

单元 1

认识工业机器人

一、任务描述

本单元主要介绍工业机器人的定义和分类、工业机器人的系统组成等知识，从基础开始认识工业机器人。

二、学习目标

知识目标：

1. 了解工业机器人的定义和分类；
2. 了解工业机器人的自由度；

技能目标：

1. 掌握工业机器人的系统组成；
2. 掌握工业机器人的外围设备；
3. 掌握工业机器人的插补运动。

三、知识储备

（一）工业机器人的定义和分类

1. 工业机器人的定义

国际标准化组织（ISO）对工业机器人的定义是：工业机器人是一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能操作机，这种操作机具有几个轴，能够借助可编程操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置，以执行各种任务。

机器人典型应用领域是工件搬运和工件处理（如喷涂、焊接）。

2. 工业机器人的分类

根据工业机器人关节的连接方式，工业机器人可以分为串联机器人和并联机器人。

1) 串联机器人

串联机器人由一系列连杆通过转动关节或移动关节串联连接，是一种以串联方式驱动的开环机器人。串联机器人每一个关节都由一个驱动器驱动，关节的相对运动导致连杆的运动，使机器人末端执行器到达一定的位置和姿态。串联运动链如图 1.1 所示。

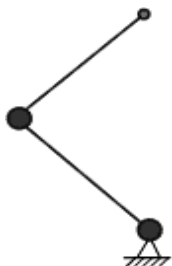


图 1.1 串联运动链

(1) 关节机器人

关节机器人（见图 1.2）仿照人的手臂来组合六个旋转关节，有时也被称为拟人机器人手臂。关节机器人由 2 个肩关节和 1 个肘关节进行定位，由 2 个或 3 个腕关节进行定向。其中，第一个肩关节绕铅直轴旋转，第二个肩关节实现俯仰，这两个肩关节轴线正交，肘关节平行于第二个肩关节轴线。关节机器人应用领域：复杂工件处理和复杂注塑。



图 1.2 关节机器人

(2) SCARA 机器人（平面关节型机器人）

SCARA 机器人（见图 1.3）的特点是具有水平安装的肘关节，它有 3 个旋转关节，其轴线相互平行，在平面内进行定位和定向；还有一个关节是移动关节，用于完成末端件垂直于平面的运动。SCARA 机器人结构轻便、响应快，运动速度比一般关节机器人快数倍，它在 X 、 Y 方向上具有顺从性，而在 Z 轴方向具有良好的刚性，这些特性特别适用于平面定位、在垂直方向进行装配作业。例如，利用 SCARA 机器人将一个圆头针插入一个圆孔。SCARA 机器人大量用于装配印制电路板和电子零部件。



图 1.3 SCARA 机器人

(3) 直角坐标机器人

直角坐标机器人（见图 1.4）由 X 、 Y 、 Z 三个方向的直线运动关节组成，其末端执行器能够沿着 X 、 Y 、 Z 轴做线性运动。应用领域：简单搬运任务，例如分拣和放置。



图 1.4 直角坐标机器人

(4) 圆柱坐标机器人

圆柱坐标机器人（见图 1.5）由两个移动关节和一个转动关节组成，作业范围为圆柱状。其特点是位置精度高、运动直观、控制简单、结构简单、占地面积小、价廉，因此应用广泛。但，圆柱坐标机器人不能抓取靠近立柱或放置于地面上的工件，与其他工业机器人协调工作比较困难。

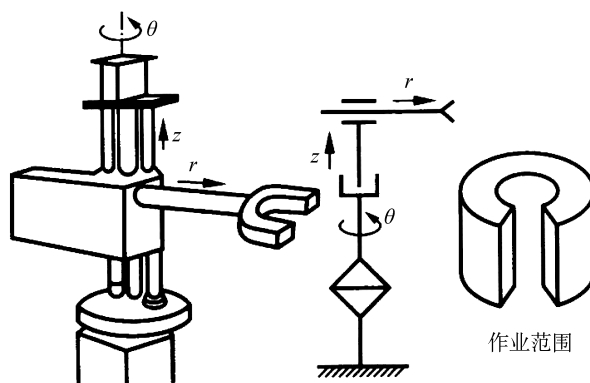


图 1.5 圆柱坐标机器人

(5) 球坐标机器人

球坐标机器人（见图 1.6）由一个移动关节和两个转动关节组成，作业范围为空心球体状。其特点是结构紧凑、动作灵活、占地面积小，能上下俯仰地抓取地面上或较低位置处的工件；但其结构复杂，运动直观性较差，定位精度尚可，位置误差与臂长成正比；能与其他工业机器人协调工作。

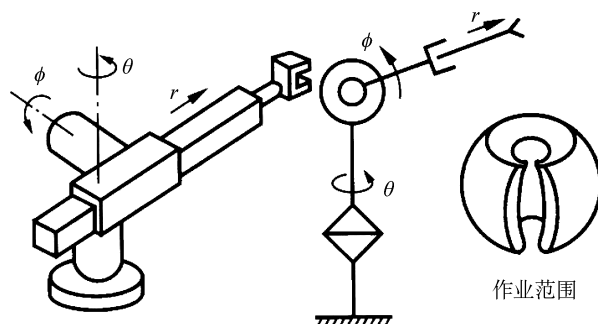


图 1.6 球坐标机器人

2) 并联机器人

并联机器人的运动平台和固定基座间通过至少两个独立的运动链并联连接，是一种以并联方式驱动的闭环机器人。并联机器人只在基座关节上使用驱动器。并联运动链如图 1.7 所示。

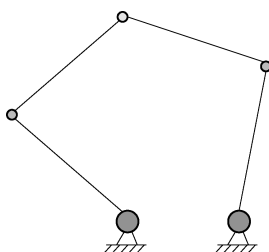


图 1.7 并联运动链

并联机器人常见的是 Delta 机器人（见图 1.8）。Delta 机器人有 3 个旋转运动关节安装在基座上，运动平台通过并联机构与关节连接，并联机构中的双杆连接保证了运动平台只能平移，不能旋转。



图 1.8 Delta 机器人

（二）工业机器人系统的组成

工业机器人系统由机器人本体、控制器、示教器以及各部分的连接线组成，如图 1.9 所示。

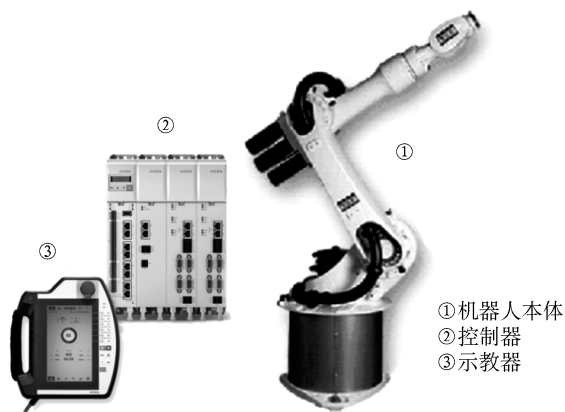


图 1.9 工业机器人系统

1. 机器人本体

对于 6 关节机器人的本体，J1（肩部）、J2（大臂）、J3（小臂）的运动主要是改变机器人的位置，称为 base joints（基本关节）；J4、J5、J6（腕部）的运动主要是改变机器人的方向姿态，称为 wrist joints（腕关节），如图 1.10 所示。

机器人腕部主要用于调整方向姿态。为此，根据所需的自由度，最多需要 3 个腕关节。腕关节最普遍的结构是一个球形手，所有关节轴在一个点上相交，如图 1.11 所示。

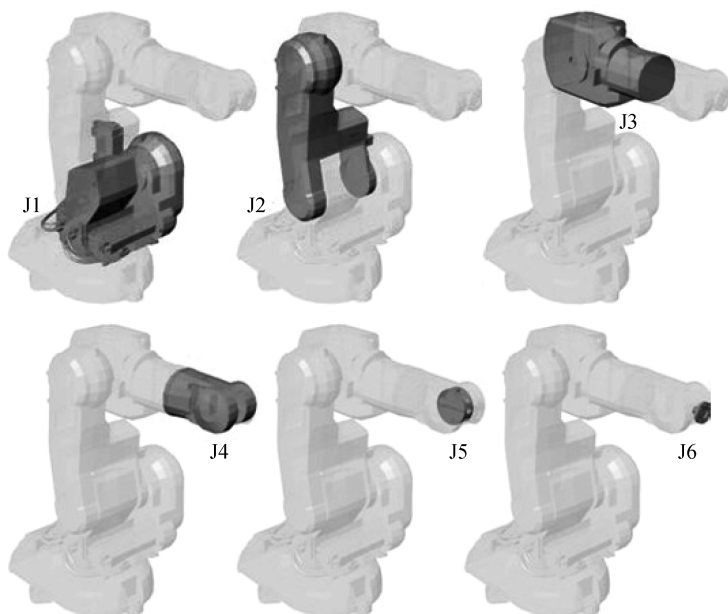


图 1.10 6 关节机器人的本体

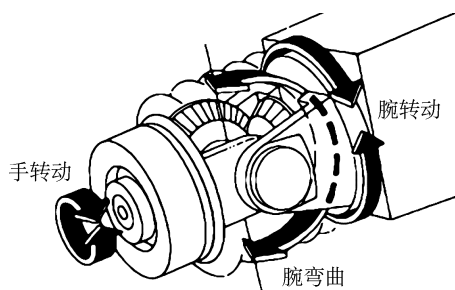


图 1.11 腕关节

2. 机器人控制系统

KeMotion 是 KEBA 公司提供的机器人控制系统,主要包括硬件部分 KeDrive for Motion (控制器和驱动器)、KeTop (人机界面) 和软件部分 KeStudio (配置、诊断、编程环境), 如图 1.12 所示。

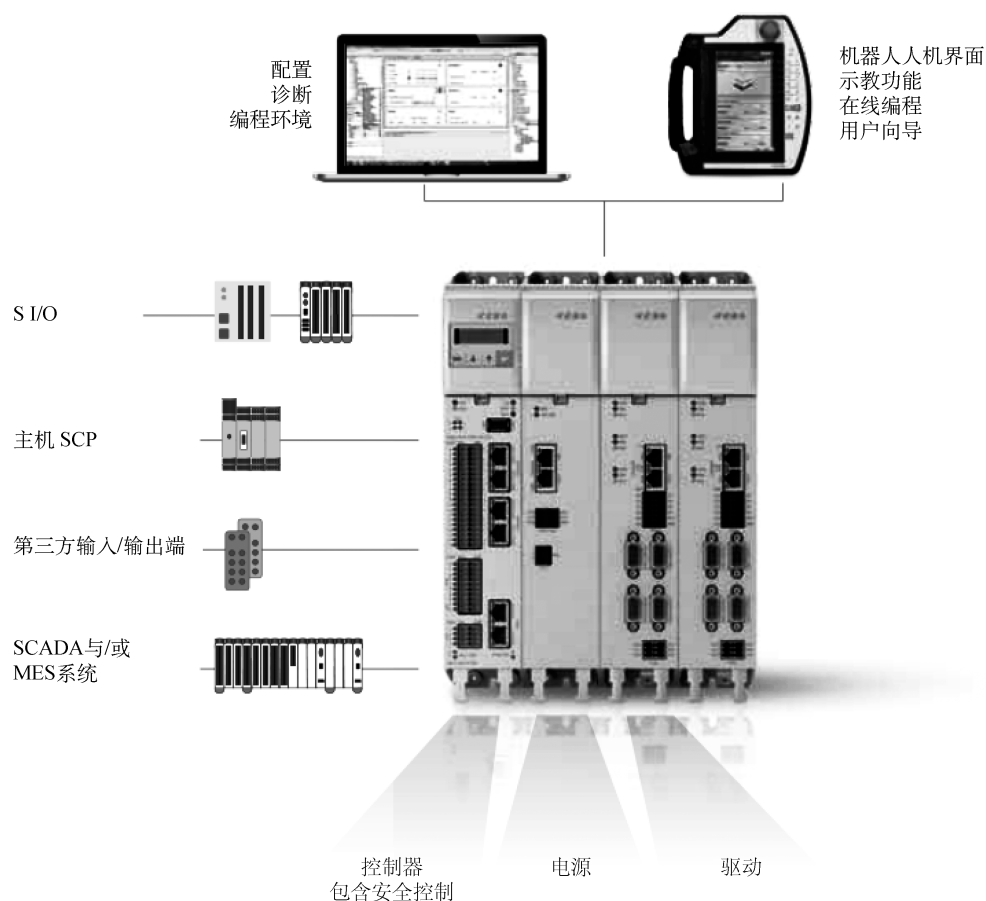


图 1.12 机器人控制系统 KeMotion^①

^① SCP 是一种用于本地机器和远端机器之间的通信协议, 控制器可通过 SCP 协议与上位(主)机通信; SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 即数据采集与监视控制系统, 涉及组态软件、数据传输链路; MES (Manufacturing Execution System) 即制造企业生产过程执行系统, 是一套面向制造企业车间执行层的生产信息化管理系统。

（三）工业机器人的外围设备

所有不包括在工业机器人系统内的设备都被称为外围设备。常用的外围设备有机器人行走轴、变位机、机器人工具、保护装置输送带、传感器、机器等。

1. 机器人行走轴

机器人行走轴也叫机器人第七轴（见图 1.13），即机器人本体轴数之外的一轴。它既是机器人基座，机器人安装在定制的安装板上，同时还能够让机器人在指定的路线上进行移动，从而扩大机器人的作业半径，扩展机器人使用范围，提高了机器人的使用效率。



图 1.13 机器人行走轴

2. 变位机

变位机（见图 1.14）的主要功能是将工件翻转、倾斜、回转变位，以得到理想的加工位置和速度。例如，某些工件的焊缝要求不间断 360° 焊接，只使用焊接机器人焊接较难实现，与变位机配套使用便可以得到最佳的焊缝位置和焊接速度。

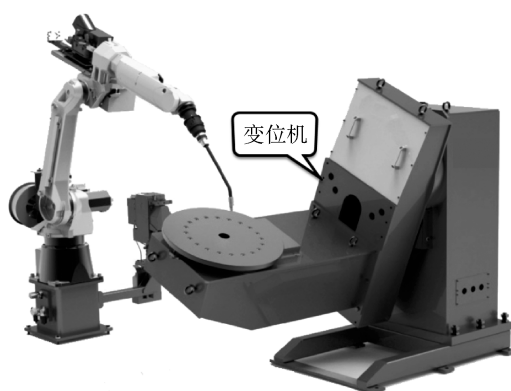


图 1.14 变位机

3. 机器人工具

机器人工具是机器人直接用于抓取和握紧（或吸附）工件或夹持专用工具（如喷枪、扳手、焊接工具）进行操作的部件，它具有模仿人手动作的功能，并安装于机器人手臂的

末端，也称为机器人末端执行器。

1) 夹爪式工具

夹爪式工具如图 1.15 所示。

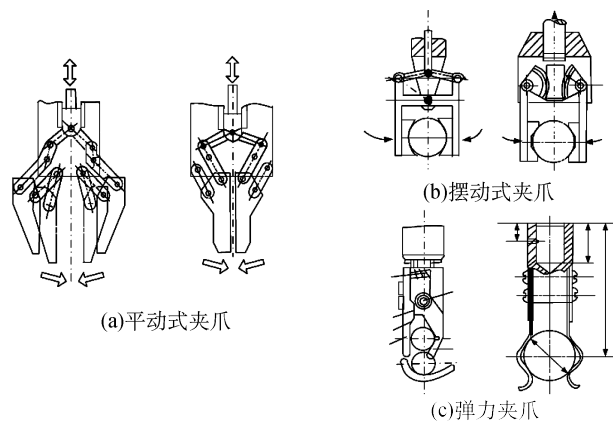


图 1.15 夹爪式工具

2) 吸附式工具

(1) 气吸附式工具

气吸附式工具（见图 1.16）是利用吸盘内的真空度吸取工件的，可分为真空吸附、气流负压气吸附、挤压排气负压气吸附等几种。



图 1.16 气吸附式工具

(2) 磁吸附式工具

磁吸附式工具（见图 1.17）是利用电磁铁通电后产生的电磁吸力吸取工件，因此只能对铁磁物体起作用。

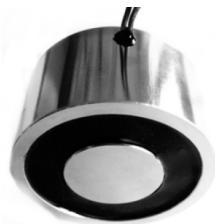


图 1.17 磁吸附式工具

3) 专用工具

专用工具如图 1.18 所示。

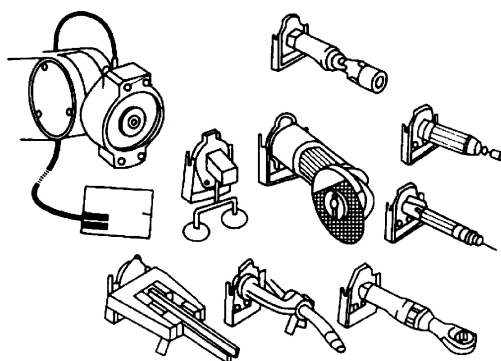


图 1.18 专用工具

4) 快换工具

快换工具（见图 1.19）可以让机器人快速换接不同工具，提高了机器人的柔性生产能力和生产效率。

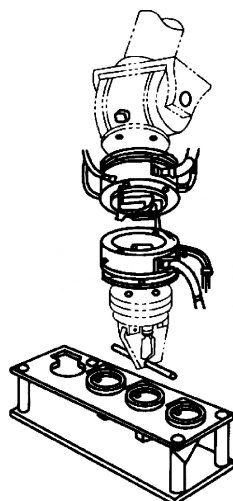


图 1.19 快换工具

（四）工业机器人的自由度

自由度英文名称为 Degree of freedom，缩写为 DOF。对于一个可运动物体来说，一个物体的运动自由度就是平移和旋转的独立方向的数目。空间中一个自由物体有 6 个自由度：3 个对应 X 、 Y 、 Z 方向的移动，3 个对应 X 、 Y 、 Z 方向的旋转，如图 1.20 所示。

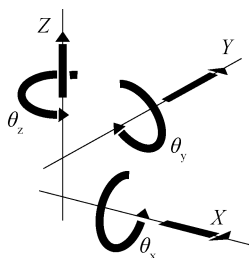


图 1.20 自由度

机器人自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的数目，不包括手爪（末端执行器）的开合自由度。机器人的每一个自由度是由其本体中的独立驱动关节来实现的，所以在应用中，关节和自由度在表达机器人的运动灵活性方面是意义相通的。又由于关节在实际构造上是由回转或移动的轴来完成的，所以又习惯称之为轴。因此，就有了 6 自由度、6 关节或 6 轴机器人的命名方法。它们都说明这一机器人有 6 个独立驱动的关节结构，能在其工作空间中实现抓取物件的任意位置和姿态。6 关节机器人的自由度如图 1.21 所示。

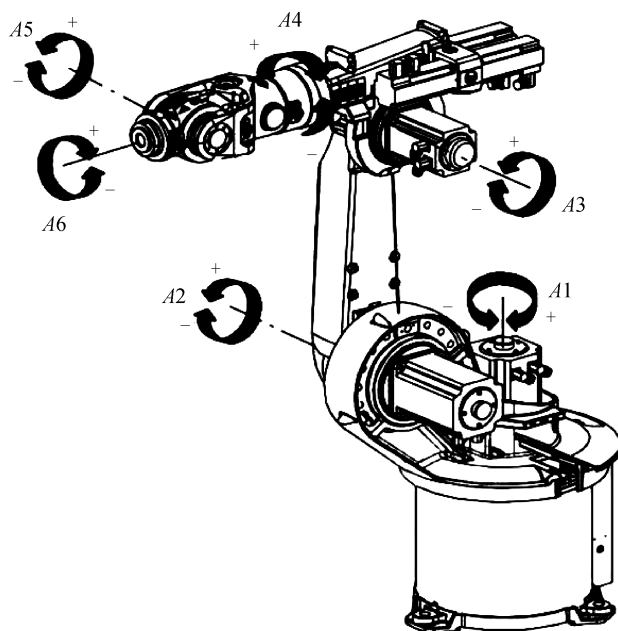


图 1.21 6 关节机器人的自由度

（五）工业机器人的参考坐标系

1. TCP（工具中心点）

描述一个刚体在空间中的位置和姿态，可以通过在该刚体上绑定一个坐标系，然后确定该坐标系的位置和姿态来描述。对于工业机器人，需要在机器人末端法兰盘安装工具来进行作业。为了确定该工具的位置和姿态，需要在工具上绑定一个工具坐标系 TCS（Tool Coordinate System），工具坐标系的原点就是 TCP（Tool Center Point，工具中心点），如图 1.22 所示。TCP 的路径由机器人程序定义，因此可以理解机器人的轨迹运动就是 TCP 的运动。

2. 笛卡儿参考坐标系

（1）世界坐标系

世界坐标系是机器人工作站中的根坐标系，如图 1.22 所示。机器人工作站中的所有参考坐标系都是基于世界坐标系来进行描述和表达的。

(2) 机器人基坐标系

机器人基坐标系用于描述机器人本体在空间中的位置和姿态，基坐标系原点位于机器人基座底部的中心点，如图 1.22 所示。在只有一个机器人工作的应用中，机器人基坐标系通常和世界坐标系重合。当几个机器人同时在一起工作时，世界坐标系通常独立于各个机器人的基坐标系之外。

(3) 工具坐标系

工具坐标系用于描述机器人末端所安装工具在空间中的位置和姿态，工具坐标系原点即 TCP，如图 1.22 所示。机器人在工作中换接使用不同的工具时，也需要在机器人程序中更改使用不同的工具坐标系。

(4) 工件坐标系

工件坐标系通常可以设定在工件的边缘或顶点上，其作用是使机器人程序设定的路径位置均以该坐标系为参照，当工件坐标系的位置改变时，程序中的路径位置也随之一起改变。

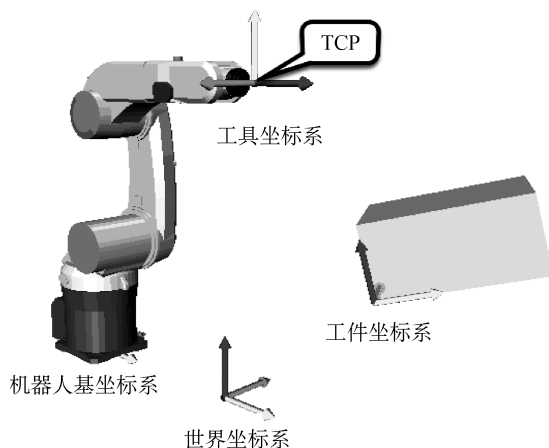


图 1.22 笛卡儿参考坐标系

3. 笛卡儿参考坐标系的定位

一个刚体在空间中的姿态可通过欧拉角来定义。欧拉角是指刚体绕笛卡儿参考坐标系各轴的 3 个旋转角度，由进动角 φ 、章动角 θ 、自转角 ψ 组成。欧拉角有多种旋转顺序，例如 $X-Y-Z$ 、 $Z-X-Y$ 、 $Z-X-Z$ 、 $Z-Y-Z$ 等。

在机器人控制系统中，笛卡儿参考坐标系可通过 X 、 Y 、 Z 、 A 、 B 、 C 六个坐标值进行定位。

X 、 Y 、 Z 定义坐标系在空间中的位置，表示其相对于被参考的坐标系在 X 、 Y 、 Z 坐标轴上的距离，单位是 mm（毫米）。

A 、 B 、 C 定义坐标系在空间中的姿态方向，通过使用欧拉角顺序围绕 $Z-Y-Z$ 轴旋转三个角度来描述。即 A 的坐标值为绕 Z 轴旋转的角度， B 的坐标值为绕 Y 轴旋转的角度， C 的坐标值为第二次绕 Z 轴旋转的角度，单位是°（度）。

笛卡儿参考坐标系的位置和姿态变换原理如图 1.23 所示。

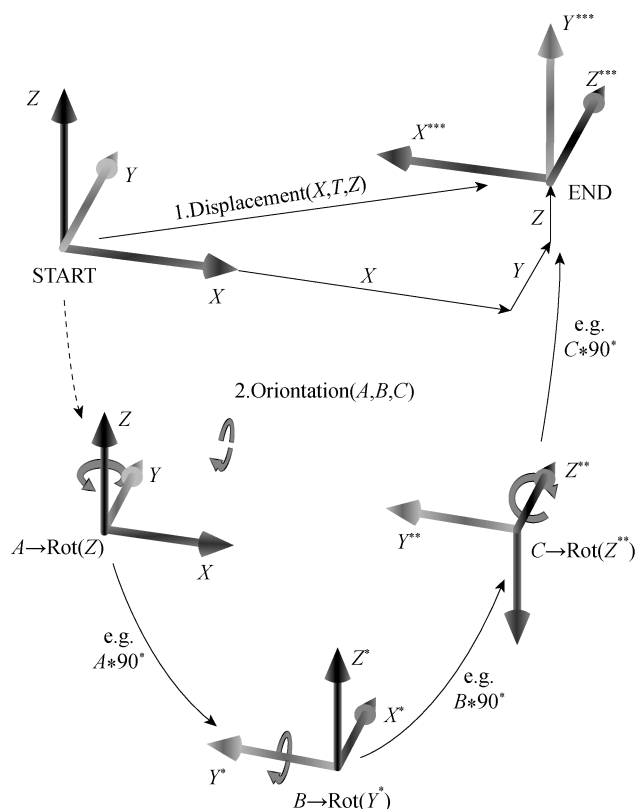


图 1.23 笛卡儿参考坐标系的位置和姿态变换原理

（六）工业机器人的插补运动

1. 关节插补

1) PTP（点到点）运动

机器人最简单的运动方式可以通过存储所有期望到达的机器人姿态的关节位置来实现。在重现运动时，机器人关节同时移动到存储的位置，此时，机器人的运动路径没有被定义，这种运动称为 PTP（Point To Point，点到点）运动。

2) 关节插补

机器人在运动过程中，关节必须平稳移动，以免机器人的驱动器、齿轮和关节过载。因此，在机器人的起始位置和目标位置之间必须计算连续的中间位置，这种路径的中间位置值的计算称为插补。对于 PTP 运动而言，起始点和目标点之间的轴位置被插补，这种运动称为关节插补路径，或者简称关节插补。

3) 同步插补和异步插补

机器人的运动控制可以通过各关节的驱动控制器以独立运动的方式来实现，各关节按照给定的速度和加速度移动到一个给定的位置。但是，这种方式的缺点是：各关节的运动不是同时开始和结束的，会出现非常突兀和不协调的运动。因此，机器人的运动控制方式可以改为所有关节同时运动，以最大速度到达指定位置用时最长的关节决定了运动所需的时间，其他关节则以尽可能快的速度同时运动到终点。此外，运动过程中也会调整开始和结束时的加速度和减速度。这种运动方式称为同步插补。

异步插补则是所有关节尽可能快地独立运动，每个关节的运动所需时间的不同导致了不协调和不受控制的路径。异步插补可以减少机器人的振动，关节的驱动器也无须加载到其极限速度。

图 1.24 展示了同步插补和异步插补的示例。图示是带有一个线性关节和一个旋转关节的机器人。线性关节是基座直线，旋转关节是在基座直线上的点。同步插补中，旋转关节比线性关节快；异步插补中，线性关节比旋转关节快。两种插补方式相比较，同步插补会生成更均匀协调的路径。

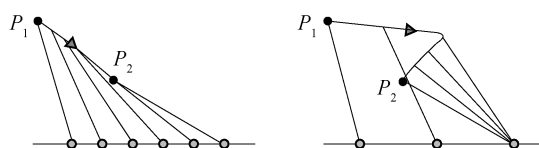


图 1.24 同步插补（左）和异步插补（右）

2. 笛卡儿路径插补

在关节插补的 PTP 运动中，机器人的运动路径没有被定义。机器人要在空间中被定义的路径上运动，机器人控制器就需要在空间坐标中插补路径，并根据所期望到达的 TCP 位置和姿态的坐标来计算出机器人关节的位置，这种运动规划称为笛卡儿路径插补。笛卡儿路径插补一般分为直线插补和圆弧插补。

3. 插补类型的比较

关节插补通常用于在开阔空间中快速定位，是 TCP 从起始点运动至目标点最快也是时间最优化的运动方式，但其路径无法精确预计，一般情况下也并不是最短的路径。

笛卡儿路径插补用于规划精确路径，通常情况下，笛卡儿路径插补会导致机器人关节不是匀速运动。

插补类型的比较如图 1.25 所示。

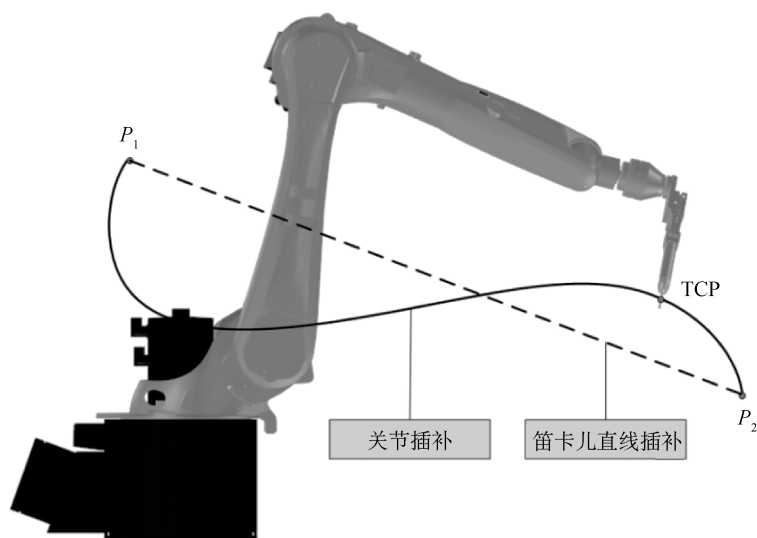


图 1.25 插补类型的比较