

Mecanum 轮

全方位移动机器人 原理与应用

| © 王兴松 著

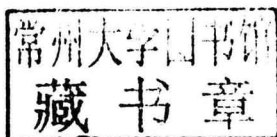
Theory and Application of
Mecanum Wheel Based
Omni-directional Mobile



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

Mecanum 轮全方位移动 机器人原理与应用

王兴松 著



 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内容简介

本书结合作者多年来的 Mecanum 轮全方位移动机器人理论研究及工程应用实践,详细介绍了 Mecanum 轮全方位移动机器人的机构学及其优化设计、全方位移动运动学与动力学分析等内容,在此基础上进一步阐述该类型机器人的运动控制算法及其在智能物流搬运中的路径规划与轨迹跟踪等理论与技术问题。

本书可作为高校高年级本科生、研究生的机器人理论与技术应用课程的教学用书,也可作为从事机器人开发、应用、维护的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

Mecanum 轮全方位移动机器人原理与应用 / 王兴松著.
—南京:东南大学出版社,2018.6
ISBN 978-7-5641-7597-9

I. ①M… II. ①王… III. ①机器人 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 330722 号

Mecanum 轮全方位移动机器人原理与应用

出版发行 东南大学出版社
出版人 江建中
责任编辑 夏莉莉
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
网 址 <http://www.seupress.com>
经 销 各地新华书店
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 12
字 数 270 千字
版 次 2018 年 6 月第 1 版
印 次 2018 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-7597-9
定 价 48.00 元

* 本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830

序

移动机器人或自动导航车,可用于自动化生产线、仓库、医院等场合,进行无人自主的物料传送或服务导航,是智能制造、智能物流和智能社会服务的一种必不可少的关键设备。与其他操作型机器人、助力助残可穿戴机器人以及步行机器人相比,移动机器人的运动范围大多与环境互动,需具有自主辨识场景、规划、决策和运动执行的能力。其基础核心技术之一是全向、灵活、精致的运动机构平台。

移动机器人是机器人的重要分支,而轮式移动是机器人移动的最常用方式。全方位移动机器人是在平面内具有前后移动、左右移动和原地回转三个独立运动自由度的移动机器人。由于其具有原地零半径回转和横移的特点,非常适合用在狭小空间或对机器人的机动性要求高的场合。另外,在需要精确定位或跟踪复杂路径时,利用其可以原地回转的特点,全方位移动机器人能适合更为复杂、紧凑的工作环境。由于麦克纳姆(Mecanum)轮的全方位移动机器人具有整车机械结构简洁、运动控制灵活、通过性好等优点,近年来得到比其他类型全方位移动机器人技术更为广泛的应用。

本书作者东南大学机械工程学院王兴松教授,我与他认识于20世纪90年代初,是他博士论文研究的后继导师。90年代中后期,在东南大学,我们是同事也是科学研究的合作伙伴。共同完成了多个国家自然科学基金和国家高科技攻关项目,一起发表了很多高质量的学术论文。随后的20多年,尽管我在香港和新西兰的数间大学任教,但与王兴松教授的学术交流和科研合作从没中断过,其中就包括Mecanum轮移动机器人的理论和技术研究。特别欣慰的是,王兴松教授不仅在此移动机器人的理论和技术方面取得了很多原创性的学术成果,还将它应用于多个国家重要工程领域,解决了一系列的技术难题和挑战。

这本专著凝集了王兴松教授十多年的研究成果与心得。其中,将 Mecanum 轮移动机器人在不同工程应用中的具体需求与解决方法系统地陈述和展示给读者,以提供直接的借鉴。这是本书的特色之一。

当前,全球都在推进智能制造技术的应用,机器人是智能制造系统的重要组成部分,也是智能制造系统区别于传统制造系统最典型的特征。相信本书可以为从事机器人与智能制造系统研究与应用开发的科研人员和工程师提供直接有效的参考,并促进移动机器人理论发展和推广应用。



新西兰奥克兰大学
机电工程学讲座教授
徐卫良博士

前 言

机器人作为智能制造系统的重要组成部分、人工智能技术重要载体、最典型的高新技术产品,集力学、机械学、材料学、电子学、控制学、计算机科学等众多学科成果于一身,正不断快速地接近人们对它的期望。移动机器人作为机器人的重要分支,也随着新的移动技术和原理的突破而快速发展。随着全球智能制造时代的来临,先进移动机器人技术也迎来了新的发展机遇。

全方位移动机器人是在平面内具有前后移动、左右移动和原地回转三个独立运动自由度的移动机器人。由于其具有原地零半径回转和横移的特点,非常适合狭小空间或对机器人的机动性要求高的复杂、紧凑的工作环境。麦克纳姆轮(Mecanum Wheel)是一种具有全方位移动能力的车轮,于1973年由瑞士人发明,其特点是在轮毂外沿上与其轴线成一定角度方向安装若干可以自由旋转的小辊子,在车轮滚动时,小辊子产生侧向滚动。通过Mecanum轮在车身上的组合安装以及各轮转动方向与速度的协调控制,可实现车体在运动平面内的任意方向移动或转动。

基于Mecanum轮的全方位移动机器人随着相关领域的技术发展,从车体与轮体材料、车轮布置与悬挂结构到控制部件与控制算法,以及运行调度等各方面得以快速发展。本书是对作者所领导的课题组十多年来在Mecanum轮移动机器人理论与应用研究工作的总结和系统化,以期为感兴趣的工程技术人员开展相关研究工作提供系统的应用借鉴。本书除了介绍Mecanum轮全方位移动机器人的机构设计、控制设计、路径规划与调度等经典移动机器人研究内容外,还就其工程应用中的具体实践问题进行了介绍,如悬挂与稳定性问题、轮体包胶设计与减震设计、不同操作系统下控制器设计与实现等,部分内容是尚未公开发表的,如机器人的Mecanum轮不对称任意布置问题、不同直径Mecanum轮同车应用问题、多Mecanum轮移动机器人编队协同工作的控制方法、Mecanum轮车的可通过性问题等。

本书的主要内容是作者与相关研究生共同努力的结果,尤其是十几年来以Mecanum轮全方位机器人为题开展学位论文研究工作的优秀的博士、硕士研究生们,在大家的共同努力下,我们不仅完成了具有挑战性的Mecanum轮机器人在多个国家重大工程项目中的应用,还使整个团队科研积累了丰富的工程实践经验,给团队带来了青年人的朝气和活力,增添了本人不断创新的勇气和信心,实现了作者教学相长的梦想。这些同学和其论文顺列如下:

- 石维亮:《全向移动机器人的运动控制系统设计》, 硕士论文, 2008
- 夏国庆:《Mecanum 轮全向移动机器人研制》, 硕士论文, 2010
- 贾 茜:《全方位移动机器人路径规划与跟踪控制研究》, 博士论文, 2011
- 薛佩佩:《Mecanum 轮式全向移动机器人轮体结构优化与可靠性分析》, 硕士论文, 2011
- 牛建钦:《Mecanum 轮式全向移动机器人控制系统与自主导航研究》, 硕士论文, 2011
- 曹培培:《Mecanum 轮式全向移动机器人多模式运动控制系统研究》, 硕士论文, 2011
- 吴继平:《轮式全方位移动机器人的动力学分析及其控制研究》, 硕士论文, 2012
- 钮伟强:《全向移动机器人力觉操控技术》, 硕士论文, 2012
- 周 婧:《面向移动机器人循迹的智能图像处理技术研究》, 硕士论文, 2012
- 张 浩:《Mecanum 轮式全方位移动机器人双车联动控制及动力学研究》, 硕士论文, 2013
- 梁嘉震:《Mecanum 轮式全向移动机器人的运动精度分析与控制》, 硕士论文, 2013
- 陆 靖:《Mecanum 轮式全向移动机器人轨迹跟踪与规划研究》, 硕士论文, 2013
- 王春华:《Mecanum 轮式全向移动机器人的轮体振动分析与检测》, 硕士论文, 2013
- 杨文军:《Mecanum 移动机器人寻迹控制及其调度》, 硕士论文, 2014
- 尹 丹:《移动机器人非线性支撑设计及稳定性研究》, 硕士论文, 2015
- 田 青:《Mecanum 轮式全向机器人位置精确控制的研究》, 硕士论文, 2015
- 刘景笑:《焊缝射线检测用智能机器人的研究》, 硕士论文, 2016
- 李 杰:《探伤机器人结构设计及双侧同步控制研究》, 硕士论文, 2017
- 任晨曦:《基于六维力传感器的打磨机器人的设计与实现》, 硕士论文, 2017
- 在本书出版之际, 衷心感谢历届博士、硕士学生的努力工作和辛勤付出!
- 本书的出版得益于众多研究所和企业的支持, 是他们提出的不同工程应用需求和环境条件, 促成了课题组在 Mecanum 轮机器人工程化设计和控制方面做出了许多创新的成果。尤其应该感谢中航工业西安飞机制造有限公司、航天科技集团 518 研究所、航天科工集团 8359 所、南京埃斯顿自动化股份公司等。
- 感谢东南大学出版社对本书出版的支持, 尤其是夏莉莉编辑, 虽然不是机器人专业出身, 但她认真负责, 发现了书稿中多处文字甚至公式中的错误和不妥, 使作者敬佩! 在此对她的辛勤劳动致以衷心感谢!
- 由于机器人技术的发展日新月异, 而本书内容的研究时间跨度较大, 加之作者学识所限, 书中错误和不妥之处难免, 敬请广大读者原谅!

目 录

第一章 Mecanum 轮全方位移动机器人概述	1
1.1 移动机器人技术	1
1.2 全方位移动机器人技术	2
1.2.1 Mecanum 轮式移动机构	3
1.2.2 其他的全方位移动机构	4
1.3 Mecanum 轮全方位移动机器人的应用	6
第二章 Mecanum 轮全方位移动机器人的机构学	9
2.1 Mecanum 轮机器人的运动原理	9
2.1.1 典型的 Mecanum 轮四轮移动原理	9
2.1.2 四主动和四被动的 Mecanum 轮移动车	11
2.2 Mecanum 轮辍子的轮廓设计与支撑结构设计	11
2.2.1 辍子和轮辍的参数设计	11
2.2.2 参数化软件设计	14
2.2.3 不同轮廓曲线的比较	17
2.3 Mecanum 轮辍子弹性体与抗震优化设计	20
2.3.1 不考虑变形的弹性体层厚度直接计算	20
2.3.2 抗震优化设计	21
2.4 Mecanum 轮机器人的悬架设计	28
2.4.1 四主动轮式全方位移动机器人	28
2.4.2 四主动四被动轮式全方位移动机器人	30
2.5 Mecanum 轮机器人的可靠性分析	31
2.5.1 悬架竖直放置的五自由度 AGV 智能运输车的垂向振动力学模型	31
2.5.2 悬架竖直放置的五自由度 AGV 智能运输车的垂向振动数学模型	33
第三章 Mecanum 轮全方位移动机器人的运动学与动力学	39
3.1 四轮 Mecanum 轮全方位移动机器人运动学分析	39
3.1.1 单个 Mecanum 轮运动学分析	40
3.1.2 四轮 Mecanum 轮全方位移动机器人运动学分析	40
3.2 Lagrange 动力学建模简介	42
3.3 四轮 Mecanum 轮全方位移动机器人动力学分析	43

3.4	任意布置四轮 Mecanum 轮全方位移动机器人分析	45
3.5	八轮 Mecanum 轮全方位移动机器人分析	48
3.5.1	四主动四被动 Mecanum 轮全方位移动机器人分析	49
3.5.2	八主动 Mecanum 轮全方位移动机器人分析	51
第四章	Mecanum 轮全方位移动机器人的控制	54
4.1	Mecanum 轮全方位移动机器人的精密运动控制	54
4.1.1	基于 PID 控制的机器人位置控制	55
4.1.2	基于模糊控制的电机速度控制	56
4.1.3	Mecanum 轮系统的运动控制精度分析与设计	56
4.2	基于 CAN 总线的全方位移动机器人控制系统	62
4.2.1	CAN 总线简介	62
4.2.2	基于 CAN 的多电机协调运动控制系统设计	63
4.2.3	Windows XP 下控制软件设计	64
4.2.4	DOS 下控制软件设计	72
4.3	基于 PMAC 的运动控制系统	74
4.3.1	Windows XP 下的控制软件设计	75
4.3.2	DOS 下的控制软件设计	78
第五章	Mecanum 轮全方位移动机器人的路径跟踪	80
5.1	全方位移动机器人的路径跟踪问题	80
5.2	全方位移动机器人路径跟踪的运动模型	82
5.2.1	以跟踪曲线为基准的误差调整的运动学模型	82
5.2.2	以机器人为基准的误差调整的运动学模型	84
5.3	全方位移动机器人路径跟踪的通过性条件	85
5.3.1	全方位移动机器人循迹过程中转弯曲率半径的计算	85
5.3.2	最小转弯半径	87
5.3.3	机器人几何约束	88
5.3.4	机器人运动学约束	89
5.3.5	机器人动力学约束	89
5.3.6	速度与加速度的综合关系	92
5.3.7	循迹曲线的参数约束	92
5.4	全方位移动机器人路径跟踪的稳定性问题	94
5.4.1	稳定性判定条件	94
5.4.2	加入 PD 算法的稳定性条件	95
5.5	实际应用中的路径跟踪的问题	96
5.5.1	反向循迹	96
5.5.2	循迹过程中的自纠正	97

第六章 Mecanum 轮全方位移动机器人双传感器视觉循迹	99
6.1 移动机器人的视觉导引原理	99
6.2 全方位移动机器人双相机循迹的运动模型	103
6.2.1 以跟踪曲线为基准的误差调整的模型修改	103
6.2.2 以机器人为基准的误差调整的模型修改	103
6.3 全方位移动机器人双相机循迹系统的误差修正算法	104
6.3.1 通过偏距修正控制机器人运动的方法	104
6.3.2 利用偏距和偏角控制机器人运动的方法	105
6.4 全方位移动机器人循迹误差补偿的控制算法	107
6.4.1 PID 控制算法介绍	107
6.4.2 使用 PD 算法的机器人循迹控制算法	107
6.4.3 自适应 PID 算法	108
6.5 全方位移动机器人双传感器视觉循迹的应用	109
6.5.1 实验平台介绍	109
6.5.2 机器人循迹实验结果分析	110
第七章 Mecanum 轮全方位移动机器人的路径规划与定位	117
7.1 全方位移动机器人路径规划的算法设计	117
7.2 全方位移动机器人路径规划的曲线拟合	120
7.2.1 圆弧拟合	120
7.2.2 贝塞尔曲线拟合	122
7.2.3 Clothoid 曲线拟合	124
7.2.4 三种曲线的比较	126
7.3 路径规划中岔路转弯方法设计	127
7.4 路径规划中的标记识别	129
7.5 全方位移动机器人路径规划的应用	129
7.5.1 三种曲线拟合的仿真效果	129
7.5.2 路径规划仿真	130
第八章 Mecanum 轮全方位移动机器人的协同控制技术	133
8.1 多机器人编队协同控制	133
8.1.1 双车直线队形	133
8.1.2 三车正三角队形	135
8.1.3 N 车正 N 边形队形	137
8.1.4 任意队形	138
8.2 多车协调控制中运动协同传感器的设计	139
8.2.1 三维位移传感器结构设计	139
8.2.2 基于激光测距仪的偏差测量传感系统	141
8.3 双车联动控制的应用实验	144

8.3.1	基于三维位移传感器的双车联动实验	144
8.3.2	基于激光测距仪的双车联动控制实验	147
第九章 Mecanum 轮全方位移动技术的应用		150
9.1	全方位移动 AGV 搬运车技术	150
9.1.1	全方位移动搬运车技术的应用	150
9.1.2	全方位移动搬运车的机械与电气设计	151
9.1.3	全方位移动 AGV 系统	153
9.1.4	全方位移动物料搬运车系统的构造	155
9.2	全方位移动操作机械臂	160
9.2.1	移动操作机械臂的发展	160
9.2.2	全方位移动喷涂及打磨机器人	161
9.3	全方位移动探伤机器人系统	162
9.3.1	全方位移动探伤机器人结构设计	163
9.3.2	全方位移动探伤机器人双侧同步控制系统	167
9.3.3	探伤机器人双侧同步控制系统的软件设计	171
9.3.4	全方位移动探伤机器人运动实验	176
主要参考文献		180

第一章 Mecanum 轮全方位移动机器人概述

作为 20 世纪人类最伟大的发明之一,机器人集成了机械设计、传感测量、信息处理、电子设计、自动控制以及计算机与人工智能等多学科的研究成果,代表机电一体化的最高成就,是目前科学技术发展最活跃的领域之一。机器人自问世以来,经过几十年的发展,已在众多领域取代人类,占据着众多劳动岗位服务于人类。它在减轻人类劳动强度,提高生产效率,改变人类的生产和生活方式,把人类从繁琐、恶劣的环境中解放出来等方面发挥了巨大的作用,凡是枯燥的、危险的、有毒的、有害的工作,都是机器人应用的潜在领域。

目前,机器人行业正以惊人的速度在发展,机器人也正逐渐成为人类不可缺少的伙伴。截至 2016 年,全球仅制造业就共售出超过 250 万台机器人,其中有超过 110 万台机器人在服役;仅 2016 年一年,制造业新增了超过 16 万台机器人。机器人除了广泛应用于制造业领域,还应用于资源勘探开发、救灾排险、医疗服务、家庭娱乐、军事和航天等其他领域。在服务业,目前有超过 300 万台的个人和家庭服务的机器人,有近 2 万台特殊用途的机器人(安全等)在役。

传统的制造业领域应用的机器人多为代替人类上肢的关节式操作臂机器人,关节臂式机器人也是发展最多、最成熟的机器人。为了满足不同领域的应用需求,使机器人具有位置移动能力,人们发明了移动机器人。移动机器人是可在其工作环境中移动的机械本体上集成环境感知、行为控制与执行等功能的综合机电系统,是目前机器人领域研究最为活跃的重要前沿。

1.1 移动机器人技术

自 1969 年美国 Stanford Research Institute(斯坦福研究院)的 Nils Nilsson 和 Charles Rosen 等人研制出了能够自主移动的名为 Shakey 的轮式移动机器人以来,能够在一定工作空间中运动的移动机器人作为机器人研究领域的重要组成部分,发展很迅速。鉴于其广泛的用途,已经成为当前科技发展中异常重要的前沿课题,也是机器人学繁荣发展的一个重要分支。移动机器人技术涉及电子、机械、控制、计算机、仿生等众多学科领域,随着相关技术的发展,移动机器人系统已经在工业制造、军事、医疗和科学研究等许多方面得到了广泛的应用。

移动机器人按移动方式可分为轮式移动机器人、腿式移动机器人、蛇形机器人、跳跃式机器人、履带式移动机器人、爬行机器人、复合方式移动机器人等。其中的腿式移动机器人模仿人类腿部关节,能够满足复杂环境和地形移动的性能要求;但由于其关节自由

度多,结构复杂,所以其控制困难,并且还有移动速度慢、功耗大等缺点。蛇形机器人和跳跃式机器人在适应复杂而特殊的环境方面有很大优势,其具有良好的灵活性,但其在承载能力、运动平稳性等方面也存在着巨大的缺陷。履带式移动机器人由于其接地面积较大,运动时对地的平均压力较小,在松软地面具有良好的附着能力和通过能力,在爬楼梯、越障碍、自复位等方面具有明显优势;但是履带式移动机器人有运动速度慢、功耗大、转向时对地破坏大等缺点。复合方式移动机器人可以整合上述移动机器人的优点,能够适应比较复杂的环境,比如管道、山地等,但是一般情况下其结构和控制系统都比较复杂,功耗也比较大。轮式移动机器人通常结构比较简单,自重较轻,承载能力强,机动灵活,工作效率高,驱动控制都比较方便。虽然轮式移动机器人也有些缺点,比如运动稳定性与路面的情况有很大关系,在复杂地形不易实现精确的轨迹控制等,但是依赖上述的优越性,其依然被大量应用于工业、农业、反恐防暴、家庭、海底探测、空间探测等广泛领域。

轮式移动机器人一般采用圆盘式轮子驱动的移动方式,可以利用其传感器系统来感知周围环境,通过操纵手柄、自主移动或者其他方式的控制到达期望位置。它是集感知系统、控制系统、运动系统、作业系统等多个系统于一身的移动平台。通常,轮式移动机器人大部分都使用差分驱动轮系作为机器人的驱动系统。这样的机器人能够在移动空间里的不同曲率半径的圆弧或直线上运动,但它不能沿轮子平面的法线方向运动,也难以实现原地的零半径旋转。在比较狭窄、运动精度要求较高的场合,这类轮式移动机器人就无法满足应用要求了。

为解决上述问题,出现了一种被称为全方位移动机器人的新型移动机器人系统。全方位移动机器人系统可以在平面三个自由度上进行任意方向的运动,也可以在原地零半径旋转任意角度,运动灵活,控制方便,在要求高速、高机动性的狭窄区域具有无可比拟的优势,因此全方位移动机器人被应用在了各个领域。在工业生产领域,人们设计了全方位移动的叉车,应用于仓储搬运,集装箱运输装卸,生产线材料运送传递等。由于其可以实现零半径旋转和横向移动,减少了仓储空间,节约了成本,提高了效率。在生活医疗领域,全方位移动机器人可用于电动轮椅和医疗护理,电动轮椅可以使行动不便的人在狭小的居室空间里面移动自如;医疗护理机器人则可以协助护士灵活地搬运患者。由于全方位移动机器人优越的运动性能,广阔的应用前景,人们对其展开了越来越多的研究。

1.2 全方位移动机器人技术

传统的移动机器人由于自身车轮的结构特性,如双轮差动系统,使得其不能沿侧方位运动,而全方位移动机器人则由于其车轮在平面的三个自由度方向都有运动的分量,克服了不能侧方位运动的缺点,使得机器人具有了全方位移动能力。灵活的全方位移动机器人可以显著提高搬运效率,减少货物存储空间 20%~30%,尤其对于在狭小空间内移动物体,具有不可替代的作用。

移动机构是全方位移动机器人实现全方位运动的基础和关键,它直接影响整个机器人的运动精度、灵活性和系统的可靠性。全方位移动机构一般由几个全方位轮组成,三轮和四轮结构在实际应用中最为常见。四轮比三轮结构具有更好的稳定性和承载能力,应用更加广泛。

1.2.1 Mecanum 轮式移动机构

Mecanum 轮是目前应用最广泛,技术最成熟的一种全方位轮。它由轮毂和安装在轮毂外缘上的一组鼓形辊子组成,辊子绕车轮轴线旋转的同时也能绕自身轴线转动,辊子轴线与轮毂轴线通常呈 45° 角。为了保证运动的平滑性,辊子的形状要保证车轮的侧视图为圆形。Mecanum 轮结构紧凑、运动灵活,是很成功的一种全方位轮。Mecanum 轮式移动机构没有复杂的换向结构,通过车轮之间旋向与转速的配合实现全方位运动,运动控制相对简单。因此,本文针对四轮结构的 Mecanum 轮全方位移动机器人进行研究。

Mecanum 轮常见的两种结构为:两端支撑和中间支撑,如图 1-1 所示。两端支撑结构具有较好的承载能力,但在坡道或不平的地面上行驶时车轮外缘可能与地面产生摩擦,进而影响机器人的正常运动。中间支撑结构将辊子分成两部分并固定于轮毂中间的支撑上。这种设计降低了机械结构的强度,但辊子的安装和维护更加方便,而且可以保证辊子与地面的接触,适用于不太平整有微弱起伏的地面。

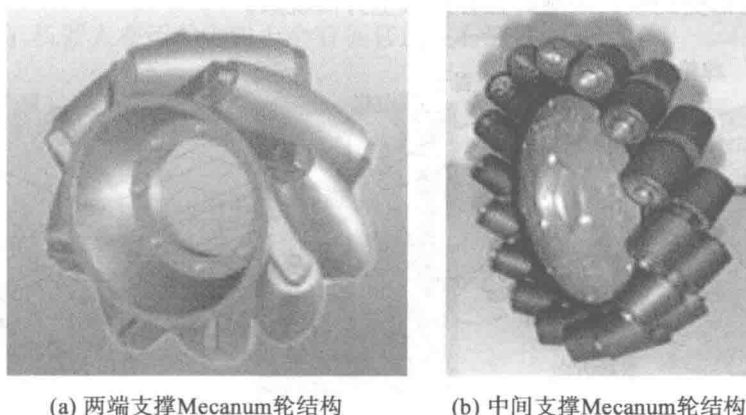


图 1-1 Mecanum 轮的结构

Mecanum 轮最早由瑞典 Mecanum 公司的工程师 Ilon 于 1973 年提出。1980 年美国海军购买了该专利并进行军事应用开发。1996 年专利失效后,美国及世界众多大学、研究机构和公司从车轮结构、车轮配置方案、运动学和动力学分析等方面进行了全方位、深层次的研究。Diegel 在中间支撑结构的基础上进行了改进,设计了一种辊子可以锁定的结构和一种可以改变辊子方向的结构,这两种结构都能达到降低能量损耗,提高运动效率的作用。此外,他还结合传统车轮和 Mecanum 轮设计了既能用于室外环境又能适应狭窄空间的多用途移动机器人。Gfrerrer 分析了 Mecanum 轮的几何学特性,给出辊子曲面参数的设计方法,该方法可以提高辊子的加工精度,保证机器人运行的平稳性。

运动学和动力学模型是实现机器人控制的必要条件,国内外学者为此进行了大量的理论分析和实验,也取得了相当丰富的研究成果。卡耐基-梅隆大学的 Muir 和 Neuman 用矩阵变换的方法推导出 Mecanum 轮的运动学方程,建立了基于运动学模型的机器人控制系统,并应用其进行了航位推算、车轮打滑检测和反馈控制算法的设计。Jorge 比较了传统车轮与 Mecanum 轮的区别,用旋量方法给出了四轮结构机器人的运动学方程和三轮结构的动力学方程。Viboonchaicheep 提出了一种新的 Mecanum 轮机器人的位置校正方法,该方法首次集合运动学方程、动力学方程、状态方程于一身,通过征兆性和预

测性的位置校正,能够解决由于车轮打滑造成的位置偏差问题。

国内关于 Mecanum 轮机器人的研究也较多。哈尔滨工业大学的赵言正分析了 Mecanum 轮机器人的运动学和静力学特性,设计了能够全方位移动的遥控式壁面爬行检查机器人。王一治研究了四轮结构的 Mecanum 轮机器人系统实现全方位运动的条件,比较了六种常见的 Mecanum 轮的布局形式,并优选出能实现全方位运动的最佳方案。他还分析了四种不平地面条件下 Mecanum 轮与地面的接触状态,用矢量变换结合笛卡尔坐标变换方法分析给出 Mecanum 轮机器人系统在不平地面上运动的六维运动学模型。杨飞建立了三轮结构的 Mecanum 轮机器人的运动学模型,比较了机器人机构参数对曲线运动和双路径运动的影响。

1.2.2 其他的全方位移动机构

除了 Mecanum 轮式移动机构外,常见的全方位移动机构还包括:球轮驱动式、全轮转向式、正交轮式等。球轮由滚动球体、支撑辊子和驱动辊子组成,如图 1-2 所示。球轮的驱动力来自驱动辊子和球体的摩擦力,而摩擦力又与载荷以及路况有关,因此球轮的驱动力和速度都受到较大限制而且容易发生打滑现象。

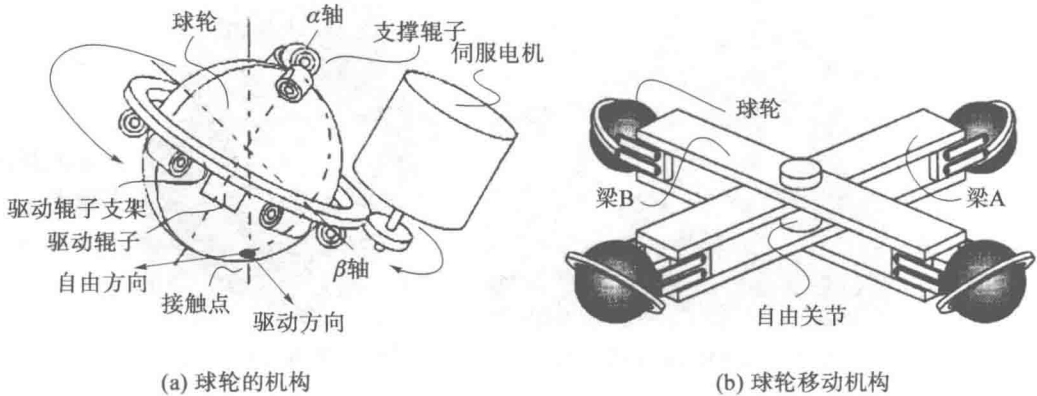


图 1-2 球轮驱动式全方位移动机构

全轮转向式移动机构在普通四轮结构的基础上,增加了一套转向装置,使车轮可以全方位旋转,结构如图 1-3 所示。该移动机构中车轮结构简单,但转向机构设计复杂,因此限制了它的应用。

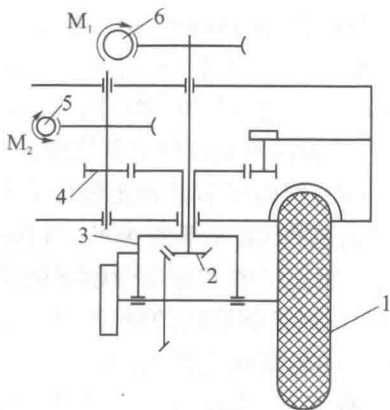


图 1-3 全轮转向式移动机构

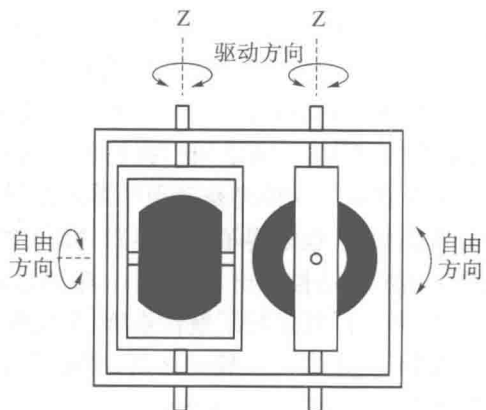


图 1-4 正交轮或移动机构

正交轮或移动机构由两个半径相等且切去球冠的球形轮子组成。每个球形轮子通过一个垂直于切面且通过球心的支撑轴固定在一个框架上,两个支撑轴相互垂直因此称为正交轮,结构如图 1-4 所示。在轮子的交替运动过程中,由于两个轮子同时接触地面的时间很短,每个轮子承受的压力变化很大,因此会影响与地面的摩擦力,进而影响轮子的速度和整体的运动精度。

除了上面介绍的几种全方位移动机构,还有一类与 Mecanum 轮结构相似的全方位轮。它们同样是由轮毂和安装在轮毂上的一组辍子(或滚子)组成,但辍子轴线与车轮轴线相互垂直。这类全方位轮包括:单排轮、双排轮、Transwheel 轮、连续切换轮等。

单排轮是小型机器人足球比赛中使用较多的一种全方位轮,如图 1-5 所示。单排轮结构简单,加工制造容易,但是在运动过程中两个小滚子切换不连续,摩擦力变化大,特别在快速运动时机器人整体颤动较大。双排轮由两层结构组成,其间交错分布着小辍子,图 1-6 与图 1-7 为两种结构的双排轮。与单排轮相比,双排轮运行稳定,能够保证任何时刻都有辍子与地面接触,但是双层的布局使着地点内外交错,对机器人的旋转造成非线性影响,机器人在运动方向上会有偏移或左右摇摆。

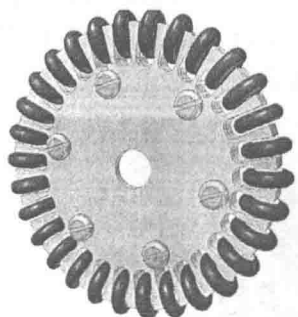


图 1-5 单排轮的结构

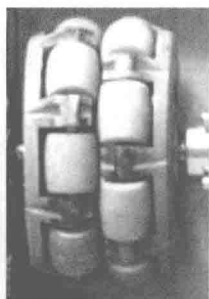


图 1-6 双排轮结构一

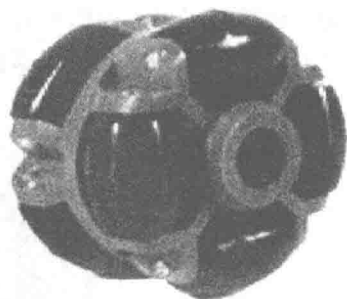
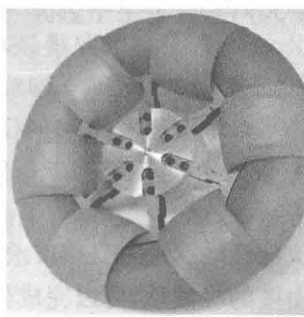


图 1-7 双排轮结构二

Transwheel 轮是连续切换轮的基础,如图 1-8 (a)所示。Transwheel 轮与单排轮存在的问题相似,就是轮子转动过程滚子与地面接触不连续。为了弥补 Transwheel 轮的不足,人们设计了连续切换轮,如图 1-8 (b)所示。它由间隔分布的内层辍子和外层辍子组成,辍子成桶形且车轮包络线为圆形。滚动过程中内外层辍子交替接触地面。由于接触点连续并且位于同一个圆上,机器人平台的振动较小,偏移和摇摆也较小。



(a) Transwheel 轮



(b) 连续切换轮

图 1-8 Transwheel 轮与连续切换轮的结构

1.3 Mecanum 轮全方位移动机器人的应用

所有轮式全方位移动机器人中,应用得最多的是采用 Mecanum 轮的全方位移动机器人。对于 Mecanum 轮全方位移动机器人,国内外已有多方面的研究和应用系统的开发,如 Mecanum 轮叉车、Mecanum 轮电动轮椅、Mecanum 轮大型搬运平台等。目前国内外各种层级的机器人竞赛中,Mecanum 轮移动机器人是出现率最高的特种移动机器人;新创业的机器人企业中,以 Mecanum 轮移动机器人为基础的新公司也很多。但这些多数只简单实现了 Mecanum 轮移动机器人的全方位移动功能、手工操作或简单自动移动,缺少充分发挥其运动特点,而将其推广至全自动、多机器人协作调度等复杂应用环境,更多地减少机器人移动占地、更明显地提高载运移动效率的成果和应用。

1985年,卡内基-梅隆大学成功研制了基于 Mecanum 轮的全方位移动平台“Uranus”(图 1-9),该平台为 4 轮独立驱动,搭载电源、计算机和若干传感器,每个电机功率 1 kW,负载 100 kg,能够在平面上灵活移动,从而在实践上证明了由 Mecanum 轮组成全方位移动系统的可行性。奥克兰大学的 Dickerson 也在 1991 年对 Mecanum 轮式移动平台进行了多方面的研究。之后多家科研单位加入了对 Mecanum 轮及其移动机构的研究,如日本的冈山大学、西班牙的瓦伦西亚大学、韩国的高丽大学等。

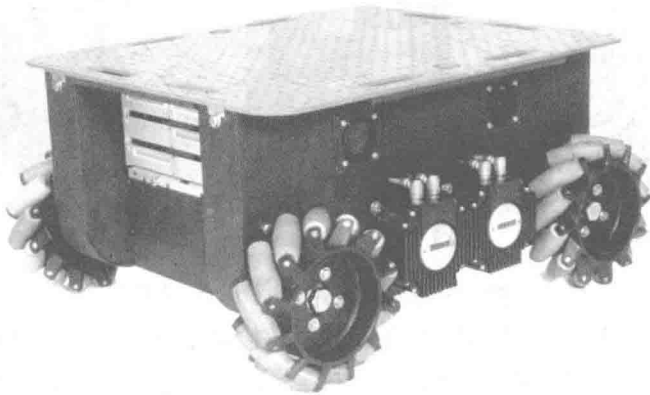


图 1-9 全方位移动平台——Uranus

在商用方面,美国的 Airtrax 公司是将 Mecanum 轮进行商用的先驱,20 世纪 90 年代末,Airtrax 公司从美国海军取得该项技术,开发了基于 Mecanum 轮的全方位叉车 SIDEWINDER ATX-3000(图 1-10),以及具有托盘搬运功能的全方位移动机器人以及万向行走升降平台等。德国的 MIAG 公司成功开发出了用于空中客车的飞机引擎就位仪(图 1-11)、设备更换车(飞机起落架对接、拆卸)、升降平台,还有用于武器搬运的弹体搬运装载车等。

在教育和医疗领域,德国 KUKA 公司的 youBot 机器人(图 1-12)搭载有五自由度机械臂和二自由度的机械爪,可以完成机械加工运输的示教功能。Mecanum 轮用于全方位移动智能轮椅(图 1-13),可以帮助残疾人提高移动能力。