

机器人学 课程教案

授课时间	第 15 周 第 15 节	课次	2
授课方式 (请打√)	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 讨论课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时 安排	2
授课题目（教学章、节或主题）： 第 7 章 工业机器人轨迹规划与编程 7.1 工业机器人轨迹规划 7.2 关节空间法 7.3 直角坐标空间法 7.4 轨迹的实时生成 7.5 工业机器人编程 7.6 工业机器人编程语言 7.7 工业机器人离线编程			
主要教学方法 与手段	教学方法：启发式教学、实例引导法教学 教学手段：板书+多媒体		
本课次教学目的、要求（分掌握、熟悉、了解三个层次）： 1、了解工业机器人轨迹规划的概念 2、了解工业机器人编程方式、编程语言			
教学重点及难点： 重点：工业机器人轨迹规划的概念；工业机器人编程 难点：工业机器人编程			
教学基本内容及过程			
7.1 工业机器人轨迹规划			
7.1.1 机器人轨迹规划的概念 机器人的轨迹规划是指根据机器人作业任务的要求（作业规划），对机器人末端操作器在工作过程中位姿变化的路径、取向及其变化速度和加速度进行人为设定。 轨迹规划器具有简化任务描述的功能，用户不需要写出进行某指定作业的运动轨迹函数表达式，只要求输入有关路径的若干约束及其简单描述。至于规划的细节问题则由系统本身去完成。 轨迹规划涉及下面三个问题： 1、要对机器人的任务进行描述，即对机器人的运动轨迹进行描述。			

2、根据所确定的轨迹参数，如何在计算机内部描述所要求的轨迹。这主要是选择习惯规定以及合理的软件数据结构问题。

3、对内部描述的轨迹进行实际计算。通常是在运行时间内按一定的速率计算出位置、速度和加速度，生成运动轨迹。

7.1.2 轨迹规划的一般性问题

工业机器人的作业可以描述成工具坐标系 $\{T\}$ 相对于工作坐标系 $\{S\}$ 的一系列运动：

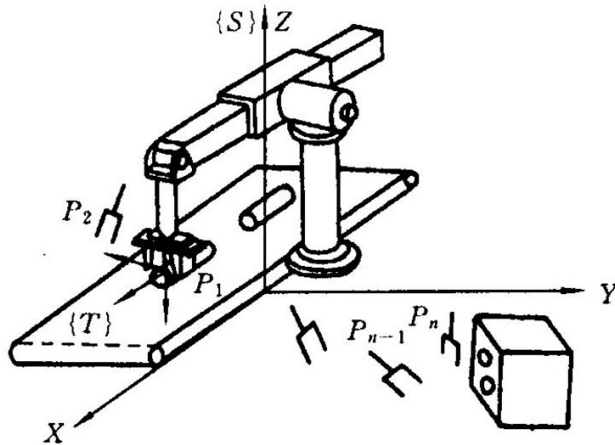


图 7-1 作业的描述

把作业路径的描述与具体的机器人、手爪或工具分离开来，形成了模型化的作业描述方法。从而使这种描述既适用于不同的机器人，也适用于同一机器人上装夹不同规格的工具。

机器人从初始状态运动到终止状态的作业，看成是工具坐标系从初始位置 $\{T_0\}$ 变化到终止位置 $\{T_f\}$ 的坐标变换。变换包含了工具坐标系的位置和姿态的变化。在轨迹规划中，也常用“点”这个词来表示机器人的状态，或用它来表示工具坐标系的位姿。当需要更详细地描述运动时，不仅要规定机器人的起始点和终止点，而且要给出介于起始点和终止点之间的中间点，也称路径点。

7.1.3 轨迹的生成方式

运动轨迹的描述或生成有以下几种方式：示教-再现运动；关节空间运动；空间直线运动；空间曲线运动。下面简单介绍关节空间的轨迹规划和直角坐标空间的轨迹规划。

1、关节空间的轨迹规划

在关节空间中进行轨迹规划是指将所有关节变量表示为时间的函数，用这些关节函数及其一阶、二阶导数描述机器人预期的运动。

2、在直角坐标空间中进行轨迹规划，是指将手爪位姿、速度和加速度表示为时间的函数，而相应的关节位置、速度和加速度由手爪信息导出。

7.2 关节空间法

机器人作业路径点通常由工具坐标系 {T} 相对于工作坐标系 {S} 的位姿来表示，因此，在关节空间中进行轨迹规划：首先需要将每个作业路径点向关节空间变换，即用逆运动学方法把路径点转换成关节角度值，或称关节路径点；然后，为每个关节相应的关节路径点拟合光滑函数；这些关节函数分别描述了机器人各关节从起始点开始，依次通过路径点，最后到达某目标点的运动轨迹。由于每个关节在相应路径段运行的时间相同，这样就保证了所有关节都将同时到达路径点和目标点，从而也保证了工具坐标系在各路径点具有预期的位姿。

7.2.1 三次多项式插值

当已知末端操作器的起始位姿和终止位姿时，由逆向运动学，即可求出对应于两位姿的各个关节角度。因此，末端操作器实现两位姿的运动轨迹描述，可在关节空间中用通过起始点关节角和终止点关节角的一个平滑轨迹函数 $\theta(t)$ 来表示；为了实现关节的平稳运动，每个关节的轨迹函数 $\theta(t)$ 至少需要满足四个约束条件：两端点位置约束和两端点速度约束。

端点位置约束是指起始位姿和终止位姿分别所对应的关节角度：

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \end{cases}$$

为满足关节运动速度的连续性要求，在起始点和终止点的关节速度可简单地设定为零，即：

$$\begin{cases} \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases}$$

上述给出的四个约束条件可以唯一地确定一个三次多项式

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

运动过程中的关节速度和加速度则为：

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \\ \ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t \end{cases}$$

为了求得三次多项式的系数，代以给定的约束条件，有方程组

$$\begin{cases} \theta_0 = a_0 \\ \theta_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ 0 = a_1 \\ 0 = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{cases}$$

求解上述方程组，可得

$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ a_1 = 0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \end{cases}$$

所以，对于初速及终速为零的关节运动，满足连续平稳运动要求的三次多项式插值函数为

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0)t^2 - \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0)t^3$$

其关节角速度和角加速度表达式为

$$\dot{\theta}(t) = \frac{6}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0)t - \frac{6}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0)t^2$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{6}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{12}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0)t$$

三次多项式插值的运动轨迹曲线

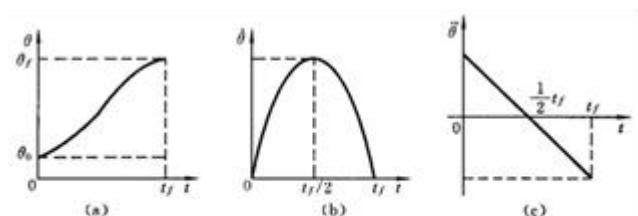
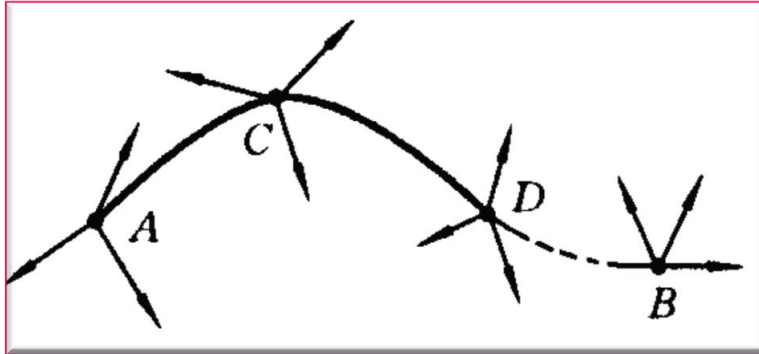


图 7-3 三次多项式插值关节运动轨迹

(a) 角位移-时间曲线；(b) 角速度-时间曲线；(c) 角加速度-时间曲线

7.2.2 过路径点的三次多项式插值

机器人作业除在 A、B 点有位姿要求外，在路径点 C、D…也有位姿要求。对于这种情况，假如终端执行器在路径点停留，即各路径点上速度为 0，则轨迹规划可连续直接使用前面介绍的三次多项式插值方法；但如果只是经过，并不停留，就需要将前述方法推广。



在某段路径上，“起始点”为 θ_0 和 ω_0 ，“终止点”为 θ_f 和 ω_f 。这时，确定三次多项式系数的方法与前面所述的完全一致，只不过是速度约束条件变为

$$\begin{cases} \dot{\theta}(0) = \omega_0 \\ \dot{\theta}(t_f) = \omega_f \end{cases}$$

利用约束条件确定三次多项式系数，有下列方程组：

$$\begin{cases} \theta_0 = a_0 \\ \theta_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ \omega_0 = a_1 \\ \omega_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{cases}$$

求解方程组

$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ a_1 = \omega_0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{1}{t_f}(2\omega_0 + \omega_f) \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\omega_0 + \omega_f) \end{cases}$$

路径点上的关节速度，可由以下任一规则确定：

如果机器人末端操作器在经过路径点时有速度要求，则可以利用此路径点上的逆雅可比矩阵，把该路径点的直角坐标速度转换成关节坐标速度。轨迹规划时则以此作为速度约束条件。

如果某个路径点是机器人的奇异点，即此点的逆雅可比不可求，这时就无法求关

节速度了。此外，在求各点关节速度时，要逐点计算逆雅可比矩阵，并依此计算关节速度，耗时较多。

7.3 直角坐标空间法（自学）

7.3.1 直角坐标空间描述

7.3.2 直角坐标空间的轨迹规划

7.4 轨迹的实时生成（自学）

7.4.1 关节空间轨迹的生成

7.4.2 直角坐标空间轨迹的生成

7.4.3 轨迹规划总结

7.5 工业机器人编程

机器人编程是指为了使机器人完成某项作业而进行的程序设计。

7.5.1 工业机器人编程方式

1、机器人语言编程

定义：采用专用的机器人语言来描述机器人的动作轨迹。

2、机器人编程方法三种形式：

（1）示教编程

示教编程是一项成熟的技术，它是目前大多数工业机器人的编程方式。采用这种方法时，程序编制是在机器人现场进行的。

操作者必须把机器人终端移动至目标位置，并把此位置对应的机器人关节角度信息记录进内存储器，这是示教过程。当要求复现这些运动时，顺序控制器从内存读出相应位置，机器人就可重复示教时的轨迹和各种操作，这是再现过程。示教编程又分为手把手示教和示教盒示教两种方式。

示教编程优点：只需要简单的设备和控制装置即可进行。操作简单，易于掌握。示教再现过程很快，示教之后马上即可应用。缺点：编程占用机器人的作业时间；很难规划复杂的运动轨迹以及准确的直线运动；难以与传感信息相配合；难以与其他操作同步；

（2）机器人语言编程

实现了计算机编程，并可以引入传感信息，从而提供一个更通用的方法来解决人一机器人通信接口问题。目前应用于工业中的是动作级和对象级机器人语言。

（3）离线编程

离线编程是在专门的软件环境支持下，用专用或通用程序在离线情况下进行机器人轨迹规划编程的一种方法。用通用语言或专门语言预先进行程序设计，在离线

的情况下进行轨迹规划的编程方法。离线编程系统是基于 CAD 数据的图形编程系统。由于 CAD 技术的发展，机器人可以利用 CAD 数据生成机器人路径，这是集机器人于 CIMS 系统的必由之路。

7.5.2 机器人编程语言

1. 机器人语言简介

早期的工业机器人，由于完成的作业比较简单，作业内容改变不频繁，采用固定程序控制或示教再现方法即可满足要求，不存在语言问题。

机器人本身的发展，计算机系统功能日益完善以及要求机器人作业内容愈加复杂化，利用程序来控制机器人显得越来越困难。编程过程过于复杂，使得在作业现场对付复杂作业十分困难。需要专用的机器人语言描述作业控制机器人的动作。

2. 机器人语言的分类

1、根据作业描述水平的高低，机器人语言可分为三级：动作级语言；对象级语言；任务级语言。

(1) 动作级机器人语言-VAL

以机器人手爪的运动作为作业描述的中心，用该级语言编写的作业程序，通常由使机器人手爪从一个位置到另一个位置的一系列运动语句组成。动作级机器人语言的每一条语句对应于一个机器人动作。缺点是不能够进行复杂的运算，仅能接受传感器的开关信号，并且与其他计算机通讯的能力差。

(2) 对象级机器人语言-AUTOPASS

以近似自然语言的方式，按照作业对象的状态变化来进行程序设计。以描述操作物体之间关系为中心的语言。它不需要去描述机器人手爪如何动作，只要由操作者给出作业本身的顺序过程的描述及环境模型的描述，机器人即可自行决定如何动作。有处理传感器信息的能力，可利用传感器信息来修改、更新环境的描述和模型，也可以利用传感器信息进行控制、测试和监督。对象级语言具有良好的开放性，用户可以根据应用的需要扩展语言功能。

(3) 任务级机器人语言

最理想的机器人高级语言，是用被操作物体，而不是机器人的动作来描述作业任务。使用者只要按某种原则给出作业起始状态和作业目标状态，机器人语言系统即可利用已有的环境信息和知识库、数据库自动进行推理、计算，最后自动生成机器人详细的动作、顺序和相应数据。须具有判断环境、描述环境的能力；同时，也必须有自动完成许多规划任务的能力。当发出一条“抓住螺钉”的指令时，这

种语言系统要能进行路径寻找规划，在复杂的环境中找到一条运动路径，沿此路径运动，机器人不会与周围任何障碍物发生碰撞，并能自动进行工件抓取规划，在螺钉上选取一个好的抓取位置，并把螺钉抓起。显然，任务级语言的构成是十分复杂的，它必须具有人工智能的推理系统和大型知识库。

2、按表面形式分：

- (1) 汇编型，如 VAL 语言；
- (2) 编译型，如 AI、LM 语言
- (3) 自然语言型，如 AUTOPASS 语言等；

3. 机器人语言的特征

机器人语言则包含语言本身、语言处理系统和机器人的工作环境模型三部分。其中机器人语言以程序的方式对机器人发出一系列控制命令，处理系统则将这些命令进行编译和解释，然后以机器人能接受的指令，控制机器人进行具体操作。环境模型是对机器人作业环境内的物体位置、姿态以及物体之间关系的表示。

7.5.3 机器人语言结构和基本功能

1、机器人语言结构

机器人语言实际上是一个语言系统，包括硬件、软件和被控设备。机器人语言操作系统包括三个基本的操作状态：监控状态、编辑状态和执行状态。

2、机器人语言的基本功能

- (1) 运算功能
- (2) 决策功能
- (3) 通信功能
- (4) 运动功能
- (5) 工具指令功能
- (6) 传感数据处理功能

7.6 工业机器人编程语言（自学）

7.6.1 VAL 语言

7.6.2 MOTOMAN 机器人编程语言

7.6.3 机器人语言编程的相关问题

7.7 工业机器人离线编程

7.7.1 离线编程的概念

机器人离线编程就是利用计算机图形学的成果，建立机器人及作业环境的三维几

何模型, 然后对机器人所要完成的任务进行离线规划和编程, 并对编程结果进行动态图形仿真, 最后将满足要求的编程结果传到机器人控制柜, 使机器人完成指定的作业任务。

离线编程可以看作动作级和对象级语言图形方式的延伸, 是研制任务级语言编程的重要基础。

7.7.2 离线编程系统的一般要求

工业机器人离线编程系统的一个重要特点是能够和 CAD / CAM 建立联系, 能够利用 CAD 数据库的资料。对于一个简单的机器人作业, 几乎可以直接利用 CAD 对零件进行建模和编程。

开放式机器人控制系统

竟中

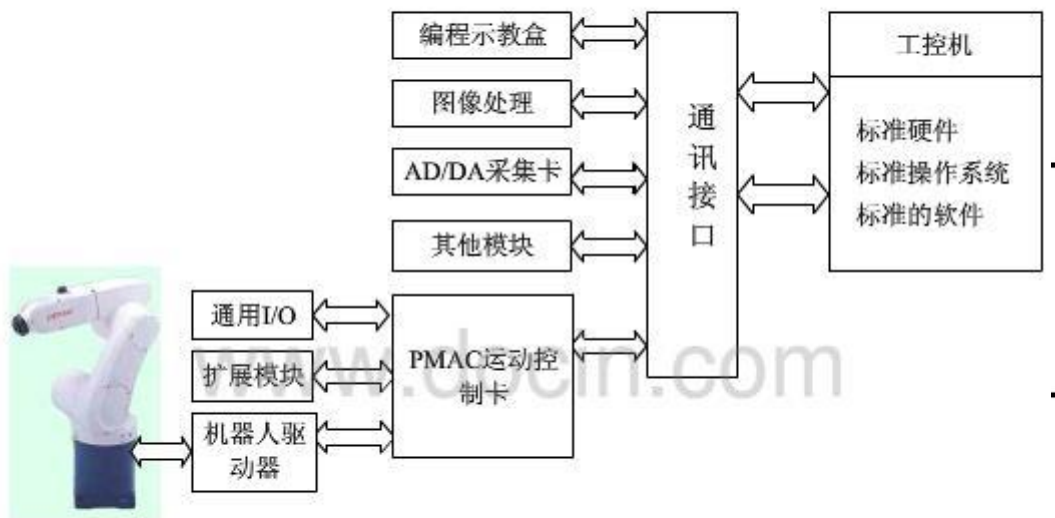


图 开放式机器人控制系统结构

作业和思考题:

什么是轨迹规划?

轨迹生成有哪几种方式?

工业机器人的编程方式有哪几种?

课后小结

工业机器人轨迹规划的概念及轨迹生成的几种方式;

工业机器人的编程方式;

机器人编程语言的分类、语言结构及基本功能。