

《Robotics》 第一章

1 引言：什么是工业机器人

根据国际标准 ISO 8373:

工业机器人操纵器是一种带有反馈控制的、可重编程的、多用途机械系统，至少具有三个或更多自由度，用于工业自动化。

这句话中包含几个关键概念：

- 反馈控制 (**feedback control**): 机器人能用传感器感知自己的动作 (如位置、速度)，并自动修正误差。
- 可重编程 (**reprogrammable**): 改变程序就能执行不同的任务。
- 多用途 (**multipurpose**): 同一台机器人可执行焊接、搬运、装配等多种工序。

机器人通常由三部分组成:

执行机构 (motors) + 传感器 (sensors) + 控制系统 (controller)

控制器的目标是让机器人的“手” (末端执行器) 准确按照我们设定的轨迹运动。

2 自由度 (Degree of Freedom, DOF) 的基本概念

自由度 (简称 DOF) 表示一个系统的独立运动方向的数量。简单地说: 描述这个系统位置所需要的独立数值 (坐标) 有多少, 它就有多少个自由度。

2.1 从质点讲起

我们从最简单的情况开始——一个小球 (质点):

(1) 一维运动: 如果小球只能在一条直线上来回滑动 (比如套在铁丝上), 它的位置可以用一个数 x 表示。所以它有:

1 个自由度

(2) 二维运动: 如果小球能在一个平面上移动 (比如桌面上滑动), 它的位置由两个坐标 x, y 表示:

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

这里 \mathbf{i}, \mathbf{j} 是坐标轴方向。此时我们需要两个数值来确定小球的位置, 所以:

2 个自由度

(3) 三维运动： 如果小球能在空间中任意运动，则位置向量为：

$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j} + z \mathbf{k}$$

需要三个坐标 (x, y, z) 才能确定位置，因此：

3 个自由度

2.2 刚体的自由度推导

刚体可以看作由多个质点组成，但这些质点之间的距离固定。假设刚体由 3 个不在一条直线上的质点组成。

- 每个质点在空间中有 3 个坐标：总共 $3 \times 3 = 9$ 个变量。
- 由于刚体形状不变，三对质点间距离固定，产生 3 个约束条件：

$$|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| = c_{12}, \quad |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3| = c_{13}, \quad |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3| = c_{23}$$

- 所以独立变量数为 $9 - 3 = 6$ 。

因此，一个刚体在三维空间中有：

6 个自由度 = 3 个平移 + 3 个转动

解释：

- 平移自由度：沿 x, y, z 三个方向的位置变化；
- 转动自由度：绕 x, y, z 三个轴的旋转角度；

这六个参数完全决定刚体的“姿态 (pose)”：

$$\text{Pose} = \text{位置 (position)} + \text{方向 (orientation)}$$

3 关节与机械臂结构

工业机器人不是一个整体的刚体，而是由若干刚性连杆 (**links**) 通过关节 (**joints**) 连接而成。

3.1 关节类型

每个关节通常只保留一个自由度：

- 转动关节 (**Revolute Joint, R**)：允许绕固定轴旋转。变量：转角 θ
- 移动关节 (**Prismatic Joint, T**)：允许沿固定轴滑动。变量：距离 d

3.2 串联机构自由度计算

假设机器人有 J 个一自由度关节。整个机构包含 $N = J + 1$ 个刚体（包括基座）。每个刚体原本有 6 个自由度，总共 $6N$ 。每个关节去掉 $6 - 1 = 5$ 个自由度（因为只保留 1 个），于是系统总自由度为：

$$F = 6N - 5J = 6(J + 1) - 5J = J + 6$$

若基座固定（减掉 6 个基座自由度），得：

$$\boxed{F = J}$$

也就是说，一个有 6 个关节的机械臂，就有 6 个自由度。

4 机械臂与腕部

机器人操纵器一般分为三部分：

- 机械臂 (**Arm**)：主要负责移动末端的位置；
- 腕部 (**Wrist**)：调整末端的方向；
- 夹具 (**Gripper**)：夹取或释放物体。

为了能在空间中任意“摆放”物体，机械臂 + 腕部至少要提供 6 个独立运动方向：

3 个平移 + 3 个转动

5 典型机械臂结构

工业上常见的三自由度机械臂主要有以下几种形式：

名称	关节类型	自由度组合	工作空间形状
仿人型 (Anthropomorphic)	R—R—R	三转动	球形
球坐标型 (Spherical)	R—R—T	两转动一平移	球形
SCARA 型	R—R—T	两转动一平移	圆柱形
圆柱型 (Cylindrical)	R—T—T	一转动两平移	圆柱形
笛卡尔型 (Cartesian)	T—T—T	三平移	长方体

这些结构的选择取决于所需的工作空间形状和任务类型。例如：

- SCARA 机器人常用于装配；
- 笛卡尔型适合精密搬运；
- 仿人型可完成复杂空间路径。

6 总结

1. 自由度表示系统能独立运动的方向数量;
2. 质点在空间有 3 个自由度, 刚体有 6 个自由度;
3. 串联机器人每个关节贡献 1 个自由度;
4. 完整空间操作需至少 6 个自由度;
5. 工业机器人由机械臂、腕部和夹具组成;
6. 各类机械臂结构可归纳为 RRR、RRT、RTT、TTT 等形式。