的缺失也会造成图像信息的丢失,上述原因都会导致移动机器人不能满足实时性要求。为此,众多学者提出了多种改进图像处理算法。Han 等<sup>[41]</sup>提出了一个能够有效获取车辆自动驾驶系统

中导航准线的程序。杨庆华等<sup>[42]</sup>提出了一种适于林业环境的改进 Hough 算法,对其进行预定限制,使运算量减少,可实现批量处理。Chen 等<sup>[43]</sup>提出了一种果园环境下导航路径识别算法,该算法由中值滤波、平均灰度转换、阈值分割、边缘检测和直线检测组成,对采集到的照片用此算法进行处理能取得较好的结果;但该算法并未在真实果园中进行实车试验,而在果园中进行图像动态采集时会面临更多的噪声干扰,所以其性能尚待进一步检验。

立体视觉能够提供三维图像信息,极大地拓展了视觉导航的研究。Takahashi 等<sup>[44]</sup>采用双目视觉模拟人眼聚焦原理采集物体的三维图像信息,对树木、苹果和人等物体进行的试验表明,在被测物体宽度不大、物体颜色及颜色密度的变化能与周围环境有所区分时,29 m 距离范围内的误差为 5%~10%。双目视觉的方法对于获取物体的三维信息很有效,但需要提高计算颜色密度平均变化的速度以及图像处理的速度。Rovira-Más 等<sup>[45-46]</sup>对提高立体视觉算法的实时性进行了深入研究,先后提出了通过光谱分析提高地图差异性 & 通过提取导航有效信息处理点簇等方法,在果园环境中取得了较好的试验效果,这些方法在一定程度上解决了立体视觉数据量大及其非结构性不适合利用传统模型处理的不足,但该算法的稳定性还需进一步检验。

## 7 基于多传感融合技术的导航

果园环境复杂,使用一种传感器往往不能获取足够的导航信息,同时现代农业对农业机器人的导航精度、稳定性以及安全性等要求越来越高,单独使用一种传感器可能会由于果园环境中存在的大量噪声干扰而产生一些偶然错误,从而影响导航的精度和稳定性。因此,果园移动机器人导航的发展趋势是将多种传感器结合使用,融合各自信息,为机器人的运动提供高精度的导航信息。多传感器信息融合是指将多个传感器或多源的信息通过一定的算法进行综合处理,从而得到更准确、更可靠的导航效果。目前常用的信息融合方法有证据方法、航迹融合的分层法、贝叶斯方法、卡尔曼滤波法、模糊逻辑推理法以及神经网络法等<sup>[47]</sup>,其中以卡尔曼滤波法和模糊逻辑法的应用最多。

卡尔曼滤波是 Kalman 于 1960 年提出的一种著名算法,其核心是利用递推的方法估计导航系统的各种状态,并通过估计的状态去校正系统。该方法适合低层不确定数据的融合,可在没有存储任何

历史数据的情况下使用<sup>[48]</sup>,因此在多传感器融合技术中得到了广泛应用。Khot 等<sup>[49]</sup>基于苗圃环境设计了一款机器人导航控制系统,该系统的传感装置由 RTK-GPS、DMU 和激光扫描仪组成,利用二阶自回归模型消除 RTK-GPS 中的噪声,并通过改进的卡尔曼滤波器融合 3 种传感器信息,试验表明其对果树的平均定位误差为 4.4 cm。该研究表明,基于卡尔曼滤波融合算法,可使移动机器人导航系统对果树的定位精度显著提高。Libby 等<sup>[50]</sup>研究开发了一款果园移动机器人的导航控制系统,其应用光电编码器、车轮转角传感器等内部传感器估计机器人的初始位姿状态,然后利用卡尔曼滤波器融合通过激光扫描获得的信息,对机器人的位姿状态进行修正,此系统在果园中能得到半米级精度的试验结果。以标准化果园来看,半米精度基本能够满足果园应用,此系统的优势在于成本相对较低。国内也有学者研究利用多传感器融合进行果园移动机器人的导航。Chen 等<sup>[51]</sup>进行了基于内部信息的农业移动机器人跟踪控制研究,其仅利用内部传感器检测移动机器人的各种状态信息,同时利用卡尔曼滤波对内部传感器信息进行融合,并设计模糊控制器,实现了移动机器人短距离直线跟踪控制,该研究的意义在于提供了一种能够在视觉导航系统和 GPS 导航系统存在信息缺失及信号不稳定等情况下,保证对机器人实现有效控制的方法,可用于移动机器人在果园的果树行间与地头转弯过渡段的导航。但卡尔曼滤波法的使用也存在一定的条件限制,如果移动机器人的运动状态能用线性模型描述且模型误差和传感器的测试误差能用高斯白噪声模型化,则卡尔曼滤波法可在统计意义上提供融合数据的最优估计;反之,使用卡尔曼滤波法的效果将会下降<sup>[52]</sup>。而实践表明,果园实际环境中的噪声往往是有色噪声,因此,在果园环境中,单纯利用卡尔曼滤波法进行多传感器融合尚存在一定的局限性。

在多传感器融合过程中,由于融合信息存在不确定性,不能将其直接归类或采用明确的规则,而模糊逻辑推理方法不需要精确的数学模型,能够避免因系统模型不准确而产生的误差,因此,这种方法在多传感器融合中也得到了广泛采用<sup>[48]</sup>。Cho 等<sup>[53]</sup>针对果园中喷洒农药对人身安全伤害较大的问题,研究开发了智能拖拉机系统用于果树农药的喷洒,其总共设计了 13 条模糊逻辑规则,并运用模糊推理的方法对机器视觉信息和超声波传感器信息进行融合,实现了拖拉机在果园中的自动行走。同时,Cho

等<sup>[54]</sup>还利用同样的思想对 DGPS 信号和超声波传感器信号进行融合,将得到有效导航信息用于果园移动机器人的导航,果园实车试验表明此方法的导航误差较小。模糊逻辑推理方法在果园移动机器人导航系统中的应用也存在缺陷:首先,由于模糊逻辑推理方法主要依据局部信息,缺乏整体考虑,可能会引起移动机器人的运动稳定性降低;同时,由于移动机器人是一个高度非线性系统,果园复杂的环境会产生大量噪声干扰,两者都会导致设计的模糊逻辑规则不够完善,进而影响传感器的融合效果。

考虑到多传感器融合方法均存在各自的优势和局限性。国外有学者将两种信息融合方法结合使用,取得了较好的效果。Subramanian 等<sup>[55]</sup>将激光传感器、机器视觉、IMU 惯性导航传感器及超声波传感器组合用于果园移动机器人的导航,其在多传感器信息融合中结合使用了卡尔曼滤波法和模糊逻辑推理方法,首先通过卡尔曼滤波对传感器信息进行去噪处理,并对这些信息进行融合,考虑到固定参数的卡尔曼滤波器应用的局限性,其又利用模糊逻辑推理方法对卡尔曼滤波器参数进行实时更新,期望获得较高精度的导航信息,并利用模糊控制理论对移动机器人的运动进行控制,在其所搭建的测试环境中,当机器人的运动速度为 1.8 和 3.1 m/s 时,导航系统的平均误差分别为 1.5 和 1.9 cm,最大误差不超过 4 cm;在果园实车试验中,车辆轨迹的平均误差小于 10 cm,与 Subramanian 等<sup>[56]</sup>之前单独利用激光和视觉进行导航时得到的试验结果相比,该系统导航精度与稳定性均大大提高。由此可以预见,多种传感器融合技术的结合使用,在未来果园移动机器人的发展中有很大的应用潜力。

## 8 研究展望

自动导航技术作为果园移动机器人研究中的一项重要内容,现已成为该领域的研究热点。目前已存在的果园移动机器人的导航方式主要有机械、电磁、超声波、GPS、激光及视觉几种。随着计算机技术、控制技术的发展,激光和视觉导航因具有精度高、能完全解放劳动力等优点,逐渐成为果园移动机器人导航系统中应用最多的导航传感器。同时,现代农业对农业机器人的导航精度、稳定性以及安全性的要求越来越高,单一的传感器已经不能满足要求。因此,多传感器融合技术将是未来果园移动机器人感知环境的主要手段,未来的导航系统将以激光传感器和视觉传感器为主,结合其他多种传感器,

进行合理组合,形成导航精度高、抗干扰能力强、具有自适应功能的导航系统。由于果园环境复杂,存在大量随机噪声,并且传感器信息来源复杂,单独一种多传感器融合策略并不能很好地融合多源信息,因此在未来的研究中,需要考虑果园实际环境以及移动机器人自身的特点,结合多种传感器策略,通过改进与完善,以获得一种能够适合于果园这种特殊环境的多传感器融合策略;通过硬件和软件两部分的研究综合,得到果园移动机器人的最佳导航系统,以满足现代农业对导航精度、稳定性和安全性越来越高的要求。

## [参考文献]

- [1] 王万章,洪添胜,李捷,等.果树农药精确喷雾技术[J].农业工程学报,2004,20(6):98-101.  
Wang W Z, Hong T S, Li J, et al. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 98-101. (in Chinese)
- [2] 近藤直, 门田充司, 野口伸. 农业机器人: I. 基础和理论 [M]. 乔军, 陈兵旗, 译. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.  
Naoshi K, Mitsuji M, Noboru N. Agri-robot: I. Fundamentals and theory [M]. Qiao J, Chen B Q, translate. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. (in Chinese)
- [3] Noboru N. Development of a master-slave robot system for farm operations [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 1-19.
- [4] Sugiural R. Remote sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 369-379.
- [5] Mehta S S, Burksa T F, Dixon W E. Vision-based localization of a wheeled mobile robot for greenhouse applications: A daisy-chaining approach [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63: 28-37.
- [6] Starcevic N, Thullner C, Bux M, et al. 3D path planning for a biomass processing robot via motion simulation [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(1): 109-118.
- [7] Huang Y J, Lee F F. An automatic machine vision-guided grasping system for Phalaenopsis tissue culture plantlets [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70: 42-51.
- [8] García-Pérez L, García-Alegre M C, Ribeiro A, et al. An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60: 39-48.
- [9] Alberto T, Xavier P B, Gonzalo P. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70: 144-155.
- [10] 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 X W, Zhang Z G, Zhao Z X, et al. Design of DGPS naviga-

- tion control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (11): 139-145. (in Chinese)
- [11] 李竞驰. 果园多作业辅助机器人系统研究与设计 [D]. 辽宁沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- Li J C. Research of a robot system for multi-assistant managing in the orchard and its design [D]. Shenyang, Liaoning: Shenyang University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 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 H Q, Ying Y B, Zhang F M. 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)
- [13] 近藤直, 门田充司, 野口伸. 农业机器人: II. 机构和事例 [M]. 孙明, 李民赞, 译. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- Naoshi K, Mitsuiji M, Noboru N. Agri-robot: II. Mechanisms and practice [M]. Sun M, Li M Z, translate. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. (in Chinese)
- [14] Koichiro O, Masahiro M, Yuji N, et al. Automation of farm work by an overhead monorail system in steep sloped citrus orchards [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1996, 58 (3): 103-109.
- [15] Mikio K, Satoshi Y, Keiji A, et al. Development of multipurpose monorail for hillside orchards (Part 2): Development of S-shaped monorail system and the results of field test [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2008, 70 (3): 115-123.
- [16] 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 (S1): 33-36.
- Zhu L L, Chen J, Bai X G, et al. Design of agricultural robot navigated by the slider-crank mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (S1): 33-36. (in Chinese)
- [17] 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 S S, Zhang B, Yu S F, et al. Navigation system of spraying robot by electromagnetic guidance [J]. Robot, 2007, 29 (1): 78-81, 87. (in Chinese)
- [18] Koichi T, Sumihiko M, Tomohiko I, et al. Development of microcomputer controlled driverless air blast sprayer: I. Unmanned traveling system [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1996, 58 (6): 101-110.
- [19] 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 J, Zhang B, Zhang T Z. Navigation system of spraying robot by electromagnetic guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (12): 91-94. (in Chinese)
- [20] 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 J P, Lin M L. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 (9): 232-236. (in Chinese)
- [21] Ogawa Y, Kondo N, Monta M, et al. Pesticide robot based on the ultrasonic navigation and positioning [J]. Field and Service Robotics, 2006, 24: 39-548.
- [22] 梁焕兵. 基于 RFID 和超声波传感器的移动机器人研制及导航研究 [D]. 湖北武汉: 武汉理工大学, 2009.
- Liang H B. Design of mobile robot based on RFID and ultrasonic sensor and research of navigation [D]. Wuhan, Hubei: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [23] Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25 (1): 133-153.
- [24] Iida M, Burks T F. Ultrasonic sensor development for automatic steering control of orchard tractor [C]//Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July, 2002 Conference. Chicago, Illinois, USA: ASABE, 2002: 221-229.
- [25] Min M, Ehsani R, Salyani M. Dynamic accuracy of GPS receivers in citrus orchards [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24 (6): 861-868.
- [26] Lee J H, Cho S I, Lee J Y. Autonomous speed sprayer using DGPS and fuzzy control [J]. Korean Soc Agric Mach, 1998, 23 (1): 75-82.
- [27] 王万章, 洪添胜, 陆永超, 等. 基于超声波传感器和 DGPS 的果树冠径检测 [J]. 农业工程学报, 2006, 22 (8): 158-161.
- Wang W Z, Hong T S, Lu Y C, et al. Performance of tree canopy diameter measurement based on ultrasonic sensor and DGPS [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 (8): 158-161. (in Chinese)
- [28] 李云翀, 何克忠. 基于激光雷达的室外移动机器人避障与导航新方法 [J]. 机器人, 2006, 28 (3): 275-278.
- Li Y C, He K Z. A novel obstacle avoidance and navigation method for outdoor mobile robot based on laser radar [J]. Robot, 2006, 28 (3): 275-278. (in Chinese)
- [29] Ryo T, Noboru N, Akira M. Automatic guidance with a laser scanner for a robot tractor in an orchard [C]//Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 7-8 October 2004 Conference. Kyoto, Japan: ASABE, 2004: 369-373.
- [30] Oscar C B J, Akira M, Kazunobu I, 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.
- [31] Oscar C B J, Kazunobu I, Noboru N. Calibration method for 2-Dimensional laser scanner attached on a robot vehicle [C]//The International Federation of Automatic Control, Proceedings of the 17th World Congress, Seoul, Korea: IFAC, 2008: 1596-1601.
- [32] Lee K H, Ehsani R, Schueller J K. Forward movement synchronization of two vehicles in parallel using a laser scanner [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23 (6): 827-

- 834.
- [33] Hamner B, Singh S, Bergerman M. Improving orchard efficiency with autonomous utility vehicles [EB/OL]. (2010-04-20). <http://www.slideshare.net/CASCrop/improving-orchard-efficiency-with-autonomous-utility-vehicles>.
- [34] 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 P, Chen J, Zhang M Y. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 27(3): 196-199. (in Chinese)
- [35] 于金霞,蔡自兴,邹小兵. 基于激光雷达的移动机器人障碍测距研究 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25(5): 31-33, 36.  
Yu J X, Cai Z X, Zou X B. Study on obstacles detection of mobile robot based on laser scanner [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(5): 31-33, 36. (in Chinese)
- [36] 袁 夏,赵春霞,陈得宝,等. 一种基于激光雷达的路面提取算法 [J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(10): 2035-2041.  
Yuan X, Zhao C X, Chen D B, et al. Road-surface detection based on radar sensing [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(10): 2035-2041. (in Chinese)
- [37] Tillett N D, Hague T. Computer-vision-based hoe guidance for cereals: An initial trial [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74: 225-236.
- [38] Pinto F A C, Reid J F, Zhang Q. Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75: 257-264.
- [39] 丁幼春,王书茂. 联合收获机视觉导航控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 138-142.  
Ding Y C, Wang S M. Vision navigation control system for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 138-142. (in Chinese)
- [40] 王福娟,张 宾. 农业车辆视觉导航技术研究进展 [J]. 农机化研究, 2008(11): 223-226.  
Wang F J, Zhang B. Development in vision navigation technology of agricultural vehicle [J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2008(11): 223-226. (in Chinese)
- [41] Han S, Dickson M A, Ni B, et al. A robust procedure to obtain a guidance directrix for vision-based vehicle guidance systems [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 179-195.
- [42] 杨庆华,吴佳艺,鲍官军,等. 农林环境机器视觉导航路径生成算法及应用 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 147-151.  
Yang Q H, Wu J Y, Bao G J, et al. Algorithms of path guidance line based on computer vision and their applications in agriculture and forestry environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 147-151. (in Chinese)
- [43] Chen J, Yuan C, Zhang W H. Algorithms of machine vision-based guidance path recognition in orchard environment [R]. Kyoto, Japan: Kyoto University, 2010.
- [44] Takahashi T, Zhang S H, Fukuchi H. Acquisition of 3-D information by binocular stereo vision for vehicle navigation through an orchard [C]//Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July, 2002 Conference, Chicago, Illinois, USA: ASABE, 2002: 337-346.
- [45] Rovira-Más F, Wang Q, Zhang Q. Noise reduction in stereo disparity images based on spectral analysis [R]. Reno, Nevada: Grand Sierra Resort and Casino, 2009.
- [46] Rovira-Más F, Reid J F, Zhang Q. Stereovision data processing with 3D density wasp for agricultural vehicle [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(4): 1213-1222.
- [47] 郭彤颖,蔡安勇,郑春晖. 移动机器人导航与定位技术研究进展 [J]. 科技广场, 2008(7): 229-231.  
Guo T Y, Cai A Y, Zheng C H. Mobile robot navigation and locate on technology and its research progress [J]. Science and Technology Square, 2008(7): 229-231. (in Chinese)
- [48] 周 俊,姬长英. 自主车辆导航系统中的多传感器融合技术 [J]. 农业机械学报, 2002, 33(5): 113-116, 133.  
Zhou J, Ji C Y. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 113-116, 133. (in Chinese)
- [49] Khot L R, Tang L, Blackmore S B. Navigational context recognition for an autonomous robot in a simulated tree plantation [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(5): 1579-1588.
- [50] Libby J, Kantor G. Accurate GPS-free positioning of utility vehicles for specialty agriculture [EB/OL]. (2010-04-20). [http://www.cascrop.com/publication/2010\\_libby\\_AccurateGPS-free-PositioningofUVs\\_ASABE.pdf](http://www.cascrop.com/publication/2010_libby_AccurateGPS-free-PositioningofUVs_ASABE.pdf).
- [51] Chen J, Zheng T P, Lian S J. On-tracking control of agricultural mobile robot based on inner information [R]. Changsha, Hunan: Hunan University of Agriculture, 2010.
- [52] 张智刚,罗清文,赵祚喜,等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 6-12.  
Zhang Z G, Luo X W, Zhao Z X, et al. Trajectory Tracking Control Method Based on Kalman Filter and Pure Pursuit Model for Agricultural Vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(S1): 6-12. (in Chinese)
- [53] Cho S I, Ki N H. Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic [EB/OL]. (2010-04-20). <http://asae.frymulti.com/azdev.asp?JID=3&AID=20130&v=42&i=4&CID=t1999&T=2>.
- [54] Cho S I, Lee J H. Autonomous speed-sprayer using differential GPS system, genetic algorithm and fuzzy control [J]. Argic Engng Res, 2000(76): 111-119.
- [55] Subramanian V, Burks T F, Dixon W E. Sensor fusion using fuzzy-logic enhanced Kalman filter for autonomous vehicle guidance in citrus groves [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(5): 1411-1422.
- [56] Subramanian V, Burks T F. Autonomous path navigation in citrus groves using machine vision and laser radar [R]. Tampa, Florida: Tampa Convention Center, 2005.