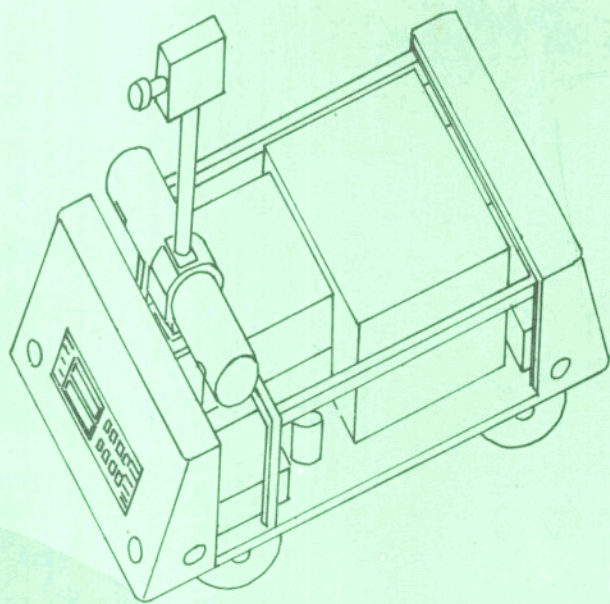


机器人智能控制技术

刘德满 尹朝万 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

前 言

本书是为从事机器人研究的科技人员、研究生和大学生提供全面、系统的基本原理而编写的。这些基本原理可作为机器人系统设计、分析和综合的基础。

本书是根据国内外的有关机器人学方面的著作、论文和作者7年来的研究成果而编写的。本书主要对机器人操作手和轮式移动机器人发展概述、运动学和动力学、轨迹规划和控制进行了介绍。对机器人操作手的控制着重介绍了学习控制,对轮式移动机器人介绍了运动学和动力学控制。

本书作者刘德满博士自1986年以来一直从事机器人学研究,从理论上解决了一些机器人存在的问题。尹朝万研究员对机器人的语言 and 智能控制方面作出了贡献。本书第2、4、6章由东北大学副教授刘德满编写,第1、3、5章由中国科学院沈阳自动化研究所尹朝万研究员编写。

本书是在中国科学院机器人学开放研究实验室资助下出版的!

作者 1993.9

目 录

第一章 概 述	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 工业机器人	(2)
1.3 移动机器人	(6)
1.4 参考文献	(9)
第二章 机器人运动学	(10)
2.1 引 言	(10)
2.2 齐次变换	(11)
2.3 运动学正问题	(16)
2.4 姿态的规定	(17)
2.5 A 矩阵的规定	(17)
2.6 T_0 用 A 矩阵的确定	(20)
2.7 PUMA560 操作手的运动方程	(20)
2.8 PUMA560 操作手的解	(23)
2.9 改进的逆运动学解	(29)
2.10 用查表法减少运动学求逆时间	(30)
2.11 求逆过程的多 CPU 并行计算	(32)
2.12 运动学最优补偿	(35)
2.13 轮式移动机器人的运动学	(36)
2.14 参考文献	(52)
第三章 微分关系式	(53)
3.1 引 言	(53)
3.2 导 数	(53)
3.3 微移动和微转动	(54)
3.4 坐标架间微小变化的变换	(58)
3.5 变换式中的微分关系	(62)
3.6 操作手的雅可比矩阵	(62)
3.7 逆雅可比矩阵	(66)
3.8 操作手的奇异性鲁棒逆	(68)
3.9 轮式移动机器人的速度运动学	(72)
3.10 变换机器人速度	(74)
3.11 加速度运动学	(75)
3.12 小车轮的雅可比矩阵	(76)
3.13 紧凑机器人方程	(78)
3.14 天王星的雅可比矩阵	(84)
3.15 参考文献	(85)

第四章 动力学	(86)
4.1 引言	(86)
4.2 拉格朗日力学	(87)
4.3 操作手动力学方程	(87)
4.4 PUMA560 操作手的动力学	(97)
4.5 轮式移动机器人的动力学	(109)
4.6 参考文献	(113)
第五章 机器人轨迹规划	(115)
5.1 引言	(115)
5.2 轨迹规划的一般性问题	(116)
5.3 关节插值轨迹	(118)
5.4 笛卡儿路径轨迹规划	(132)
5.5 具有完整和非完整约束的移动机器人的轨迹规划	(138)
5.6 结构空间中移动机器人的平滑轨线规划	(147)
5.7 参考文献	(153)
第六章 机器人的控制	(155)
6.1 引言	(155)
6.2 PUMA 机器人手臂的控制	(156)
6.3 轮式移动机器人的运动控制	(158)
6.4 基于加速度误差的机器人学习控制	(161)
6.5 基于位置、速度、加速度误差的学习控制	(166)
6.6 机器人操作手的离散时间学习控制	(173)
6.7 基于小脑模型的机器人学习控制	(177)
6.8 移动机器人控制	(203)
6.9 具有导向轮的移动机器人控制	(224)
6.10 多体移动机器人的非线性控制	(231)
6.11 移动机器人的动力学控制	(235)
6.12 参考文献	(239)

第一章 概述

1.1 引言

自 1961 年第一台商用工业机器人问世已 32 年了。如果回溯到 1949 年第一台原子能应用的主—从遥控操作手问世则已 44 年。进入 70 年代中期以后,从应用角度看,这两类不同的机器人都得到了程度不同的巨大发展。尽管如此,国际学术界至今也没有对机器人作出统一公认的、文字严格的定义。不同的专家往往给以各有侧重的说法,不同的国家也往往沿用各自习惯的解释。

有一些描述可以看作对机器人的总括性的、理想化的定义。例如,日本早稻田大学加藤一郎认为:机器人是由能工作的手,能行动脚和有意识的头脑组成的一个整体,同时具有非接触传感器(相当于耳,目),接触传感器(相当于皮肤),固有感及平衡感等感觉器官和功能。但是,按照这种定义,当今世界上已有的机器人无疑都要受到求全责备,即使未来的机器人,恐怕也只须具备适应不同场合所必需的功能。

美国卡内奇—梅隆大学 R. Raddy 认为凡具有“思想、感知、动作”三种功能的机器就是机器人。美国国家标准局的 J. A. Simpson, J. A. Albus 等人则把凡具有“思想、感知、决策、行动的系统都称为机器人系统”。中国学者蒋新松认为“机器人作为一种具有拟人功能的机械电子装置”。也有一些学者针对不同形式的机器人分别给以具体解释的定义,而机器人则是一种总称。

按照机器人从低级到高级的发展程度,一般认为有三代机器人。

第一代机器人,主要指只能以“示教—再现”方式工作的机器人。示教内容为机器人操作机构的空间轨迹、作业条件、作业顺序等。示教方法或是操作员“手把手”地直接做,或是与计算机编程相结合。目前国际上商品化、实用化的机器人大都属于第一代机器人。

第二代机器人具有一定的感觉装置,能获取作业环境、操作对象的简单信息,通过计算机处理、分析,机器人作出一定的推理,对动作进行反馈控制,表现出低级的智能。由于信息处理系统的庞大与昂贵,第二代机器人目前只有少数可以普及应用。

第三代机器人是指具有高度适应性的自治式机器人。它具有多种感知功能,可进行复杂的逻辑思维,判断决策,在作业环境中独立行动。第三代机器人与第五代计算机关系密切,目前都处于实验探索阶段。

在过去 20 多年间,机器人学已发展成为很成熟的一门学科,但研究和开发工作主要集中在固定的操作手方面,这主要是它们的工业应用。针对移动机器人的工作做得很少。尽管步行运动已研究过,但已制造和开发的移动机器人中大多数采用轮式运动,轮式移动机器人在坚硬、光滑的地面上较步行机器人更有优势。轮式移动机器人(Wheeled Mobile Robot)和自动导向小车(Automated Guided Vehicle)将是广泛的商业应用方面的第一类移动机器人。因为现在的工业环境中是光滑、坚硬的地面,可以自动跟踪由反射磁带、油漆或埋设线所标明的路径的轮式运输车已经得到了工业应用。WMR 在外层空间和海底勘探,核与爆破处

理,仓库、安全、农业、机械、军事、教育,残疾人活动和个人机器人等方面得到了应用。

WMR 的研究主要集中于完成智能任务的移动平台方面,而对分析、设计和控制移动子系统方法的研究却较少。已改进的机械设计和移动控制系统将使 WMR 应用在非结构环境中自动移动机器人操作。运动学方法是达到这些目标的第一步。即使固定的操作手的建模和控制方法能应用到 WMR,但 WMR 与操作手之间却有很多固有差别,例如:

(1) WMR 包含多重闭合杆件链,而固定的操作手只有在接触固定的物体时才形成闭合链。

(2) 轮与地平面之间接触是线点接触的对偶关节,而固定的操作手只含有共面接触的对偶关节。

(3) WMR 的每个轮只有某些自由度被驱动,而固定的操作手每个关节的所有自由度都被驱动。

(4) WMR 的轮只有某些自由度有位置和速度传感器,而操作手每个关节的所有自由度都有位置和速度传感器。WMR 需要一种与静态操作手相似的建模、分析和设计方法。

1.2 工业机器人

工业机器人是一种计算机控制的通用操作手,它由几根用旋转或棱柱形关节串联的刚性杆件组成,这个杆件链的一端固定在支撑基座上,而另一端是自由的,可安装工具操作工件或完成装配作业。关节的动作产生杆件的相应动作。从机械上看,机器人由手臂(Arm)、手腕(Wrist)部件和工具(Tool)组成并将它设计成能伸到工作范围内的工件上。工作范围是机器人起作用的球状区,其手臂能把手腕部件放到球状区域内的任意点。手臂部件通常可以三个自由度运动。运动的合成使手腕部件工作处定位。手腕部件通常包括三种旋转运动。这些运动的合成,使工具根据物体的外形定向,以便易于抓取。最后三种运动通常称为俯仰(Pitch)、倾斜(Roll)和偏转(Yaw)。因此,对于一台六关节机器人来说,手臂部件是定位机构,而手腕部件是定向机构。这些概念可用图 1.1 所示的 Cincinnati Milacron 公司的 T3 机器人和图 1.2 所示的 Unimation 公司的 PUMA 机器人来说明。

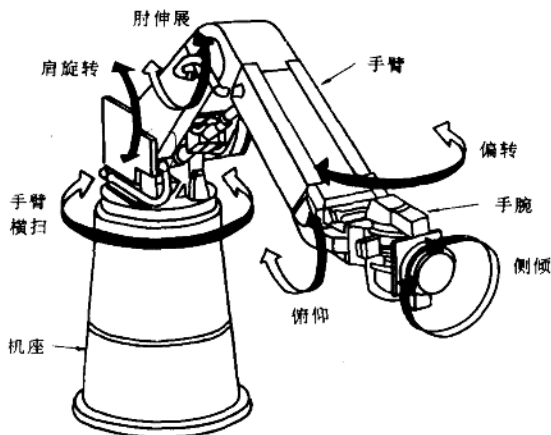


图 1.1 Cincinnati Milacron 公司 T3 机器人手臂

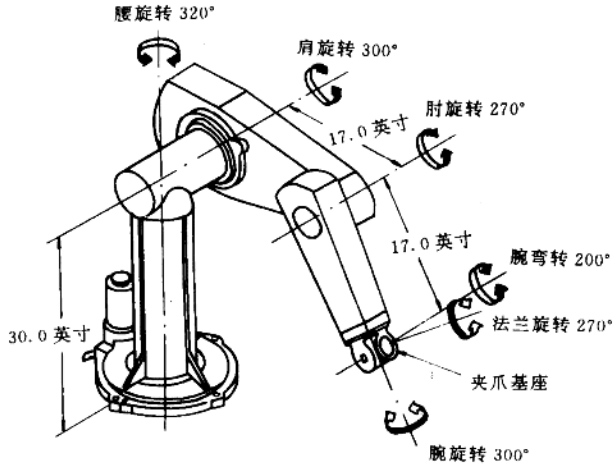


图 1.2 Unimation 公司的 PUMA 机器人

当今大多数的工业机器人尽管由小型和微型计算机控制,但基本上还是简单的定位机器。它们再现预先记录或预先编程的运动来执行给定的任务,而使用者则用便携式示教盒对运动预先进行引导或示教。此外,这些机器人只装有少量的或根本不装用于获得机器人工作环境的重要信息的外部传感器。这就是说,机器人主要用来完成一些比较简单的重复性工作。

工业机器人是一类根据预先编制在存储装置内的操作程序,自动地重复进行作业的机器人,因而也称重复性机器人。它实际上就是前面所说的第一代机器人,少数工业机器人兼有第二代机器人的特征。

1.2.1 系统构成

工业机器人的系统构成如图 1.3 所示。

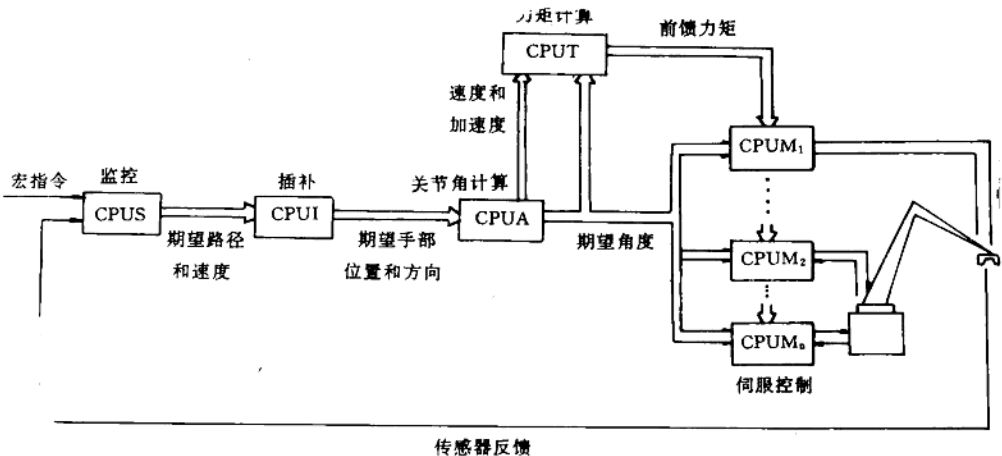


图 1.3 工业机器人的系统构成

工业机器人的本体主要是一只类似于人的上肢的机械手臂,或者是无关节结构,或者是关节结构。如果要在三维空间对物体进行作业,一般需要六个自由度,即沿笛卡尔坐标三轴的直线移动及围绕这三个轴的转动。

早期的工业机器人的示教、记忆、控制装置利用凸轮、挡块、插销板、穿孔纸带、磁鼓、继电器等机电元件构成,而 80 年代的工业机器人则主要使用微处理机系统综合实现上述装置的功能。

驱动装置最为普遍的是伺服电机,大型作业的机器人往往使用液压传动。较为简单的或要求防爆的机器人可采用气动执行机构。

工业机器人的传感器包括外部信息传感器和内部信息传感器。外部信息传感器用以检测、判断工作对象的位置、形状、接触状态等,例如从各种原理的接触开关到完善的视觉、触觉处理系统。内部信息传感器是指机器人驱动系统中的反馈控制信号检测元件。

1.2.2 控制方式

工业机器人的工作过程亦如图 1.3 所示。在使用机器人以前,操作人员通过示教装置把作业内容编成程序,输入到记忆装置。在从外部给出启动命令后,机器人从记忆装置中读出信息,并送到控制装置,发出控制信号,由驱动机构控制操作手按照记忆装置中的内容完成给定的动作。如果再次启动,机器人重复上述作业。

由此看出,工业机器人的控制方式与传统的自动机械的最大区别在于采用了“示教—再现”方式,因而表现出通用、柔软、灵活等特点。在这种控制方式下,工业机器人的控制过程分为四步:示教—存储—再现—操作。

1. 控制信息

机器人控制中必须有三种信息。

顺序信息,即机器人各种单元动作的先后次序。其中包括机器人对外围设备(如传送带、焊接机等)作业条件的检测、设定等步骤。

位置信息,即机器人应到达作业空间各点的坐标值,其中包括手爪在到达点上的姿态。

时间信息,即机器人各顺序所用的时间,这也可表示为机器人完成各动作的速度。

控制过程中的示教、存储和再现都围绕这三种信息进行。

2. 示教、存储和再现

示教是为了使机器人按照人的要求进行操作,由人把控制信息分散地或集中地输入到机器人中的过程。示教方法有两种,一种是直接示教方式,即操作人员直接带动机器人的手臂依次通过预定的轨迹,或使用示教臂或示教板引导机器人通过预定的路径,这时顺序、位置和时间三种信息可以做到综合示教。另一种是间接示教方式,即操作人员通过操作手动控制盒上的按键,编制机器人的动作顺序。确定位置、设定速度或限时。这种方式中三种信息的示教一般是分离进行的。在计算机控制的情况下,用特定的语言编制示教程序,实际上也是一种间接示教方式,其中位置信息往往仍需要通过手动控制盒设定。

存储是指在必要的期限内保存示教的信息。存储容量的大小决定机器人完成作业的复杂程度。存储方式也分为分离存储与集中存储两种。集中存储控制信息适用于存储大量的复杂作业。分离存储方式可将三种控制信息单独存放在不同的装置里,它要求分离示教,这使示教复杂,但便于再现时灵活组合控制信息。

再现是指根据需要读出存储信息,向执行机构发出具体指令。相应于集中存储方式,再现时只是“原样照搬”。而对于分离的存储方式,再现时就可根据外部传感器的输出信号或通过人工干预改变动作顺序,这使机器人对于工作环境的变化具有一定的适应性。

操作是指根据再现时所发出的一条条指令,驱使机器人的各个自由度产生相应的动作,最终使机器人手爪从空间一点移动到另一点。这里存在着如何实现机器人手爪的空间位置的控制问题。

3. 运动控制方式

机器人运动路径的控制可通过若干途径实现。四种常用方法为:连续路径、点到点、接点插补和可控路径运动,现依次介绍如下。

连续路径运动——CP(Continuous Path)

这种方式不仅要求机器人以一定的精度达到目标点,而且对移动轨迹型式有一定的要求。例如机器人进行喷漆,连续电弧焊作业就是这种情况。在这种示教方式中,示教者可以直接驱动机器人,或使用示教臂或示教板,引导机器人通过预期的路径,来编制这个运动程序。控制器按一定的时间增量,记下机器人的有关位置。CP方式要求示教的各位置点必须是连续的,因而也比较麻烦,示教效率低,因此大多数工业机器人实际上采用点位(PTP)示教。

点位运动方式——PTP(Point to Point)

这种方式只关心起始点和目标点的位置,而不考虑两点间的移动路径。于是,机器人的运动轨迹就取决于各个自由度在移动到目标点的过程中所采取的动作形态。PTP控制比较简单,适用于上下料、点焊、搬运等作业。

点到点编程方法应包括如下内容:示教时要使用控制手柄或控制按钮分别移动各个坐标,使机器人臂部到达每个点。在预定的位置上,按下编程按钮,存储该点的位置信息。从空间上看,点的输入可以密一些,也可以疏一些。在标准的点到点控制中,当再现或自动操作时,所有坐标皆以最高速度互不相关地,或以所谓“竞赛”模式运动。哪个坐标移动距离最短,就会第一个到达终点,然后等待其它坐标。这样在点间形成的路径很不容易预料。

接点插补运动——JI(Joint Interpolated)

改进的点到点或接点插补运动是为实现平稳运动而设计的。各点的编程方式与前述方法相似。但当自动再现时,每个坐标速度皆被调节。在这种“比例”模式中,要求移动最远的坐标,以最高速度运动。其余坐标以成比例的较低速度运动,以便所有坐标同时到达终点。这个动作比“竞赛”模式配合得好一些,但路径仍然不易预料。

可控路径运动——CTP(Controllable Path)

可控路径运动仍用离散点编程。但点间运动为可以控制的路径。中间各点依照直线路径计算决定。这就牵扯到在给定机器人的基坐标与关节角度坐标之间的计算。例如,编程点可用关节角或基坐标存储。但为了插入各中间点,最简单的计算是用基坐标进行,而指令信息还要用关节坐标,故需坐标变换。这个计算工作既可以脱机进行而后存储以供机器人再现,也可以联机进行,联机计算可使机器人的控制具有最大的灵活性。

4. 机器人控制层次

机器人的整体控制是一包括拟定对策、计划路径、集成传感器信息、位置指令和驱动信号的复杂问题。简化此类问题的一个方法是依层次方法把它分为若干层。分层过程中,处于低层的成组作业,以成组形式传给更高层次。

第一层控制接受接点位置指令,给机器人的接点驱动器以驱动信号。这类控制回路通常有来自位置和速度指示器的反馈,以肯定接点运动是可控制的和稳定的。可用模拟、数字或混合电路组成第一层控制器。稳定性、速度和重复定位精度是关键的设计指标。

第二层控制接受如“MOVE TO (x,y,z)”形式的输入指令,且把这个综合指令翻译成独立的接点位置指令。然后把这些指令传给第一层控制。如传来一“GRASP ONE OBJECT”指令则由末端执行器(End-Effector)来的触觉或力反馈,可传至第二层控制器,以鉴别抓取是否已经实现。还可用近程传感器以改变手爪的趋近速度。第二层和更高层控制的翻译特性通常必须用数字控制器才能实现。有外部传感器接口,能翻译指令,是第二层控制的特点。

第三层控制把较高层的指令分解为第二层控制要求的独立动作。例如,指令“MOVE TO (x,y,z) AT VELOCITY v METERS/SECOND, DECELERATE AT a METERS/SECOND² FROM OBJECT, GRASP UNTIL FORCE EQUALS w KILOGRAMS”,必须分成运动指令、定位指令和抓取指令。为执行这个指令具有从接点位置和速度传感器、近程传感器和触觉力传感器发展来的反馈信息。

还可构造更高层的控制。每提高一层,即可执行更复杂的指令,接受更高层传感信息,并向较低层的控制器传送指令。例如在执行上述指令时,必须知道抓取物体的位置和方位。

这些信息可由视觉传感器确定。如要抓取的不止一种物体,还必须辨明零件种类。另外,该零件与其它物体,以及周围环境的关系也必须确定。如该物体被其它物体覆盖,则在抓取该零件之前,还要移开障碍物。

位置指令也需较高层的控制。如环境中存在障碍,必须确定一个避开的对策。如果一个路径已经给定,需要核校它能否实现。如路径尚未给定,即需要确定一个。即使更高层的控制,只需从人那里得到一个极简单的指令,如“MAKE A CAR”,即可接受并发出所有较低层的指令,也可望实现。然而,在这样一个系统成为现实之前,还需要作大量的研究工作。

1.3 移动机器人

轮式移动机器人和自动导向小车已用于物资处理的自动化工厂,它们同样可用于例如核辐射和易爆炸物的处理及安全和医疗、家庭服务的其它领域。这些小车需要跟踪某种轨迹,例如反射式带、涂漆或埋导线。另外,它们也可用存在它们的计算机内存中的路线地图。尽管 AGV 已用了很长时间,但很少有文献对它们的系统进行研究。

轮式移动机器人有传统型轮、全方位型轮和球型轮,下面我们分别简要描述传统型轮和全方位型轮移动机器人。

1.3.1 传统型轮移动机器人

传统型轮移动机器人使用直流电机驱动轮,它在步进电机的作用下,同样绕垂直轴旋转。在后轴上的两个其它的独立轮起稳定作用,尽管驱动轮装有光学码盘用于位置反馈,但利用这种驱动结构达到可接受的路径的重复性是不可能的。

用于计算机控制的小车的设计频率由两个驱动轮组成,每个轮具有本身所控制的直流电机或步进电机,一个或两个自由转动的自位轮起稳定作用。移动机器人的设计如图 1.4 所示,两个装有减速齿轮和光学码盘的直流电动机驱动两个橡胶轮胎,构成小车的前轴。在后

轴,两个自由转动的自位轮提供静态稳定性。自位轮能在方向变化时引起滑动,另一个要考虑的是两个驱动轮之间的距离取决于小车的宽度。有下列理由相信两个驱动轮放置的距离越宽越好:

(1) 可以提高小车的静态或动态稳定性。

(2) 码盘分辨率对小车的方向误差的作用减少,这意味着假定小车静止,如果车轮之一转动一个正好处在码盘的分辨率单位之内的量,而另一个轮保持静止,那么小车将绕固定的轮转动而改变方向,这种现象的作用将由增加驱动轮之间的距离而减弱。

(3) 在直线运动中,机械的与电的干扰会使电机以不同的角速度运转,从而引起暂时弯曲的路径,在几何学意义上说弯曲路径的半径与驱动轮之间的距离成正比。

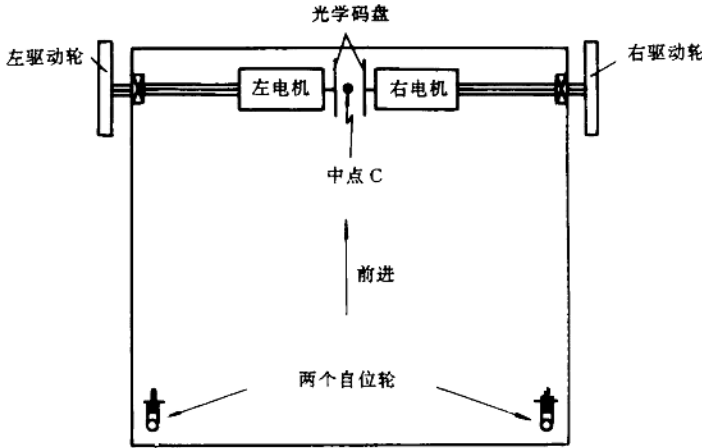


图 1.4 移动机器人结构

图 1.5 所示小车的控制器框图,对于每个电机,计算机输出一个 8 字节二进制的速度指令转换为模拟信号,被放大且用于驱动电机。光学码盘产生两个 90° 的移相脉冲序列供给定向读出电路,从而发出适当的脉冲序列给 4 字节的上-下计数器,计算器用作于一个缓冲器。因为码盘脉冲传递得比采样快,两个计数器在下一个码盘脉冲到达之前被同时采样和复位。当状态变化时为了避免计数器在瞬时读取由定向读出电路提供阻通信号。

光学码盘装在各自的电机轴上,它们的分辨率是一个脉冲代表 2mm 的驱动轮位移。几个机械上相互联接的微型开关装在小车周围,当碰到物体之前使小车停下来以及时避免碰撞。

控制器同样用一个操纵杆人工使小车定向(图 1.5 没有表示)。

控制算法用 FORTH 语言施加在成本低的个人计算机上,既不同于汇编程序语言中的写方法,也不在开发系统中使用高级语言和将目标码分配给任务计算机,使用 FORTH 语言有下列优点:

(1) FORTH 语言比汇编程序语言容易编写得多,且在大多数应用中仅只稍微慢些。

(2) 因为 FORTH 语言非常简洁,它可存在与所有辅助设备(即 ADC, DAC, I/O 接口,计时器)相联的任务计算机中。于是程序员仅给这些设备以查询方式指定地址。这对于消除

发生在软件和硬件设备之间的与信息系统有关的故障(排除计算机故障)是非常重要的。

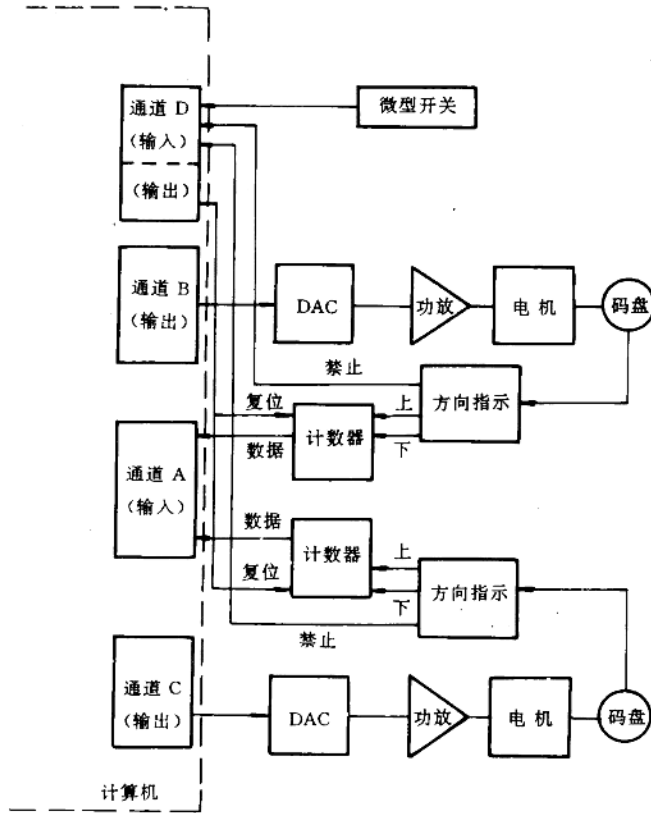


图 1.5 控制器硬件

1.3.2 全方位型轮移动机器人

天王星机器人是由美国卡内奇—梅隆大学移动机器人实验室设计的一个全方位型轮移动机器人(如图 1.6 所示)。

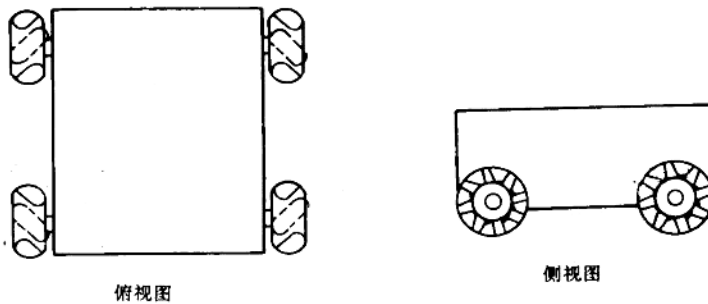


图 1.6 天王星的俯视图和侧视图

天王星机器人有四个装在直角架的角上的全方位轮。每个全方位轮由一个轮毂和十二个绕轮毂并与轮方向成 45° 角安装的滚轮组成。每个全方位轮有三个自由度。一个自由度与轮的方向相同,第二个自由度与滚轮转动的方向相同,第三个自由度是绕轮与地之间接触点的转动。

控制系统硬件由一个在车上的 Motorola 68000 控制处理器、电机、轴编码器和界面线路组成。每个轮的内轮毂由无刷直流电机驱动,它的位置由光学轴编码器检测。于是,每个轮的位置和速度通过界面电子线路供给控制处理器。界面电子装置同样处理无刷直流电机的电子整流和脉宽调制。控制处理器仅需要计算轮电机速度,期望的机器人位置轨迹从独立的不在车上的处理器传递到控制处理器,给每个轮组合制造了刚性的支承机构,天王星的硬件结构接近完善。

1.4 参考文献

- [1]付京逊 R. C. 冈萨雷斯 C. S. G. 李, 机器人学:控制·传感技术·视觉·智能,中国科学技术出版社,1989. 10
- [2]约翰 J·克雷格,苏仲飞,郭子正译,机器人学导论,西北工业大学出版社,1987. 10
- [3]儿尼 L·贺尔 贝蒂 C·贺尔,刘又午,彭泽民译,机器人学入门,天津大学出版社,1987. 11
- [4]Borenstein, J. and Y. Koren, "A Mobile Platform for Nursing Robots," IEEE Trans. Ind. Elect., IE-32, pp. 158-165, May 1985
- [5]Muir, P. F and C. P. Neuman, "Kinematic Modelling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1772-1778, 1987

第二章 机器人运动学

2.1 引言

机器人的操作手可用一个开环关节链来建模,此链由数个刚体(杆件)用以驱动器驱动的转动或移动关节串连而成。开链的一端固接在基座上,另一端是自由的,安装着工具(末端执行器),用以操纵物体,或完成装配作业。关节的相对运动导致杆件的运动,使手定位于所需的方位上。在很多机器人应用问题中,人们感兴趣的是操作手末端执行器相对于固定参考坐标系的空间描述。

机器人运动学主要是把机器人相对于固定参考系的运动作为时间的函数进行分析研究,而不考虑引起这些运动的力和力矩。也就是要把机器人的空间位移解析地表示为时间的函数,特别是要研究关节变量空间和机器人末端执行器位置和姿态之间的关系。本章将讨论机器人运动学的两个具有理论和实际意义的基本问题:

(1) 对一给定的操作手,已知杆件几何参数和关节矢量 $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))^T$, 其中 n 是自由度,求操作手末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态。

(2) 已知操作手杆件的几何参数,给定操作手末端执行器相对于参考坐标系的期望位置和姿态(位姿),操作手能否使其末端执行器达到这个预期的位姿? 如能达到,那么操作手有几种不同形态可满足同样的条件?

第一个问题常称为运动学正问题(直接问题),第二个问题常称为运动学逆问题(解臂形问题)。由于机器人手臂的独立变量是关节变量,而作业通常是在参考坐标系中说明的,因此要较频繁地用到运动学逆问题。表示两种问题关系的简单方框图示于图 2.1。

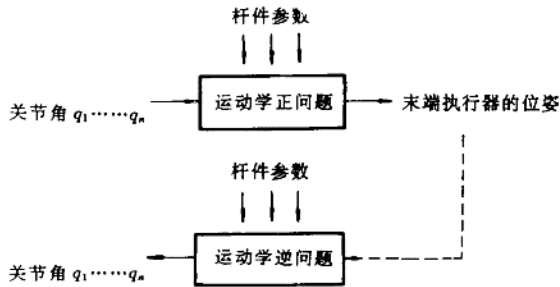


图 2.1 运动学正问题和逆问题

由于机器人各杆件可相对于参考坐标系转动和移动,末端执行器的空间总位移是由杆件的角转动和直线平移形成的。Denavit 和 Hartenberg^[1]提出了一种通用的办法,以矩阵代数来描述和表达操作手各杆件相对于固定参考系的空间几何学关系。此方法用 4×4 齐次变换矩阵描述相邻两刚性杆件的空间关系,把运动学正问题简化为寻求把“手部坐标系”与参

考坐标系联系起来的 4×4 等价齐次变换矩阵。这种齐次变换矩阵在推导机器人运动的运动学方程中也是很有用的。

一般来说,运动学逆问题可用几种方法求解。最常用的方法是矩阵代数法、迭代法或几何法。对于有转动关节的简单操作手,将介绍一种使用 4×4 齐次变换矩阵的更为一般的方法,用以求得一些简单操作手的关节变量解。

2.2 齐次变换

我们主要引用其它作者^{[2][3]}的一些结论作为以后研究的基础,这一节我们主要简洁地介绍移动变换,转动变换,一般转动变换,等效的旋转角这些内容。详细的推导请参考文献[2][3]。

2.2.1 移动变换

相应于用向量 $ai + bj + ck$ 表示的移动变换 H 是

$$H = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2.2.2 转动变换

相应于绕 x , y 或 z 轴转过角度 θ 的变换是

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.3 一般转动变换

我们已说明了绕 x , y 和 z 轴旋转的转动变换(式(2.2), (2.3)和(2.4))。这些变换都有一个简单的几何解释。例如,在绕 z 轴转动的情况中,表示 z 轴的那一列将保持不变,而表示 x 和 y 轴的列元素将如图 2.2 所示变化。

现在我们将研究绕原点的任意向量 k 转动的变换矩阵。对这一问题的完整讨论见文献

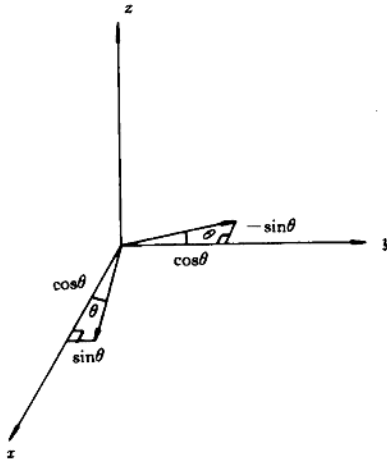


图 2.2 绕 z 轴转动

求解得

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{T} \quad (2.9)$$

绕 \mathbf{k} 转动 \mathbf{T} 即相当于绕坐标架 \mathbf{C} 中 z 轴而转动 \mathbf{X}

$$\text{Rot}(\mathbf{k}, \theta)\mathbf{T} = \mathbf{C}\text{Rot}(z, \theta)\mathbf{X} \quad (2.10)$$

$$\text{Rot}(\mathbf{k}, \theta)\mathbf{T} = \mathbf{C}\text{Rot}(z, \theta)\mathbf{C}^{-1}\mathbf{T} \quad (2.11)$$

于是

$$\text{Rot}(\mathbf{k}, \theta) = \mathbf{C}\text{Rot}(z, \theta)\mathbf{C}^{-1} \quad (2.12)$$

但我们仅知 \mathbf{k} , 坐标架 \mathbf{C} 的 z 轴。展开式(2.12), 我们将发现 $\mathbf{C}\text{Rot}(z, \theta)\mathbf{C}^{-1}$ 仅仅是 \mathbf{k} 的函数。

在 $\text{Rot}(z, \theta)$ 右边乘上 \mathbf{C}^{-1} , 我们得到

$$\begin{aligned} \text{Rot}(z, \theta)\mathbf{C}^{-1} &= \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & 0 \\ o_x & o_y & o_z & 0 \\ a_x & a_y & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} n_x\cos\theta - o_x\sin\theta & n_y\cos\theta - o_y\sin\theta & n_z\cos\theta - o_z\sin\theta & 0 \\ n_x\sin\theta + o_x\cos\theta & n_y\sin\theta + o_y\cos\theta & n_z\sin\theta + o_z\cos\theta & 0 \\ a_x & a_y & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13) \end{aligned}$$

前面乘以

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

[4]。为此, 我们设想 \mathbf{k} 是坐标架 \mathbf{C} 的 z 轴单位向量

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{k} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \quad (2.6)$$

则绕向量 \mathbf{k} 的转动相当于绕坐标架 \mathbf{C} 的 z 轴的转动。

$$\text{Rot}(\mathbf{k}, \theta) = \text{Rot}(z, \theta) \quad (2.7)$$

如果我们给出用参考坐标架描述的坐标架 \mathbf{T} , 我们就能够找到一坐标架 \mathbf{X} 以描述相对于坐标架 \mathbf{C} 的同一坐标架, 即

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}\mathbf{X} \quad (2.8)$$

式中 \mathbf{X} 描述 \mathbf{T} 相对于坐标架 \mathbf{C} 的位置。对 \mathbf{X}

