

# 轮式移动机器人轨迹跟踪控制策略研究

邵 华

(宁夏民族职业技术学院, 宁夏 吴忠 751100)

摘要: 随着科学技术的发展升级, 机器人已经成为高新技术密集化与机电一体化发展的重要支持技术。轮式机器人有着自重轻、载重大、操作简便、控制方便的优势, 因此在生活、工业、军事以及空间勘探等领域中发挥着巨大作用。而运动控制是影响轮式机器人工作效率与质量的核心因素, 也是现阶段一直在研究与解决的关键问题之一。本文即在此背景下展开研究, 通过分析轮式移动机器人的发展概述, 总结轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究情况, 进而提出轮式移动机器人轨迹跟踪控制的有效策略。

关键词: 轮式移动; 机器人; 轨迹跟踪; 控制

机器人是改变现代社会运行模式和工作结构的重要技术, 不仅颠覆了传统以人力为主的工业体系, 而且形成了全新的生产工具, 提高了生产效率与工作质量。尤其在部分具有危害性或危险性的工作中, 机器人能够展现出更高的优越性, 进而成为辅助人类生活、工作、生产的重要技术。轮式机器人作为一种非线性欠驱动系统, 在工作中的轨迹跟踪控制则尤为重要, 因此成为当前人们研究的热点。

## 一、轮式移动机器人发展概述

移动机器人具备环境感知、动态规划、运动控制、操作执行等多元功能, 因此也涉及材料力学、运动学、机械制造、电气工程等多元学科知识, 进而在现代生活与生产之中发挥着重要作用。比如我国研制的深海探测机器人、天体探测机器人等, 均展现出移动机器人技术的应用价值和优势。

轮式机器人则有着自重轻、载重大、操作简便、控制方便以及成本低廉的优势, 因此其应用范围也在不断扩张。根据轮式移动机器人的机动性特征, 可以分为同步驱动、全向驱动、差动驱动、轨式滑动等模式。同步驱动类轮式移动机器人一般需要两个驱动电机, 分别负责平移与操纵, 平移电机可以控制轮子移动的线速度, 以此控制机器人前进, 操纵电机可以控制车轮转动方向, 以此实现转弯需求。全向驱动类则可以实现全方位运动, 一般配备四个瑞典轮, 并分别由四个电机控制, 由此实现平面内的任意轨迹运动。轨式滑动类则以不同速度同一方向或相反方向旋转的轮子为基础, 进行机器人定向移动, 类似于坦克履带结构, 尤其擅长在松散地形上的移动, 但也存在航卫测定不准的问题。

轮式移动机器人的轨迹跟踪控制过程主要包括点镇定、路径跟踪、轨迹跟踪等三个环节。点镇定是指机器人将参考点作为目标并移动到位置后稳定。路径跟踪与轨迹跟踪则属于跟踪相关问题, 是机器人根据已知路径或轨迹进行移动的方式, 其中路径跟踪要求机器人能够按照时间和路线特定移动, 而轨迹跟踪只需要机器人按照轨迹前进即可, 不需要时间控制。

由此不难发现, 轮式移动机器人具有非线性、非完整、强耦合的特征, 具备多元化的输入输出系统。因此其多用于轨迹跟踪任务之中, 可以适应恶劣环境、复杂地形, 能够长时间工作。在轮式移动机器人轨迹跟踪控制方面, 则需要根据其不同层次的特征设计控制其, 以此整合系统化的控制结构, 从而实现提高运动控制效果与质量。

## 二、轮式移动机器人轨迹跟踪控制分析

### (一) 现阶段研究的控制方法

1. 非线性状态反馈控制方法。该方法主要以非完整移动机器人的运动学模型为基础, 由此设计具备非线性状态的反馈控制规律, 进而可以形成一个闭环系统。该方法中的“状态”是指非完整移动机器人在该系统中呈现出的状态向量, 表示机器人在闭环控制系统中的空间状态, 并且可以使用机器人的期望轨迹与实际轨迹误差进行表示。该方法在运用过程中面临的难点在于将

系统全局控制在平衡状态, 并能够稳定在原点附近位置。通过对轮式非完整移动机器人结构的分析, 可以找到其线性化反馈关系, 进而可以借助微分平坦概念, 采用一维动态跟踪控制器方法, 由此获得对应的跟踪控制器。该控制器在闭环系统中具备无奇异点的特性, 但在参考角速度设置中需要避免其输入量为零的情况, 因而使得其在跟踪过程中无法实现直线运动。

2. 计算力矩方法。该方法则主要依托机器人逆动力学模型展开设计, 通过该模型直接控制运动电机, 以此提高其控制效果。在扰动因素影响下, 可以通过计算力矩判定其轨迹跟踪情况, 但其对于模型的要求极高。即使没有任何扰动, 该方法也难以建成精确的数学模型, 因此在实际应用中缺乏可行性。

3. 自适应控制方法。该方法则采用了假设思维, 假定使用一组未知参数的线性关系表示机器人的动态特性, 而后利用自适应算法估算相关未知数, 由此根据估算值的变化建立动态控制机制。该方法所制成的自适应控制其具备修正自身特性的功能, 同时也能根据对象变化与扰动变化而随时做出动态调整, 以此提高控制系统的性能达到最佳状态。在实际研究中发现, 质心与几何中心无法重合的轮式机器人仍可以利用该方法对控制律进行修正, 由此证明该方法的鲁棒性好, 但实现过程比较复杂, 很难满足机器人实时运动与工作的现实需求, 尤其在参数存在不确定情况时, 其系统的稳定性也会严重降低, 因此也缺乏实际可行性。

4. 智能控制方法。该方法脱离了数学模型支持, 而非线性控制系统中的应用优势比较鲜明。目前应用广泛的智能控制方法主要为神经网络控制法与模糊控制法。前者的劣势在于需要在线或离线学习, 由此占据大量的系统资源, 无法保证系统运行的实时性。后者的缺陷在于需要以专家经验为基础建立模糊规则, 否则其控制效果无法达到理想效果。因此目前该方法在轮式移动机器人跟踪控制中的应用还处于仿真阶段。

### (二) 轮式移动机器人轨迹跟踪控制需要避免的问题

1. 数模的依赖性。目前轮式移动机器人在轨迹跟踪控制设计中大多需要建立数学模型, 但数学模型建设需要依托笛卡尔坐标空间展开, 由此就使得其方法对于数学模型产生了较大的依赖性。尤其对数学模型的精确性有着更高要求, 并且设计出的数学模型往往比较复杂, 进而对实时控制效果产生较大的影响。此外, 在现实应用中, 由于轮式移动机器人的驱动系统、电机特性、路面问题等不确定因素影响, 还会进一步扩大其对实时控制效果的影响。因此在解决轨迹跟踪控制问题中, 还需要降低对数学模型的依赖, 提高实时控制效果。

2. 控制量理想化。现阶段研究的控制方法在对移动机器人速度调节方面具有理想化特征, 即建立在车轮速度大小与变化可以不受限制的前提之下。但实际应用中, 由于机器人使用的电机性能差异、轮子在不同地面上的摩擦力差异等因素限制, 一般无法实现其控制

条件与需求,进而在影响了其控制算法的实际应用效果。因此还需要在方法研究中进一步贴近现实,避免假定理想化的控制量与条件。

3. 抖动问题。在非线性、延时控制、非完整约束等条件影响下,轮式移动机器人的运动系统在受到较大干扰,或者产生较大偏差时,其运动状态会产生比较强烈的抖动,这也是影响轮式移动机器人普及应用的重要问题之一。

### (三) 轮式移动机器人轨迹跟踪控制理论知识

1. 模型特性。轮式移动机器人作为一种非线性欠驱动系统,其同时也有着典型的非完整约束特征。例如差分驱动下的机器人,可以依托地面建立参考系,  $(x, y, \theta)$  可以表示机器人在地面坐标系下的位姿,而  $(v, w)$  可以表示机器人的运动速度,由此即可建立对应的数学模型。

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = w \end{cases}$$

在该模型中,  $(x, y, \theta)$  可以作为轮式移动机器人的系统状态量,而  $(v, w)$  可以作为其系统控制量。因此,基于该模型可以确认,轨迹跟踪控制可以通过改变机器人的速度,以此实现调整机器人位姿的目的,进而使得机器人在一定时间范围内可以跟踪行驶到期望轨迹之上。通过数学分析也可以发现,该数学模型中  $\theta$  的三角函数是一个状态变量,因而使得其整体呈现出非线性系统特征。从输入输出方面来看,机器人系统完整的输入量少于输出量,由此成为一个欠驱动系统。

2. 自适应控制技术。自适应控制技术可以辅助控制系统自动进行参数调节,以此确保系统在未知的参数变化以及接收到不同干扰的状态下,仍然可以保证向期望指标运动。自适应控制系统一般分为两种类型,其一为自适应调节器系统,主要依托概率控制理论与辨识理论展开设计。其二为模型参考自适应控制系统,主要以超稳定性定理、正实性概念、Lyapunov 稳定性定理为基础进行设计。

3. 反步法。反步法采取了由前向后递推的设计思路,进而可以将复杂高阶系统转化为多个低阶子系统,但同时要想保证低阶系统稳定运行,需要为每一个低阶系统提供中间虚拟量,以此确保系统整体的稳定运行。

### 三、轮式移动机器人轨迹跟踪控制策略

在实际系统构建过程中,必须考虑该系统与外部环境之间的接触因素。由于该类系统一般具有约束条件限制,因此可以称为受限系统。而约束条件可以阐述为完整约束与非完整约束两种类型,前者仅限制受控对象的空间位置,或者同时对其空间位置与运动速度产生约束,具有几何约束特征。后者则是针对系统运动速度的约束,并且无法将其转化分解为空间位置限制,因此成为不可积的运动约束。一般来说,带有可滚动轮子的系统均属于非完整约束系统。假定轮式移动机器人无法进行滑动运动,轮子与地面接触时的瞬时速度可以视为零,那么机器人可以实现前后左右、旋转等运动,但无法进行横向运动。因此针对前两轮驱动的四轮移动机器人,需要保证其前两轮在同一轴线位置,并必须使用两个电机单独驱动,通过控制两个电机的驱动速度,就可以实现机器人的路径跟踪目的。

#### (一) 运动学建模

构建运动学方程才能用一个关系式科学描述系统的位置与姿态,该方程不需要考虑系统产生运动的原因,但是可以判断系统位姿与时间或者系统位姿与变量导数之间的关系,由此可以得出该机器人系统的动力学方程。在机器人轨迹跟踪控制研究中,其建模分析前需要做好如下假设准备:

第一,假定轮式机器人始终处于水平地面上运动,车体关于纵向轴向呈轴对称形态。

第二,假定轮式移动机器人的外部结构、车轮以及运动地面均属于刚体。

第三,假定车轮一直保持与地面的接触状态,且接触位置视为点,接触点与车轮中心的连线与地面保持垂直状态。

第四,假定车轮在地面上运动时为纯滚动,没有任何滑动。

轮式移动机器人系统在运动学建模中一般可以采用坐标变换法或矢量分析法,但两种方法都需要上述假设作为前提,尤其要假定车轮为纯滚动运动,一旦加入滑动运动,其运动模型就无法形成描述。在该两种方法中,矢量分析法有着大量的重复计算,缺乏通用性,因此一般选择坐标变换法。该方法的优势在于可以满足任意车轮与轮系布置机器人的描述需求,进而可以得到形式统一的运动学方程。其基本思想在于将车轮等效视为一个平面运动和一个转动的组合,进而借助瞬时重合坐标系,可以将车轮的运动借助与其位置无关的量进行描述和表达,而坐标变换可以作为基础工具应用,轮式移动机器人在不同固定参考点的状态可以分别表示其不同车轮的运动速度,将全部车轮的速度方程联立就可以完整给出机器人系统运动速度与车轮运动之间的关系。

#### (二) Back-stepping 算法应用

Back-stepping 算法即反步法,是 20 世纪 80 年代就提出的非线性系统稳定设计理论,其可以解决非线性系统中参数不确定而引起的系统不稳定问题,在此基础上对控制器系统进行设计优化,可以借助算法修正参数,以此达成系统全局调节与跟踪的目的和效果。该算法的优势在于可以在每一步将多个变化参数建立联系,比如在轮式移动机器人系统中,可以将不确定参数的自适应调节函数、状态坐标的变化量、已知 Lyapunov 函数的虚拟控制镇定函数等建立联系。因此该算法在参数严反馈或可状态线性化的不确定系统中具有良好的应用作用。其采用的虚拟控制实际上可以视为一种静态补偿,即前一个子系统需要由后一个子系统的虚拟控制以达成镇定效果,因而是轮式移动机器人的轨迹跟踪控制中具有良好的应用效果。

#### (三) 滑模变结构控制方法

该控制方法是针对变结构控制系统而形成的一种控制技巧,其控制策略的优势在于可以控制系统的非连续性,即系统可以跟随时间变化调节开关状态。因此该控制系统可以辅助轮式移动机器人进行小幅度、高频率的运动,以此保持规定的运动状态,进而达成一定的“滑动”或“滑模”运动效果。该系统具有良好的鲁棒性特征,也是轮式移动机器人轨迹跟踪控制的一个关键要素。

### 四、结语

综上所述,随着现代社会与科技的发展,轮式移动机器人的应用范围不断扩大,而轮式移动机器人的轨迹跟踪控制成为影响其应用价值与工作效率的重要因素,对此需要深度挖掘相关研究理论与方法,进而通过运动学建模、Back-stepping 算法应用、滑模变结构控制方法等方法进行优化设计,以此进一步提升轮式移动机器人的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 师五喜,姜万蕾,李宝全.输入受限轮式移动机器人轨迹跟踪控制[J].天津工业大学学报,2022,41(05):73-78.
- [2] 张小俊,刘昊学.轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究[J].计算机工程与科学,2022,44(10):1804-1811.
- [3] 游东亚,崔立志,卜旭辉.轮式机器人纵向滑移迭代学习轨迹跟踪控制[J].电光与控制,2022,29(09):96-101.
- [4] 尹泽成,魏惠芳,胡高山.轮式移动机器人轨迹跟踪控制与仿真[J].中国设备工程,2022(09):35-37.

基金项目:宁夏回族自治区教育厅高等学校科学研究项目(项目编号:宁夏高校科研项目 2022-224)