

3.1 自主移动机器人的机械结构

随着社会发展和科技进步,机器人在当前生产生活中得到了越来越广泛的应用。移动机器人是研发较早的一种机器人,移动机构主要有轮式、履带式和腿式等。

3.1.1 腿式机器人

腿式机器人的运动轨迹是一系列离散的足印,相比传统的移动机器人,腿式行驶机构因其出色的越野能力,得到了机器人专家的广泛重视,在其开发和研制上投入了大量的时间和精力,并且取得了较大的成果。图 3.1.1 所示为腿式机器人腿部坐标分析图。从移动的方式上来看,腿式移动机器人可以分为两种:动态行走机器人和静态行走机器人。也可根据腿的数量进行分类。轮腿式机器人作为腿式机器人的一种,具有更强的地形适应性,这是因为其每条腿能实现不同的动作,因而可以依靠腿的协调动作来保持机身平稳从而适应复杂地形,此外轮式结构的设计可保证该机器人在松软、崎岖的地面上能以较高速度运动。但是

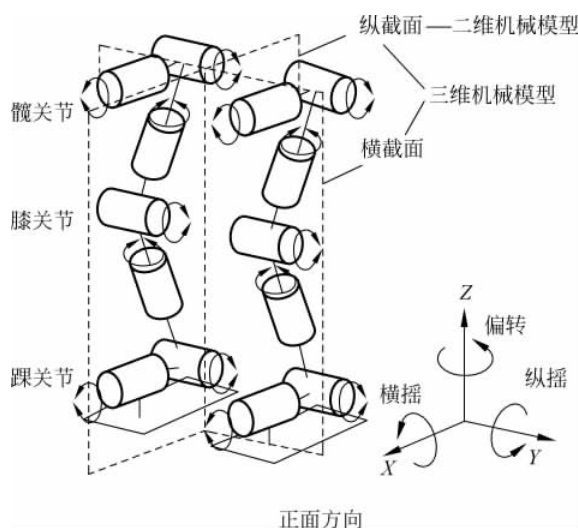


图 3.1.1 腿式机器人腿部坐标分析图

腿式机器人也存在许多不足之处,例如,为使腿部协调而稳定运动,从机械结构设计到控制系统算法都比较复杂;相比自然界的节肢动物,仿生腿式机器人的机动性还有很大差距;机构行走速度缓慢,控制上也存在很多困难,结构形式也最为复杂。目前该种机器人还处在实验室研究阶段,应用较少。

3.1.2 轮式机器人

轮式机器人具有运动速度快的优点,但越野性能不太强。随着各种各样轮子底盘的出现,轮式机器人的性能有了很大的提高,其研究得到了国内外学者的普遍关注。轮式移动机构运动平稳、操纵简单,适合于条件较好的路面行走,在无人工厂中,常用来搬运零部件或做其他工作。轮式机器人具有非常广泛的应用前景与商业价值。

1. 车轮的结构设计

轮式移动机器人通过车轮的滚动来实现其工作任务,达到“移动”的目的。该类机器人车轮的形状或结构形式取决于地面性质和车辆的承载能力。

(1) 传统的车轮形状比较适合于平坦的坚硬路面,其形状如图 3.1.2 所示。

(2) 随着轮式机器人应用场合的增多,球轮、充气球轮和锥形轮也出现在轮式机器人中,如图 3.1.3 所示。充气球轮比实心车轮弹性好,能吸收因路面不平而引起的冲击和振动。此外,充气球轮与地面的接触面积较大,特别适合沙丘地形。

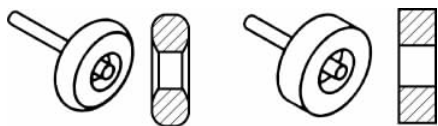


图 3.1.2 传统车轮形状



图 3.1.3 球轮、充气球轮和锥形轮

(3) 随着航天机器人的发展,超轻金属线编织轮、半球形轮应运而生,如图 3.1.4 所示。这两种轮是为火星表面移动车辆开发而研制出来的,其中超轻金属线编织轮主要用来减轻移动机构的重量,减少升空时的发射功耗和运行功耗。

(4) 前述几种轮子多用于机器人的驱动,承载机身的较多重量,但转向不太灵活。对于运动灵活性要求较高的机器人,上述轮子前后两向的运动方向很难满足需求。因此在机器人转向机构中,常使用万向轮或球形轮进行机器人的转向控制,如图 3.1.5 所示。

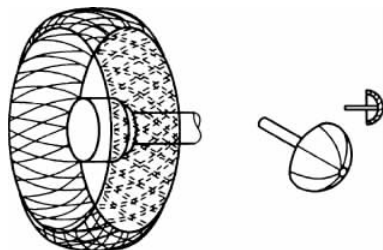


图 3.1.4 超轻金属线编织轮、半球形轮



图 3.1.5 万向轮、球形轮

【小贴士】 万向轮、球形轮一般只用于较小、较轻的机器人转向控制,不能加装电机或其他动力系统,不能作为驱动轮使用。

(5) 麦克纳姆轮也称瑞典轮,是一种多轮系的复合轮,它不仅能够实现全方位的自由移动,还能作为机器人的驱动轮,承载机身的全部重量。如图 3.1.6 所示,麦克纳姆轮是一种多轮系结构,在它的轮缘上斜向分布着许多小滚子,故轮子可以横向滑移。小滚子的母线很特殊,当轮子绕着固定的轮心轴转动时,各个小滚子的包络线为圆柱面,所以该轮能够连续地向前滚动,从而保证了机器人在任意方向上自由地移动,而不改变轮轴本身的方向。麦克纳姆轮结构紧凑,运动灵活,是很成功的一种全方位轮。但它制造成本较高,控制时需要计算小滚子的合力矢量方向,具有一定的计算难度,可以根据机器人制作的预算和具体需求进行选择。

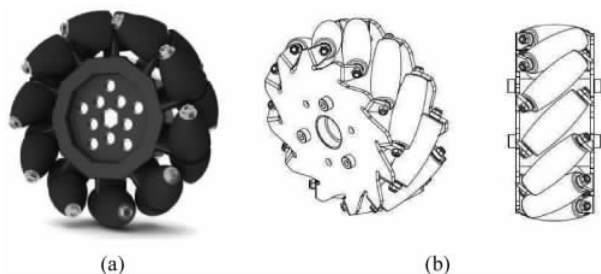


图 3.1.6 麦克纳姆轮

(a) 实物图; (b) 示意图

2. 底盘的结构设计

根据车轮数量可以对地面移动轮式机器人作不严格的分类,常见的轮式机器人可以分为单轮滚动机器人、两轮移动机器人、三轮及四轮移动机器人四种。

1) 单轮滚动机器人

单轮滚动机器人是一种全新概念的移动机器人,如图 3.1.7 所示。从外观上看它只有一个轮子,它的运动方式是沿地面滚动前进,后来开发的球形机器人也属于单轮滚动机器人。早期的典型代表之一美国卡内基-梅隆大学机器人研究所研制的单轮滚动机器人 Gyrover。Gyrover 是一种陀螺稳定的单轮滚动机器人。它的行进方式是基于陀螺运动的基本原理,具有很强的机动性和灵活性。近年来,我国也对单轮滚动机器人进行了深入研究。香港中文大学设计了一种单轮滚动机器人,它的驱动部件是一个旋转的飞轮,飞轮的轴承上安装有双链条的操纵器和一个驱动马达。飞轮不仅可以使机器人实现稳定运行,还可以控制机器人运动方向。哈尔滨工业大学设计了一种球形滚动机器人,在进行结构和控制系统设计时,使转向与直线行走两种运动相互独立,从而避免了非完整约束的存在,简化了动力学模型和控制算法。该机器人转向灵活。单轮滚动机器人的研究具有广阔的应用前景:利用其水陆两栖的特性,将它引入到海滩和沼泽地等环境,进行运输、营救和矿物探测;利用其外形纤细的特性将它用作监控机器人,实现对狭窄地方的监控;在航天领域,基于单轮滚动机器人的原理可以开发一种不受地形影响、运动自如的月球车。

2) 两轮移动机器人

这种类型主要有自行车机器人和两轮呈左右对称布置的两轮移动机器人。自行车机器人是机器人学术界提出的一种全新的智能运输(或交通)工具的概念,由于其车体窄小,可作小半径回转,运动灵活、结构简单,因此可在灾难救援、森林作业中得到广泛应用。但到目前

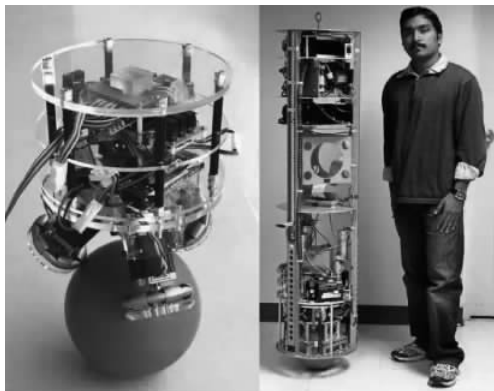


图 3.1.7 单轮滚动移动机器人

为止,仍处于理论探讨和初步的实验研究阶段。自行车机器人运动力学特征较为复杂,其两轮纵向布置,与地面无滑动接触,它本身就是一个欠驱动的非完整系统,还具有一定的侧向不稳定性,如果不对它实施侧向控制,则一定不能站立起来。自行车机器人的控制相当困难,既不能采用连续或可微的纯状态反馈实现系统的渐近稳定,又不能采用非线性变换实现整体线性化等。所以,自行车机器人是一个令人非常感兴趣的研究领域,其动力学与控制极具挑战性,往往会辅助陀螺仪等设备进行倾斜角的控制,如图 3.1.8 所示。

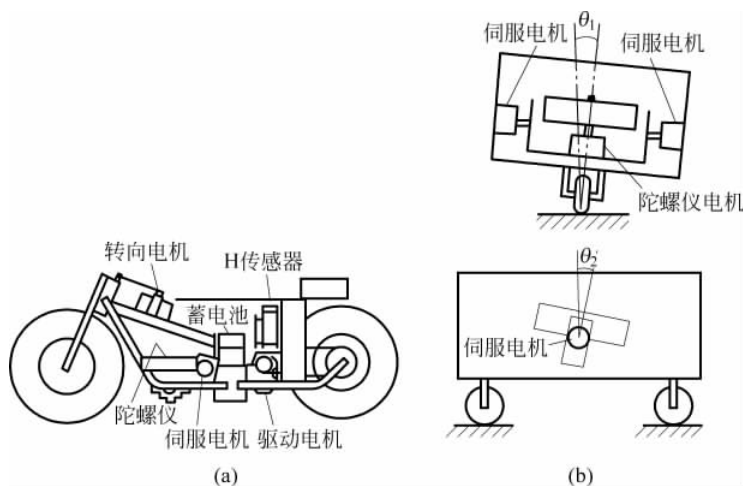


图 3.1.8 利用陀螺仪的两轮车

(a) 外形图; (b) 驱动机构图

不加装车体的两轮移动机器人是典型的机器人结构,左右轮分别由一个电机驱动,依靠差速实现转向,转向灵活。但当安装上车体时,就同自行车机器人一样,要考虑机器人的平衡问题。但是这种两轮移动机器人具有极强的灵活性。两轮行走机构是自然不稳定体,是高阶次、不稳定、多变量、非线性、强耦合系统。目前它还存在许多问题,不能实际应用。

3) 三轮及四轮移动机器人

轮式移动机器人中最常见的机构是三轮及四轮移动机器人,如图 3.1.9、图 3.1.10 所示。当在平整地面上行走时,这种机器人是最合适的选择。

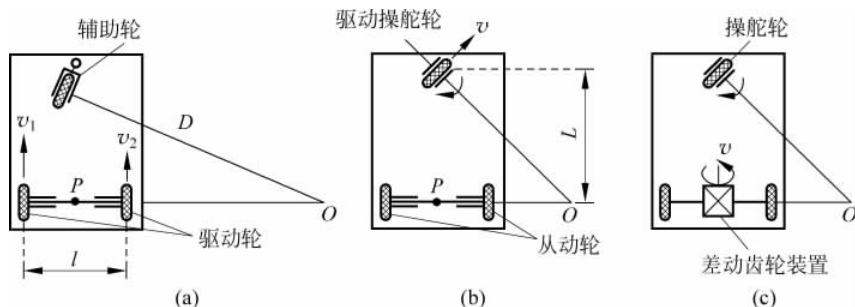


图 3.1.9 三轮移动机器人的底盘结构示意图

(a) 后轮独立驱动；(b) 中前轮由操舵机构和驱动机构合并；(c) 差动齿轮传动

图 3.1.9(a) 为后轮用两轮独立驱动, 前轮用小脚轮构成的辅助轮组合。这种机构的特点是机构组成简单, 而且旋转半径可从 D 到无限大, 任意设定。但是它的旋转中心是在连接两驱动轴的直线上, 所以旋转半径即使是 0, 旋转中心也与车体的中心不一致。

图 3.1.9(b) 中前轮由操舵机构和驱动机构合并而成。与图 3.1.9(a) 相比, 操舵机构和驱动机构都集中在前轮部分, 所以机构复杂。在这种场合, 旋转半径可以从零到无限大连续变化。

图 3.1.9(c) 是为避免图 3.1.9(b) 所示机构的缺点, 通过差动齿轮进行驱动的方式。近年来不再用差动齿轮, 而采用左右轮分别独立驱动的方法。当两轮转速大小相等、方向相反时, 可以实现整车灵活的零半径回转。但是如果沿比较长的直线移动时, 因两驱动轮的直径差和转速误差会影响到前轮的偏转, 这时采用前轮转向方式更合适。

四轮移动机器人的驱动机构和运动基本上与三轮移动机器人相同, 如图 3.1.10 所示。图 3.1.10(a) 为两轮独立驱动, 前后带有辅助轮的方式; 图 3.1.10(b) 是所谓汽车方式驱动, 适合于高速行驶, 但在进行低速的运输搬运时, 由于费用不合算, 所以不常采用。

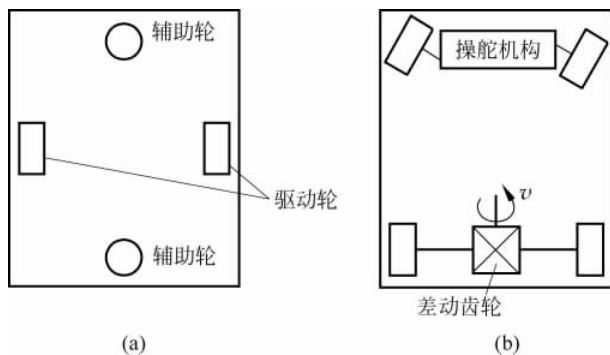


图 3.1.10 四轮移动机器人底盘结构示意图

(a) 两轮独立驱动；(b) 汽车方式驱动

四轮移动机器人移动机构的转向装置通常有铰轴转向和差速转向两种控制方式。铰轴转向式的转向轮装在转向铰轴上, 转向电机通过减速器和机械连杆机构控制铰轴, 从而控制转向轮的转向。在轮式机器人中, 差速转向式控制较复杂, 但精度较高, 在机器人的左、右轮上分别装上两个独立的驱动电机, 通过控制左、右轮的速度以实现车体的转向, 在这种情况下

下,非驱动轮应为自由轮。四轮的稳定性好,承载能力较大。

3.1.3 履带式机器人

履带式机器人(图 3.1.11)的行驶机构也称为机器人移动平台,包括驱动履带行走的传动电机控制系统、机架或车体及其他功能附件。履带式机器人可以很好地适应地面的变化,具有良好的越障性能和较长的使用寿命,适合在崎岖的地面上行驶。履带式行驶机构最早出现在坦克和装甲车上,后来应用在某些地面行驶的机器人上。国内外的学者和研究机构对履带式机器人进行了大量研究。我国对履带式机器人的研究也取得了一定的成果,如沈阳自动化研究所研制的 CLIMBER 机器人、北京理工大学研制的四履腿机器人、北京航空航天大学研制的可重构履腿机器人等。这种履带式行驶机构曾被认为是替代轮式结构的一种很好的选择,但是,其沉重的履带和繁多的驱动轮使得整体机构笨重不堪,消耗的功率也相对较大。

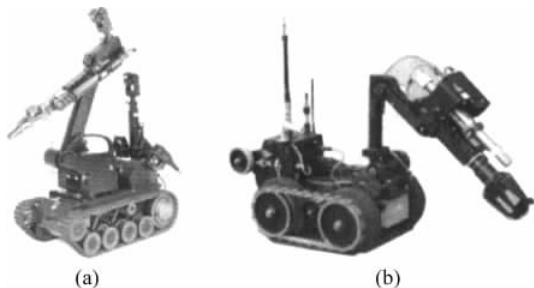


图 3.1.11 履带式机器人

(a) 法国 Cybernetics 公司的 TEODOR 排爆机器人; (b) 法国 Cybernetics 公司的 CASTOR 小型排爆机器人

履带式行走机构主要由主动轮、从动轮、承重轮、驱动装置、张紧装置、履带板等构成,履带起到了为车轮铺路的作用。总之,该类型行走机构适合在平整度不高的路面上移动,在设计过程中,有足够的刚度和强度、耐磨性等要求,有较小的质量,有合理的结构和良好的转向、行进功能。它一般具有以下特点。

- (1) 支撑面积大,适合松软、泥泞的路面,与路面的滚动摩擦小,通过性能良好。
- (2) 因履带的支撑面上有履带齿,保证了对地面的附着力,因此可获得足够牵引力。
- (3) 履带式机构往往具有重量较大、运动惯性大、结构复杂、零部件易损等缺点。

由于履带机器人具有优良的越障功能,以及良好的路面适应性,在环境较为恶劣的特殊作业环境中常常选用履带式底盘结构,如拆弹、排爆机器人等。

3.1.4 其他机器人结构

由于轮式、履带式等移动机器人都具有各自的优点和缺点,因此研制复合式机器人就显得十分必要,复合式移动机器人已逐渐成为现代移动机器人发展的方向。复合式移动机构即轮式、履带和腿式的随机组合,包括复合轮式、轮-腿式、关节-履带式、关节-轮式、轮-腿-履带式等。此类机器人广泛应用于复杂地形,以及反恐防暴、空间探测等领域,具有较强的爬坡、过沟、越障和上下楼梯能力以及运动稳定性。轮-腿式移动机构运动稳

定,具有较强的地形适应能力,应用较多;关节-履带式移动机构运动平稳性好,但速度比较慢,它与履带式机器人一样,功耗较大;关节-轮式移动机构运动速度较快,但越障能力差,较多应用于管型构件中;轮-腿-履带式机构越障性能好,但转向性能差、功耗较大,运动控制比较复杂。图 3.1.12 所示为轮-履带式移动机器人底盘结构示意图。

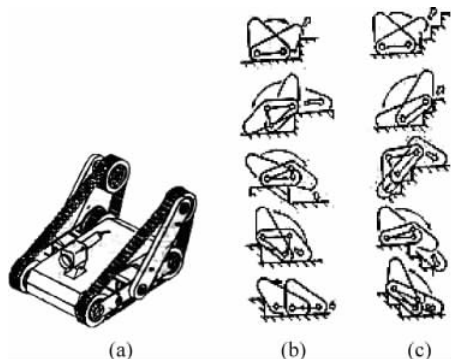


图 3.1.12 轮-履带式移动机器人底盘结构示意图

(a) 整体结构图; (b) 越障模式; (c) 上下台阶模式

3.2 差动机器人运动学分析与轨迹控制的实现

3.2.1 机器人建模与运动学分析

在研究机器人的运动规律时需要把物体在空间中表示出来,需对机器人的运动规律进行运动学分析。

移动机器人运动学模型分为位移运动学模型、速度运动学模型和加速度运动学模型三种。本书主要描述轮式机器人的运动轨迹控制,因此这里对移动机器人的速度运动学模型进行分析。

如图 3.2.1 所示为两轮驱动模型,用坐标 (X, Y) 和小车纵轴与 X 轴之间的夹角来描述机器人小车的位姿。

这里假定机器人和地面之间是纯滚动的,车轮只旋转不打滑,得到运动学模型公式

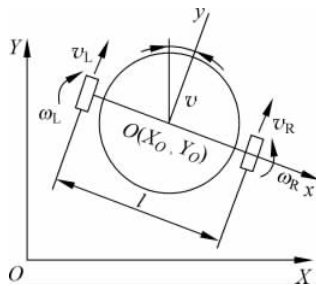


图 3.2.1 两轮驱动模型

$$\begin{cases} \dot{x} = v \sin \theta(t) \\ \dot{y} = v \cos \theta(t) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (3.2.1)$$

式中, (x, y) ——机器人中心 O 点的参考坐标;

θ ——机器人中心 O 点的运动方向角;

v ——机器人中心 O 点的速度;

ω ——机器人差动转向的角速度。

根据上述数学模型,结合机器人的结构特点,把机器人的运动简化为与地面接触的两点运动,两点的位置决定了机器人的位置,两点的运动状态决定了机器人的运动状态。图 3.2.1 中 OXY 为全局坐标系, oxy 为车体坐标系, $O(X_O, Y_O)$ 为机器人坐标在 OXY 上的投影。在此,把前进的方向作为正方向,把后退的方向作为负方向,统一起来分析,设在某一时刻,左、右车轮的速度为 v_L, v_R ,左、右车轮的角速度为 ω_L, ω_R ,在很短的时间间隔 Δt 内,机器人的方向和线速度可以近似认为不变。两轮与地面接触点之间的距离(即机器人两后轮的跨距)为 l 。

在行走过程中,控制系统一般把规划好的路径转变成随时间变化的两个独立驱动轮的角速度的控制,通过驱动器和电动机分别驱动两个驱动轮,两个驱动轮的角速度都要根据规划路径的变化而变化。在此将机器人的运动学分析与两轮角速度结合在一起讨论,使其符合实际控制的需要。

1. 机器人角速度的约束方程

在运动过程中,机器人左右轮间的距离 l 是始终不变的,在任意初始位置,从 $t_1 \sim t_2$ 时刻内转过 θ 角后,到达另一位置,则左轮比右轮多转过的曲线位移为

$$\omega_L r t - \omega_R r t = \theta l \quad (3.2.2)$$

式中, t —— $t_1 \sim t_2$ 时刻的时间间隔;

ω_L ——机器人左轮角速度;

r ——机器人驱动轮的半径;

ω_R ——机器人右轮角速度;

θ ——机器人中心经过时间 t 转过的角度;

l ——机器人左右驱动轮的间距。

由此得

$$\omega_L - \omega_R = \frac{\theta l}{r t} \quad (3.2.3)$$

式(3.2.3)即为两驱动轮角速度间的约束方程。

下面按上文所建立的运动学模型,结合机器人的两种运动方式——直线运动和绕转运动,讨论吸尘机器人左右两轮的角速度方程。

由式(3.2.3)可知,普通绕转运动时左右轮的角速度关系模型为

$$\omega_L = \frac{\theta l}{r t} + \omega_R \quad (3.2.4)$$

对于直线运动而言, $\theta=0$,两轮同速转动,即 $\omega_L = \omega_R$ 。

2. 机器人中心的方程

对移动机器人作轨迹规划时,一般是以两独立驱动轮的轮基中心为基点来进行的,为了控制方便,将机器人的运动简化为中心 $O(X_0, Y_0)$ 的运动,通过中心 $O(X_0, Y_0)$ 的运动得到机器人的运动。利用左、右车轮角速度 ω_L, ω_R ,由 $v = \omega r, d\theta = \omega dt$ 得到

$$v = \frac{\omega_L + \omega_R}{2} r \quad (3.2.5)$$

$$d\theta = \frac{\omega_L - \omega_R}{l} r dt \quad (3.2.6)$$

式中, v ——吸尘机器人中心 O 点的速度;

$d\theta$ ——吸尘机器人在 dt 时间内转过的角度。

令吸尘机器人的初始方位角为 θ_0 , 机器人初始位置 (x_0, y_0) , 由式(3.2.1)、式(3.2.5)可推出

$$L = L_0 + \int_0^t \frac{\omega_L + \omega_R}{2} r dt \quad (3.2.7)$$

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \frac{\omega_L - \omega_R}{l} r dt \quad (3.2.8)$$

$$x = x_0 + \int_0^t \frac{\omega_L + \omega_R}{2} r \sin \theta dt \quad (3.2.9)$$

$$y = y_0 + \int_0^t \frac{\omega_L + \omega_R}{2} r \cos \theta dt \quad (3.2.10)$$

式(3.2.7)~式(3.2.10)中:

L ——吸尘机器人中心 O 点走过的弧长;

θ ——吸尘机器人 t 时刻后的方位角;

x, y ——吸尘机器人中心 O 点 t 时刻后的位置。

通过几何关系, 可以推导出吸尘机器人左右两轮角速度 ω_L, ω_R 和转弯半径 R 满足以下关系式:

$$R = \frac{l(\omega_L + \omega_R)}{2(\omega_L - \omega_R)} \quad (3.2.11)$$

由式(3.2.3)、式(3.2.5)、式(3.2.7)~式(3.2.11)可以看出, 只要合理控制机器人左右两驱动轮的角速度 ω_L, ω_R , 即可控制机器人中心的速度、转向角度及位置, 使其沿任意设定的轨迹运动。

3.2.2 运动轨迹控制的实现

轮式机器人的运动控制就是通过调节机器人的运动速度和运动方向, 使机器人沿期望的轨迹运动。

1. 直线运动

定理 3.1: 当差动轮式移动机器人左右两轮的速度大小相等且方向相同时, 机器人的运动轨迹为直线, 如图 3.2.2 所示。

下面进行证明。

设 $t=0$ 时机器人移动坐标系 (X_0, Y_0, P_0) 与世界坐标系 (X_w, Y_w, O) 重合, 经过时间 t 后机器人运动到新的移动坐标系 (X_t, Y_t, P_t) , 当机器人左右两轮的速度大小相等且方向相同 ($v_R = v_L$) 时, 由式(3.2.8)有

$$\theta(t) = \frac{1}{l} \int_0^t [v_R(t) - v_L(t)] dt = 0$$

将 $\theta(t)=0$ 代入式(3.2.9)和式 3.2.10)得

$$x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_R(t) + v_L(t)] \cos[\theta(t)] dt = v_R t \quad (3.2.12)$$

$$y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_R(t) + v_L(t)] \sin[\theta(t)] dt = 0 \quad (3.2.13)$$

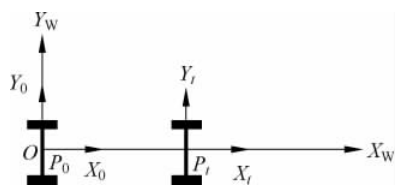


图 3.2.2 直线运动原理图

由式(3.2.12)、式(3.2.13)以及 $\theta(t)=0$ 可知,当机器人左右两轮的速度大小相等且方向相同时,机器人的运动轨迹为直线。

2. 旋转运动

定理 3.2: 当差动轮式机器人左右两轮的速度大小相等而方向相反时,机器人在原地绕移动坐标系的原点旋转。

下面进行证明。

设 $t=0$ 时,机器人移动坐标系 (X_0, Y_0, P_0) 与世界坐标系 (X_w, Y_w, O) 重合,如图 3.2.3 所示。

经过时间 t 后机器人运动到移动坐标系 (X_t, Y_t, P_t) ,当机器人左右两轮的速度大小相等且方向相反($v_R = -v_L$)时,由式(3.2.11)~式(3.2.13)有

$$x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_R(t) + v_L(t)] \cos[\theta(t)] dt = 0 \quad (3.2.14)$$

$$y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_R(t) + v_L(t)] \sin[\theta(t)] dt = 0 \quad (3.2.15)$$

$$\theta(t) = \frac{1}{l} \int_0^t [v_R(t) - v_L(t)] dt = \frac{\Delta v}{l} t \quad (3.2.16)$$

由式(3.2.14)~式(3.2.16)可知,当机器人左右两轮的速度大小相等而方向相反时,机器人在原地绕移动坐标系的原点旋转。

3. 圆弧运动

定理 3.3: 当差动轮式机器人左右两轮的的运动方向相同、速度大小保持不变且速度差固定不变时,机器人的运动轨迹为圆弧。

下面进行证明。

设 $t=0$ 时机器人移动坐标系 (X_0, Y_0, P_0) 与世界坐标系 (X_w, Y_w, O) 重合,经过时间 t 后机器人运动到新的移动坐标系 (X_t, Y_t, P_t) ,如图 3.2.4 所示。

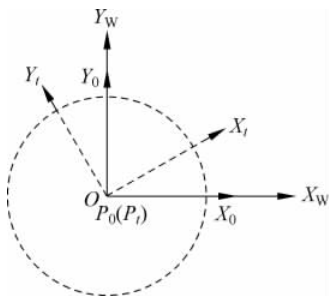


图 3.2.3 旋转运动原理图

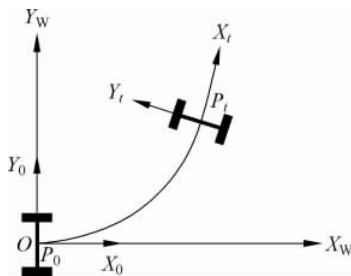


图 3.2.4 圆弧运动原理图

当机器人左右两轮的速度差大小相等,且方向不变($v_R - v_L = \text{常量}$)时,由式(3.2.8)有

$$\theta(t) = \frac{1}{l} \int_0^t [v_R(t) - v_L(t)] dt = \frac{\Delta v}{l} t$$

将 $\theta(t) = \frac{\Delta v}{l} t$ 和 $v_R = v_L + \Delta v$ 代入式(3.2.9),得

$$x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [v_R(t) + v_L(t)] \cos[\theta(t)] dt = \frac{1}{2} \int_0^t [2v_R(t) + \Delta v] \cos\left(\frac{\Delta v}{l} t\right) dt$$