

# 国内外农业四轮机器人的发展现状及展望

刘 铮, 杨 隆, 江昱晓, 吕小荣\*

四川农业大学机电学院, 四川 雅安

收稿日期: 2022年8月20日; 录用日期: 2022年9月20日; 发布日期: 2022年9月27日

## 摘 要

近年来机器人技术发展迅速, 逐渐在多领域崭露头角, 四轮移动机器人作为机器人领域的一个重要分支, 在通信、电子、传感器技术等推动下, 正从传统的工业领域向农业领域快速渗透, 为制造更高的经济效益和生态效益提供了可能。本文围绕国内外对农用四轮机器人的研究, 就其结构及控制策略的发展现状、研究中存在的不足进行了概述, 最后针对农业四轮机器人的可发展空间, 在技术和应用层面上提出了展望。

## 关键词

机器人技术, 农业四轮机器人, 结构设计与控制策略

## Development Status and Prospect of Agricultural Four Wheeled Robot at Home and Abroad

Zheng Liu, Long Yang, Yuxiao Jiang, Xiaorong Lv\*

College of Machinery & Electronics, Sichuan Agricultural University, Ya'an Sichuan

Received: Aug. 20<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In recent years, robot technology has developed rapidly and gradually emerged in many fields. Four-wheel mobile robots, a significant subfield of the robot industry, are rapidly permeating from the traditional industrial field to the agricultural field under the promotion of communication, elec-

\*通讯作者。

tronics, and sensor technology, allowing for the generation of greater economic and ecological benefits. Focusing on the research of agricultural four-wheel robots at home and abroad, this paper summarizes the development status of its structure and control strategy, and the shortcomings in the research. The prospect of the technology and application level is presented, with an eye toward the agricultural four-wheel robots' potential for development.

## Keywords

Robot Technology, Agricultural Four-Wheeled Robot, Structural Design and Control Strategy

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着科技的飞速发展,我国制造业等行业发展水平也明显得到了提升,强大的新兴技术和制造水平有力地推动了经济发展。人口的不断增长和老龄化作为不可改变的趋势,不断刺激着人力成本的增加,中国“人口红利”优势将一去不复返。与此同时,世界各国也纷纷开始了工业化战略布局,像“德国工业 4.0”,以及我国的“中国制造 2025 战略”[1],都以减轻人类劳动强度甚至解放人类双手为奋斗目标,在农业领域,农业机械的发展趋势也是让机器代替人工,从而极大地提高农业生产力和生产水平。随着机器人技术的发展,机器人广泛应用于大众人民的生活当中,移动机器人作为机器人领域的一个重要分支,在其下不同领域中所发挥出的作用也越来越大[2]。在通信、电子、传感器技术等的推动下,人们对移动机器人的多元化和智能化等方面也有更高的要求,机器人技术正从传统的工业领域向创新农业领域快速渗透,从而为获取更高的经济效益和生态效益提供了空间。在过去几年中,移动机器人技术总体上已成为一个主要的研究方向,预计未来在农业和林业等重要领域都将拥有广阔的市场[3]。

## 2. 国内外农业四轮机器人的研究现状

目前常见的移动机器人可以分为轮式、履带式、足式和混合式移动机器人。其中轮式机器人最为常见,这种机器人具有高速、驱动和控制相对方便、机动性能好、工作效率高等特点[4];履带式移动机器人的越障性能良好,但速度较慢且结构普遍较为笨重[5];足式移动机器人灵感来源于生物的跨步移动,越障性能十分优越,适应能力强,但机械结构十分复杂,移动速度普遍较低且不易控制[6];混合式移动属于前述移动类型中两种及其以上移动方式的组合,可根据不同运行环境采用不同的驱动形式,具有较高的环境适应能力,但控制难度大大增加,应用领域有限[7]。中国农用机器人的发展十分迅速,其中轮式移动机器人由于其易控制、效率高、重量轻等优点成为典型且种类数量最多的一种农业机器人[8],目前,农用轮式机器人主要应用于果园采摘、农田植保以及除草、播种机具搭载等方面,为减少劳动力、提高农业生产效率提供了有效的解决办法。

### 2.1. 国外农业四轮机器人的研究现状

#### 2.1.1. 关于机器人结构

美国 Mobile Robots 公司研发的全方位、全天候室外机器人工作平台 SEEKUR [9],如下图 1 所示,该移动机器人工作平台采用了四轮全方位转向与驱动机构,采用 8 个电机分别控制四个轮毂的转向和移

动。这种多电机控制的底盘具有转向半径小, 转向稳定容易的特点, 缺点是底盘最小离地间隙仅有 15 cm, 在起伏较大的工况下行走会受阻。



Figure 1. SEEKUR mobile robot platform  
图 1. SEEKUR 移动机器人平台

丹麦科技大学研制出了一台四轮独立驱动且全方位独立转向的智能除草机器人[10], 该机器人集视觉、定位、驱动控制等于一体, 可自主实现除草功能。在直线行驶的测试中, 该底盘表现良好, 直线偏差非常小, 且由一个输入信号就可以控制转向, 通过闭环计算机控制使得转向策略与阿克曼转向有良好依从性。该机器人设计紧凑, 如下图 2 所示。

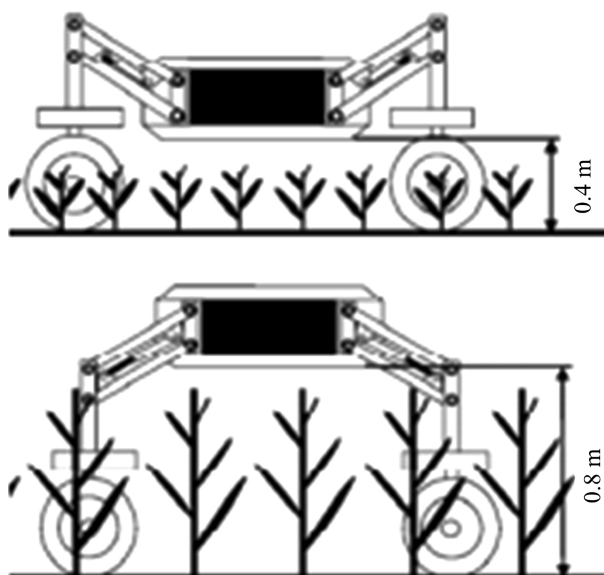


Figure 2. Denmark Technology University's seeding robot  
图 2. 丹麦科技大学的播种机器人

2014 年, 德国的 Amazonen-Werke 公司推出了四轮独立驱动、独立转向的智能农用机器人 BoniRob [11], 如下图 3 所示。该机器人的作业速度可达 15 Km/h, 每个车轮都由轮毂电机驱动并配有制动器。车轮固定在悬臂上, 悬臂可以改变高度, 从而调节底盘间隙由 0.4 m 到 0.8 m, 如下图 4 所示。因此, 底盘上的传感器可以根据作物的高度进行调整, 而无需更改传感器设置。此外, 每个车轮都可以 $\pm 90^\circ$ 的角度单独转向。在阿克曼转向条件下, 可以进行各种不同的轨迹转弯, 如简单转弯、定点转弯或蟹行转向。



**Figure 3.** BoniRob intelligent agricultural robot  
**图 3.** BoniRob 智能农业机器人



**Figure 4.** Gesture adjustment in different working process  
**图 4.** 不同工况下的位姿调整

### 2.1.2. 关于机器人控制策略

Khan [12]等人研究了用于独立四轮驱动电动底盘的鲁棒差速转向控制系统(DSCS)。DSCS 无需借助任何传统的转向机构(CSM)即可通过四个车轮的输入扭矩来操纵独立驱动的四轮驱动底盘。DSCS 使用具有线性轮胎动力学的车辆线性模型进行设计, 并使用具有非线性轮胎动力学的非线性车辆模型在仿真中进行了测试。通过比较仿真过程中全轮驱动(AWD), 后轮驱动(RWD)和前轮驱动(FWD)车辆的性能, 分析了所提出的鲁棒控制器的有效性。仿真结果表明, 所提出的控制系统可以在不使用任何 CSM 的情况下, 通过跟踪所需参数, 在不同的条件下成功地操纵电动底盘。

Song 等人[13]提出了一种具有可控全向轮的新型移动机器人设计。该机器人可根据驱动条件在全向或差分驱动模式下运行。同时提出了一种简单有效的无级变速器控制算法。各种测试表明, 所提出的机器人的运动控制能够令人满意地工作, 并且所提出的用于 CVT 的转向控制算法比使用固定转向角的算法可以提供更高的效率。



Jawad Aslam 等人[14]研究设计并实现了在高速转弯运动下的四轮防滑转向车辆(SSV)的鲁棒动态反馈控制器。对 SSV 动力学进行建模和分析,以构建仿真环境并验证所提出算法的性能,并设计了鲁棒的模糊滑模控制器,以抵消打滑和地面波动期间车轮与土壤相互作用引起的力的影响。它还消除了传统滑模控制遇到的颤振现象。大量的仿真结果证明了所提出控制器的有效性。

## 2.2. 国内农业四轮机器人的研究现状

### 2.2.1. 关于机器人结构

西北农林科技大学的路敌[15]等人设计了一种基于偏置轴的四轮独立驱动和线控转向技术的移动底盘,如下图 5 所示。该底盘将传统汽车驱动底盘的驱动系统及转向系统融为一体,通过各轮的转速和电磁锁盘的相互协调来实现驱动和转向功能,消除了传统汽车的机械转向系统及其各种传动机构的限制,不仅简化了底盘的结构,而其能够使其灵活度大大提升。



Figure 5. NWAUFU's Flexible robot chassis  
图 5. 西北农林科技大学的柔性机器人底盘

南京农业大学的王友权[16]等人对传感器技术、信息技术、自动导航技术等进行研究的基础上,设计了一种自动导航农用轮式移动机器人。针对目前农业机器人存在的操纵、路径跟踪等技术问题,机器人采用四轮全方位转向,操纵灵活,利用 CAN 总线使导航、控制等模块的通讯效率得以改善,选用模糊控制模仿人在路径跟踪控制时的控制策略,提高了移动机器人的智能化程度。仿真和试验表明机器人有较好的转向性能且在速度为 1 m/s 时跟踪路径的偏差为 0.1 m 左右。

中国农业大学的张京等人[17]根据农用轮式移动机器人平台通用性、环境适应性以及驱动控制系统模块化等要求,采用模块化设计方法结合 CAN 总线、串口通讯和传感器技术设计了一种基于模块轮的四轮独立转向驱动机器人。试验证明该设计的模块轮机器人控制效果鲁棒性强、响应快。

### 2.2.2. 关于机器人控制策略

重庆大学的孙棣华[18]针对参数摄动和存在外部扰动的轮式移动机器人的运动控制问题设计了一种多模态控制和模糊 PID 控制可相互切换的智能变结构控制器。仿真结果表明,与传统的 PID 和模糊 PID 控制方法相比,能较好地弥补了系统参数摄动的影响,提高了机器人运动控制品质。

王龙[19]针对提高四轮驱动转向机器人在高速运行下转向的稳定性以及低速运行下转向的灵活性的问题,设计了模糊 PID 控制系统用于控制四轮转速和横摆力矩。试验结果表明:所设计的系统可有效改

善四轮独立驱动转向机器人高速运行下转向的稳定性以及低速运行下转向的灵活性系统具有较强的鲁棒性。

蔡韶峰[20]基于四轮移动机器人,通过偏差耦合控制方式来控制轮毂电机的同步性,采用自适应萤火虫算法对轮毂电机的PID控制器参数进行了整定,得出三个最优解,并通过Simulink仿真结果说明了这种方法相比于传统手动经验整定法和智能算法整定法的优点。

卢山峰等[21]将电子差速与差动助力转向技术进行有机的结合,通过在转向过程中对左右轮毂电机的转矩进行实时地分配,并设计以车速为主的自适应权重系数,实现了对底盘转向稳定性和转向助力的协同优化控制。

程璐璐[22]采用了模糊神经网络算法优化传统PID参数,从而提高轮式机器人转向控制精度,使其灵活性更高,同时也摆脱实际应用中PID算法整定不良的问题。

王杰等[23]通过对速差转向车辆底盘进行运动学和动力学分析,设计了基于不同转向半径下对车轮转矩进行分配的速差转向控制策略,通过仿真表明四个电机输出的转矩决定了车辆的转向半径和转向速度,直接影响车辆转向动力学和稳定性。

### 2.3. 国内外农业四轮机器人的研究对比

目前国内外的农业四轮移动机器人在结构以及控制策略上都有各自的特点,如下表1所示。

Table 1. Comparison between four-wheeled agricultural robot at home and abroad

表 1. 国内外农业四轮机器人对比

国内外农业四轮机器人	相同点	不同点
结构	多采用四轮毂电机驱动;多为独立4WD和4WS系统	国外的农用四轮机器人拥有更多的拓展功能,如底盘高度调节等
控制策略	国内外都对机器人的控制稳定性做了大量研究,如采用模糊控制等	国内研究多偏向于优化PID参数的算法,而国外研究更多采用鲁棒滑模控制算法

## 3. 现有农用四轮机器人研究中存在的不足

目前的农业轮式机器人的结构大多还依赖于机械式转向结构和集中式驱动系统,制动、转向、驱动功能的集成度较低且机构相对复杂,在转向能力、瞬时驱动能力、路面环境适应能力、可维护性以及研发设计周期等方面存在着一些不足,无法适应未来的应用需求。目前面向农用机器人移动方式的研究还主要侧重于两轮驱动控制方法[24],从移动性能的角度使农用机器人自身对于工况的适应能力受到了一定限制,另一方面,部分四轮独立驱动农用机器人研究则是主要基于微小型或室内应用等方面,面临功率过小、续航能力不足等问题,不能满足农用机器人田间作业的实际载荷需求且缺乏合理的生产制造模式,导致农用机器人的应用推广难度较大。

## 4. 农业四轮机器人的发展趋势

### 4.1. 技术层面

从国内外对于农用四轮式机器人研究现状分析来看,将机器人轮式底盘进行高度集成模块化结构处理已成为电控底盘设计的主流方向,更深入的,有对于集成后的模块轮的转向、驱动控制策略研究,不同工况下的转速调整、转矩分配等控制策略以及各种模糊控制、鲁棒控制等算法研究。伴随着近年来GPS

差分技术的发展, 远程定位控制农业机器人无人自主作业成为可能。同时, 物联网行业的兴起、云数据平台的出现, 一方面使人和机器的交互更加紧密, 另一方面也使机器人可以共享资源、共享信息, 大幅度提升了机器人作业的可控性和定向性。

## 4.2. 应用层面

国内外研发的中、大型农业机器人主要针对大地块、起伏小的平原地势, 并不适用于地形复杂、起伏频繁的丘陵地区, 而底盘较低的小型农业机器人由于结构和续航动力等因素, 基本无法在丘陵地区的田块进行作业, 这间接性地导致了丘陵地区智能机械化水平较平原地区低下的现状。针对传统农业机械智能化程度低、耗能高、适应性差等短板, 研究适用于丘陵山区等环境的智能移动机器人是解决该地区机械化作业难题和提高智能机械化水平的有效措施。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 结论

1) 针对目前我国的农业四轮机器人研究可以发现, 国内研究也是基于四轮独立驱动和转向系统, 在机器结构方面与国际研究接轨, 在控制策略上则针对农用四轮机器人的稳定性做了大量研究, 提出了基于 PID 控制的多种优化控制算法。

2) 在实际应用中, 我国的农用四轮机器人一定程度上受到适应性不足等问题的阻碍, 在转向能力、瞬时驱动能力、路面环境适应能力、可维护性以及研发设计周期等方面存在着一些不足。为改变现状, 亟待研发适用性更强的机器人。

3) 长远上来看, 我国的农用四轮机器人应该以集中化的模块轮思想作为结构设计理念, 深入模块轮的转向、驱动控制策略研究, 不同工况下的转速调整、转矩分配等控制策略以及各种模糊控制算法研究, 提高人机交互性和机器可控性。

### 5.2. 展望

智能控制技术的发展使农用轮式机器人的运动机动性、灵活性及环境适应性等都得到了很大的提升。机器人移动底盘作为农用四轮机器人的核心部件, 其结构形态与行走功能决定了机器人的可靠性、稳定性以及作业效果。深入研究机器人移动底盘的结构, 是研发适用于不同工作条件的农业四轮机器人的关键, 同时在机器人底盘上可搭载其他机电设备, 如播种设备、除草设备等, 以适应多种作业的要求。对机器人行走控制策略进行开发优化, 可以实现精准作业、远程作业等指令, 对农用机器人的实际应用和推动农业智能化有积极推动作用。

## 基金项目

1) 成都市科技重点研发支撑计划项目(200-YF05-01084-SN)。2) 国家现代农业产业技术体系四川豆类杂粮创新团队专项(SCCXTD-2022-20)。

## 参考文献

- [1] 黄群慧, 贺俊. 中国制造业的核心能力、功能定位与发展战略——兼评《中国制造 2025》[J]. 中国工业经济, 2015(6): 5-17.
- [2] 付宜利, 李寒, 徐贺, 马玉林. 轮式全方位移动机器人几种转向方式的研究[J]. 制造业自动化, 2005, 27(10): 36-40.
- [3] Siciliano, B. and Khatib, O. (2008) Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag, Berlin, 1611 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5>

- [4] 李雪原, 张宇, 胡纪滨, 苑士华. 轮式车辆速差转向过程的转向阻力特性[J]. 兵工学报, 2011, 32(12): 1433-1438.
- [5] 张豫南, 杨怀彬, 黄涛, 张舒阳, 房远. 向心型履带式全方位移动平台运动分析[J]. 兵工学报, 2017, 38(12): 2309-2320.
- [6] 张千伟, 张龙. 仿生四足机器人结构设计与运动学分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 73-76.
- [7] 曲梦可, 王洪波, 荣誉. 轮腿混合机器人机械腿动力学建模与驱动预估[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1619-1629.
- [8] 陈威, 郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 196-205.
- [9] Mobile Robots Inc. (2007).
- [10] Madsen, T.E. and Jacobsen, H.L. (2001) Mobile Robot for Weeding. Danish Technical University, Denmark.
- [11] Ruckelshausen, A., Biber, P., Doma, M., *et al.* (2014) BoniRob: An Autonomous Field Robot Platform for Individual Plant Phenotyping. *Precision Agriculture*, **9**, 841-847.
- [12] Khan, M.A., Aftab, M.F., Ahmed, E., *et al.* (2019) Robust Differential Steering Control System for an Independent Four-Wheel Drive Electric Vehicle. *Automotive Technology*, **20**, 87-97. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0008-9>
- [13] Song, J.B. and Byun, K.S. (2009) Steering Control Algorithm for Efficient Drive of a Mobile Robot with Steerable Omni-Directional Wheels. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**, 2747-2756. <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0810-9>
- [14] Aslam, J., Qin, S.Y. and Alvi, M.A. (2014) Fuzzy Sliding Mode Control Algorithm for a Four-Wheel Skid Steer Vehicle. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **28**, 3301-3310. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0741-y>
- [15] 路敌. 温室作业机的柔性底盘及其控制系统的研究与开发[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [16] 王友权, 周俊, 姬长英, 等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 110-113.
- [17] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015(18): 63-70.
- [18] 孙隼华, 李硕, 崔明月, 廖孝勇, 何伟. 轮式移动机器人智能变结构控制算法研究[J]. 控制工程, 2013, 20(3): 553-557+561.
- [19] 王龙, 章政. 四轮独立驱动移动机器人的转向控制研究与设计[J]. 控制工程, 2017, 24(11): 2387-2393.
- [20] 蔡韶峰. 四轮移动小车设计及研究[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 安徽工程大学, 2018.
- [21] 卢山峰, 徐兴, 陈龙, 等. 轮毂电机驱动汽车电子差速与差动助力转向的协调控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 78-85.
- [22] 程璐璐. 四轮独立驱动和转向机器人平台控制系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [23] Zhai, L., Wang, J. and Feng, H. (2014) Research on Skid Steering Control Strategy for Four-in-Wheel-Motor Drive Electrical Vehicle. 2014 *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, 31 August-3 September 2014, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6940896>
- [24] Shuai, Z.B., Zhang, H., Wang, J.M., *et al.* (2014) Lateral Motion Control for Four-Wheel-Independent-Drive Electric Vehicles Using Optimal Torque Allocation and Dynamic Message Priority Scheduling. *Control Engineering Practice*, **3**, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.11.012>