

《智能机器人设计》

机器人绪论

智能概念



智能

即智慧与能力。也可以把智能看成知识和智力的总和，前者是智能的前提和基础，后者是运用知识解决特定问题的能力。



人工智能

“人工智能是关于知识的学科是怎样表示知识、以及怎样获得知识并使用知识的科学”——斯坦福人工智能研究中心-尼尔森。

“人工智能就是研究如何使计算机做过去只有人才能做的智能工作”——美国麻省理工学院-温斯顿。

人工智能的基本思想和基本内容，即人工智能是“研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法和技术”。人工智能被认为是21世纪三大尖端技术（即基因工程、纳米科学、人工智能）



图灵测试

是一项关于判断机器是否能够思考的著名测试，目的是测试某机器是否能表现出与人等价的智能。测试的具体方式是，测试者在与被测试者隔开的情况下，通过一些装置向被测试者随意提问。问过一些问题后，如果被测试者超过30%的答复不能使测试者确认出哪个是人、哪个是机器的回答，这台机器就测试通过。

机器人概念

机器人是自动控制机器的统称，在现代科学体系中，机器人是一个拥有自主权的系统，它存在于物理世界，能够对它所处的环境进行感知，为实现特定的目标采取特定的动作。广义上，机器人包括一切模拟人类行为、思想或者模拟其他生物的机械（如机器狗、机器猫等）。狭义上，对机器人的定义存在不同分类及争议，有些计算机程序甚至也被称为机器人。

★机器人发展历程



机器人概念

第一代机器人

以机械臂为典型代表，运行事先已经编好的程序，无论外界环境怎么改变，它都不会改变动作。

第二代机器人

带传感器的机器人，自身能对外界环境的改变做出一定的调整，最早的代表是1968年诞生于斯坦福大学的机器人Shakey，目前我们日常生活中使用的扫地机器人也属于第二代机器人

第三代机器人

智能机器人，它利用各种传感器、测量器等获取环境信息，然后利用智能技术进行识别、理解、推理，最后进行规划决策，是能自主行动、实现目标的高级机器人

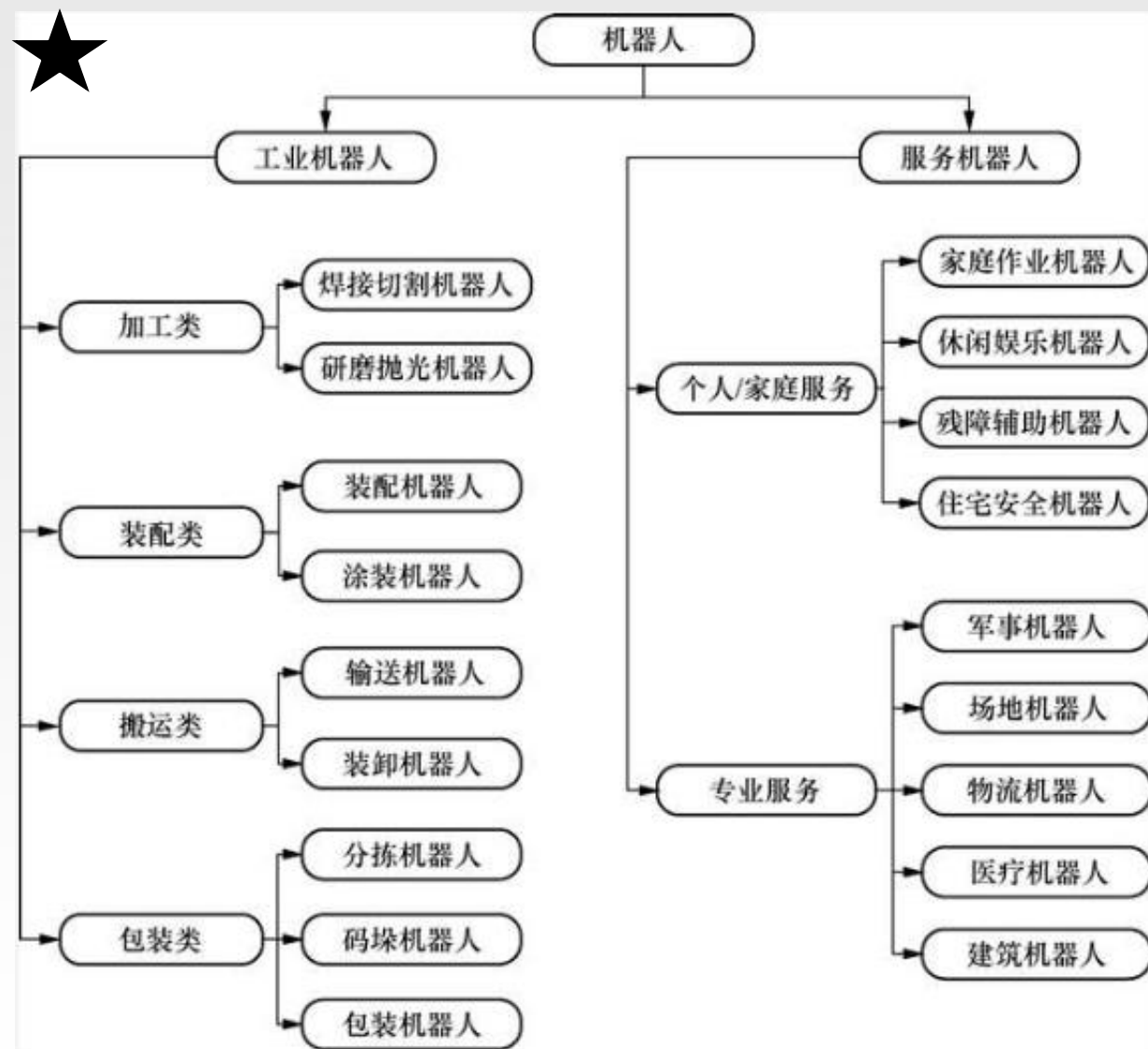
机器人种类

机器人分类

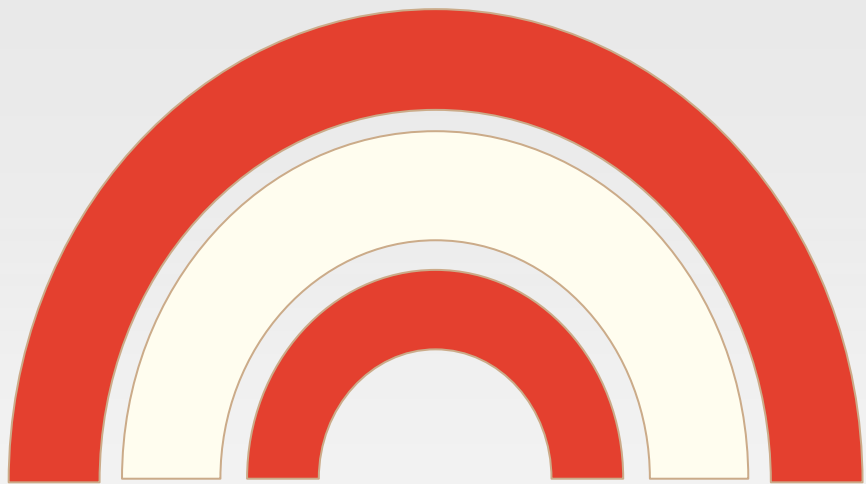
关于机器人如何分类，国际上没有统一的标准，有的按负载量分类，有的按控制方式分类，有的按自由度分类，有的按结构分类，有的按应用领域分类。

国际上的机器人学者，从应用环境出发将机器人分为两类：制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人形机器人。

我国的机器人专家从应用环境出发，将机器人分为两类，即工业机器人和服务机器人，右图图给出了这两类机器人的详细分类。



智能机器人概念



图灵曾经大胆预言真正具备智能机器的可行性。为此，科学家开始了制造智能机器的漫漫探索之路，智能机器人是智能机器的典型代表。

- 智能机器人应该具备与人或其他生物相似的智能，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力，具有高度灵活性。
- 智能机器人相较于一般机器人而言，具有感知周围环境的能力，并且能够在信息不充分及环境迅速变化的情况下完成动作和决策
- 智能机器人的应用场景随技术的不断发展而扩展，在诸如工农业发展、社会服务、军事等各个领域，智能机器人都有极大的发展空间和应用前景。

机器人的智能水平评价

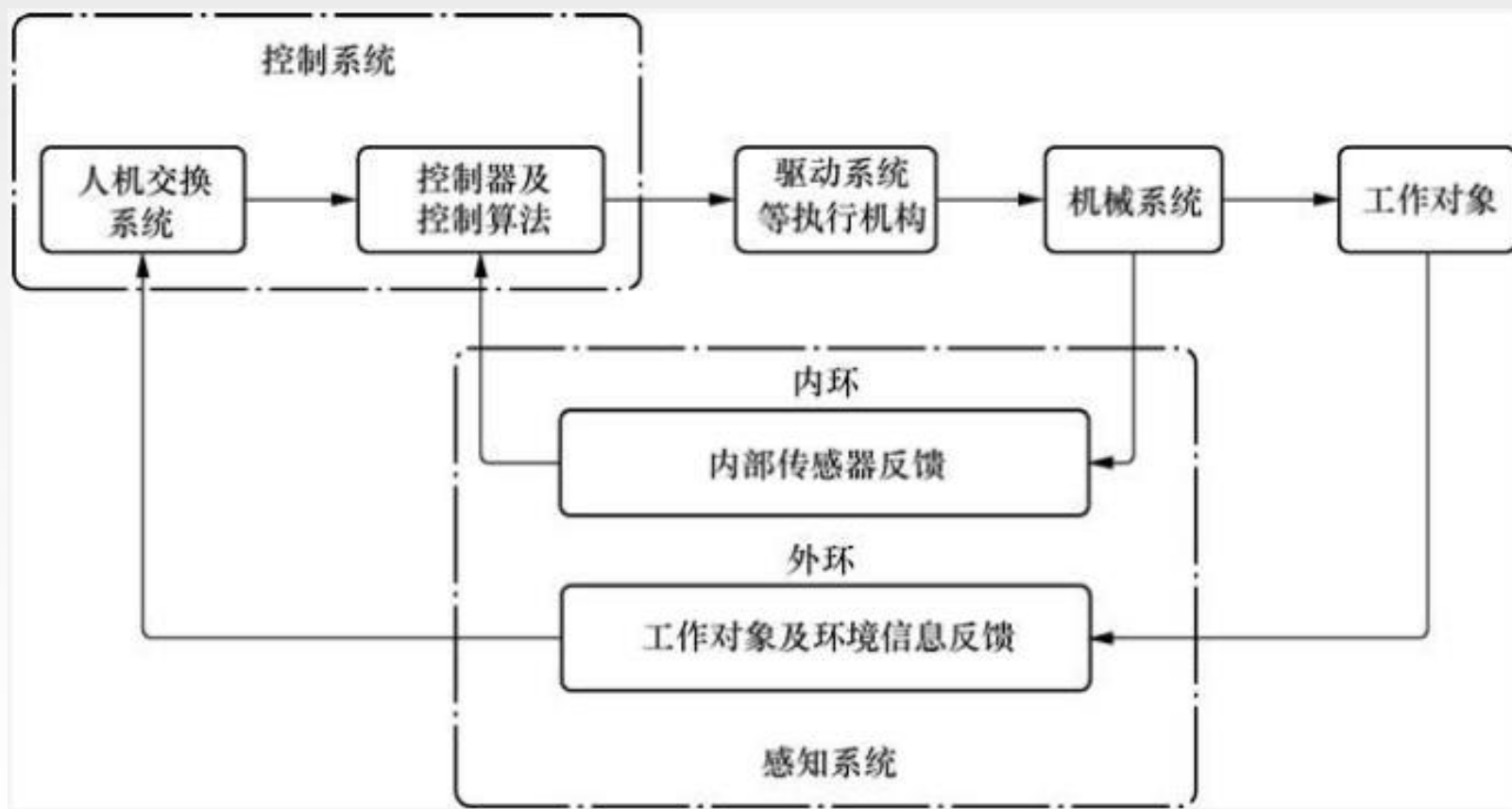
图灵测试给出了机器是否具有智能的定性准则，但没有给出评价机器智能水平的定量标准，2014发表的论文“标准智能模型”，统一描述了人工智能系统和人类的特征和属性，提出任何一个智能体都应具备知识的获取、知识的掌握、知识的创新和知识的反馈这4种能力。参考自动驾驶标准，给出机器人智能水平的分级标准如下。

智能等级	名称	定义表	知识获取	知识反馈	知识应用	知识创新	参考机器
L0	人工操控机器人	由人类操控的机器和设备	人类	人类	人类	人类	人工设备、遥控飞机
L1	程序控制机器人	按照预先设置好的程序进行动作，有限地反馈自身状态，无法感知周围环境	人类/机器人	人类	人类	人类	机械臂、非标自动化设备
L2	感知控制机器人	能够感知周围环境和反馈自身状态，能够联网和远程控制，但无法与人类直接交互	机器人	人类/机器人	人类	人类	扫地机器人、大疆无人机
L3	自适应机器人	在特定场景和范围，实现自适应，最大限度地保障自身独立和安全，但不具有学习能力	机器人	机器人	人类/机器人	人类	自动驾驶物流车
L4	完全自主机器人	具备在复杂场景下独立生存、独立行动和不断学习优化的机器	机器人	机器人	机器人	机器人	最接近的是Atlas双足机器人

智能机器人的架构—经典架构

智能机器人是一个机电一体化系统，更是一个人工智能系统。智能机器人的经典架构设计遵循感知-控制-执行的反馈控制框架，机器人系统的复杂性在于，不仅要考虑本体的设计和控制，还要考虑与外部环境的交互，并通过机器学习提升环境适应性和自身智能性。因此，该经典架构是一个典型的双闭环控制系统。

在内环，通过本体内部传感器（如陀螺仪、惯性传感器等）反馈机械本体的相关信息（如速度、偏角等），通过控制算法对机器人进行控制。内环是基础，目标是实现机器人自身的稳定和性能的优异，较少涉及机器人智能性和机器学习的研究内容。



在外环，主要通过机器人的感知系统（如雷达、摄像头等）感知环境信息，通过人机交互系统和机器学习算法确定自身在环境中的位置，规划行进路线，并据此对内环进行监督控制。外环是高阶系统，目标是实现机器人的智能性，提高机器人的自主性。

智能机器人的架构—网联云控架构



由于机器人本体的计算能力有限，因此必须通过强大的云端计算能力给机器人赋能。左图是新一代智能机器人的网联云控架构，或者叫云-网-端结合的智能机器人系统架构。

“端”是指机器人本体及本体自身的控制系统，一般可以根据经典架构设计，同时具备新的时代特性。如传统芯片都在向AI转型。英伟达Jetson Nano、寒武纪思元系列、地平线征程系列、海思麒麟系列、苹果M1等新一代智能芯片。

“网”主要指通过WiFi、5G及其他无线通信网络将机器人连接起来，实现机器人本体和云端大脑的连接。这是实现多机器人协作和群体智能的必然要求，同时可以为进一步提升机器人的感知能力和移动能力赋能。

“云”主要指基于云存储、云计算的机器人脑，该大脑包括机器人视觉系统、对话系统、决策系统和交互系统等（服务器端的ROS），通过机器学习（主要依赖深度神经网络）不断训练进化，使得前端机器人本体智能随之提升。

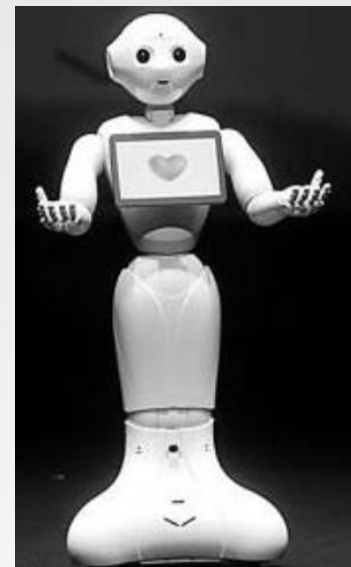
典型的智能机器人



BigDog, 是波士顿动力公司设计的四足机器人, 这只机器狗能在战场上能为士兵运送弹药、食物和其他军用物资。由汽油机驱动的液压系统能够带动四肢关节运动, 自身质量235lb(1lb=0.454kg), 负载为340lb, 行走距离为30km。



Atlas, 于2013年由波士顿动力公司基于Petman研发。Atlas身高1.75m, 体重82kg, 能够实现与人类一样的双腿直立行走。实现物体识别与障碍物规避。最新版机器人还能够完成双腿立定跳远、后空翻、软地面跑步, 以及左右脚交替的三连跳跃等高难度动作。



Pepper是一款人形机器人, 由日本软银集团和法国AldebaranRobotics公司研发, 通过对人类的表情和声音的识别, 分析人类的情绪并进行互动交流。Pepper的身高为120cm, 质量为28kg, 续航时间约为12小时。

典型的智能机器人



“小途”机器人是我国首台社区智能服务机器人，由科大讯飞旗下公司研发生产，通过国家级机器人CR认证。基于科大讯飞先进的人工智能技术和“互联网+”思想，“小途”机器人具有人脸识别、语音识别等人机交互功能。

好奇号(Curiosity)火星车是美国国家宇航局研制的一台火星探测器，于2011年11月发射，2012年8月成功登陆火星表面。它是美国第七个火星着陆探测器，第四台火星车，也是世界上第一辆采用核动力驱动的火星车，好奇号长约3.1m，宽约2.7m，高约2.1m，质量约为980kg

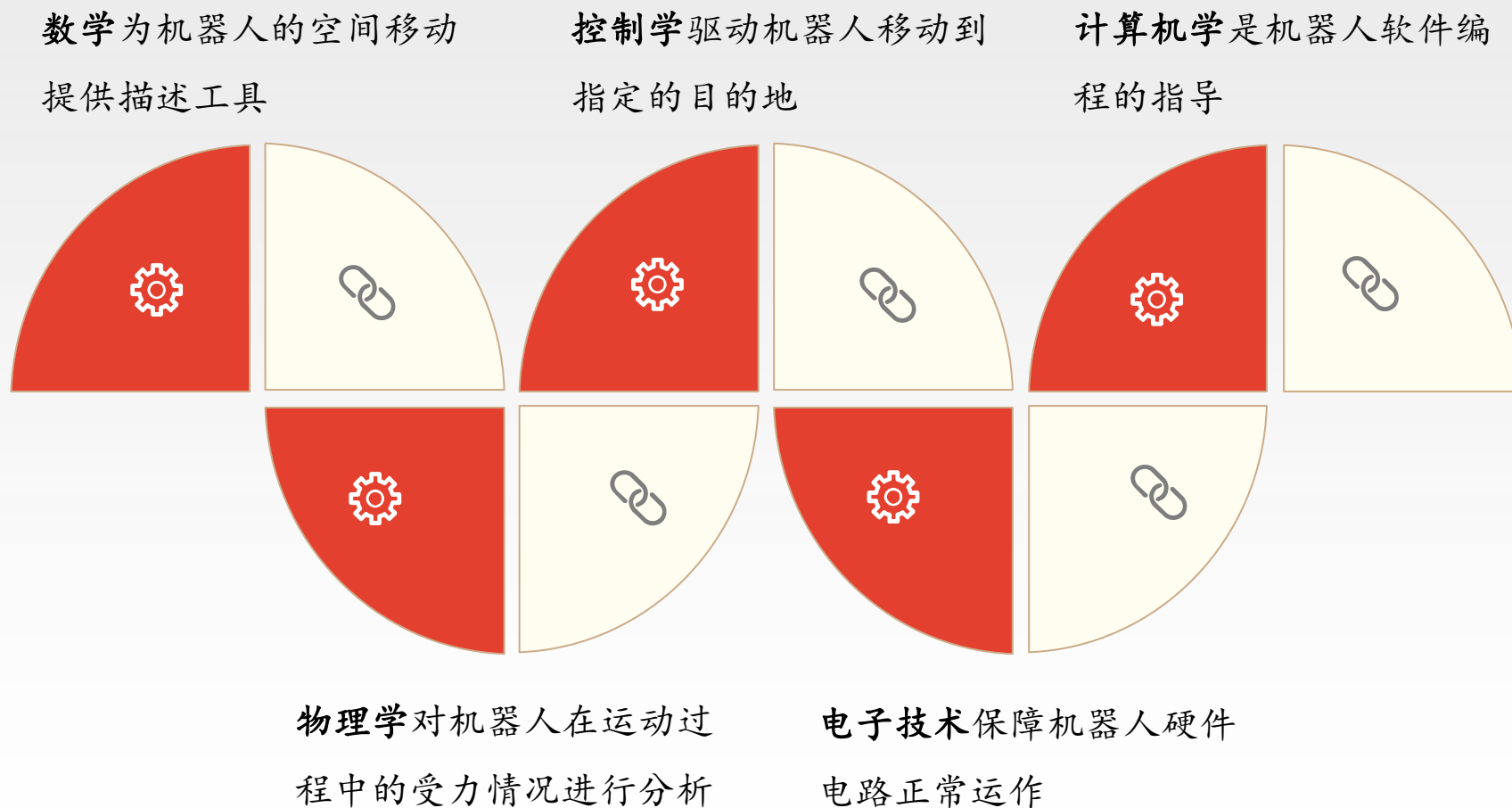
无人配送车是自动驾驶技术与大型轮式移动机器人相结合的典型案例，从2016年开始，京东便开始着手无人配送车的研发工作，并率先发布了国内首个物流无人车。2016年9月，京东无人配送车1.0版横空出世，并在当年“双十一”期间成功进行了包裹配送测试。

《智能机器人设计》

机器人基础

机器人学

★机器人学并不是一门新的学科，而是由诸多传统学科支撑形成的结合体。



机器人的运动描述

为了研究机器人的运动与控制，不仅要表示空间某点的位置，还需要表示物体的方位，这就要理解坐标向量、坐标系及坐标系变换等概念。



向量

指具有大小和方向的量



坐标系

理科常用辅助方法，为了定量描述物体的位置变化



坐标向量

是以一个坐标轴正方向为方向的单位向量。



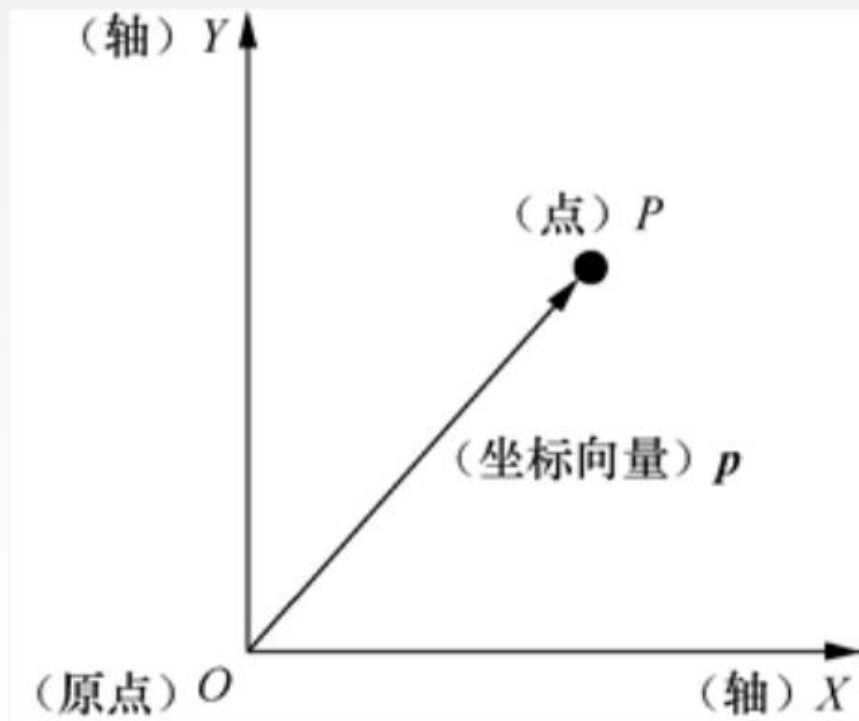
坐标转换

是空间实体的位置描述，是从一种坐标系统变换到另一种坐标系统的过程。

机器人的运动描述

★坐标系与位姿

空间中的一点可以被描述为一个坐标向量，而坐标向量必须在某一个参考坐标系内表示，最常见的如笛卡尔直角坐标系，由互相正交的坐标轴构成，它们的交点称为原点。因此，点、坐标向量与坐标系有对应的关系如图所示。

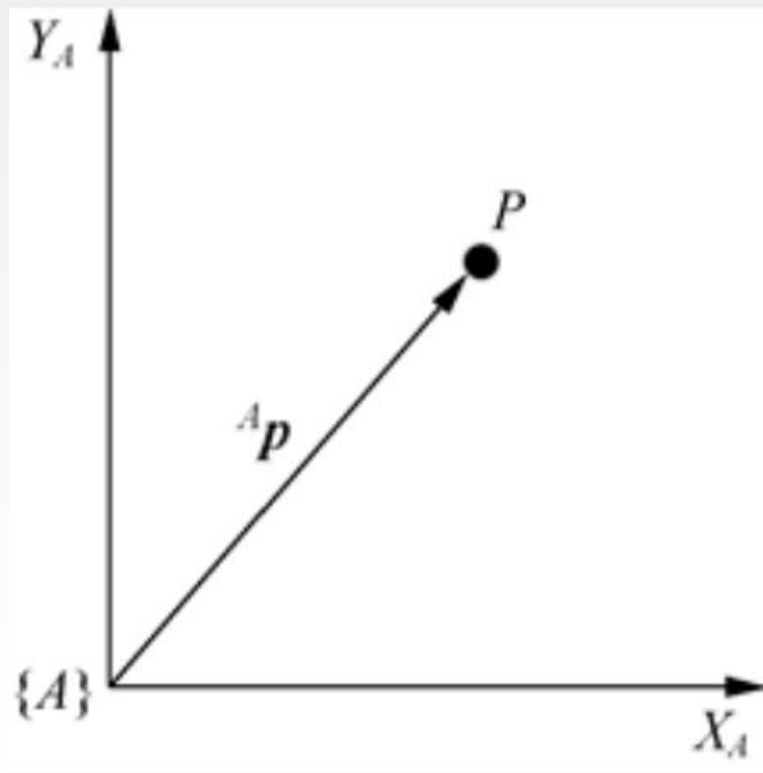


设 \hat{X} 、 \hat{Y} 、分别为X轴、Y轴上的单位向量，如果P点在X轴和Y轴上的坐标值为 (x, y) ，则坐标向量 p 可表示为 $P = x\hat{X} + y\hat{Y}$

机器人的运动描述

★坐标系与位姿

为了区分不同的坐标系，我们在每个坐标系上添加不同的字母标记，如图所示。其中， ${}^A p$ 为向量 p 在坐标系 $\{A\}$ 中的表示。

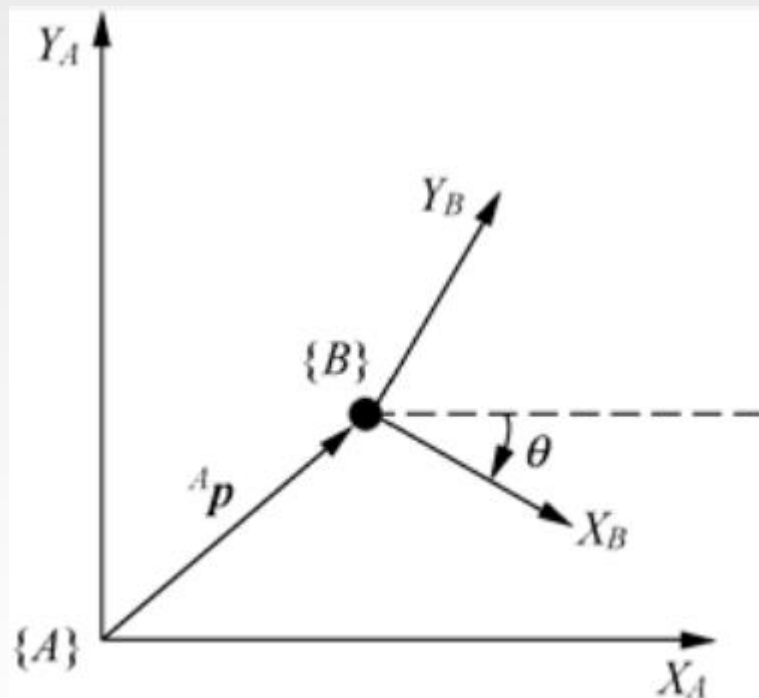


任意 P 点的位置都能够用坐标系中的向量表示，同样，一个坐标系也能够另一个坐标系中表示。不同的是， P 点只具备位置信息，而坐标系除了位置，还具备方向信息。

机器人的运动描述

★坐标系与位姿

引入新坐标系 {B}, 其原点为坐标系 {A} 中的P点, 如图所示. 这里 {A} 称为参考坐标系, {B} 称为相对坐标系。所谓位姿, 是一个坐标系位置与方向信息的总称, 用 ξ 符号表示 (读音: kexi), 位姿是相对而言的, 因此, 图中坐标系 {B} 相对于坐标系 {A} 的位姿可表示为 ${}^A\xi_B$ 。不难发现, ${}^A\xi_B$ 可以用位置向量 Ap 结合角度 θ 表示



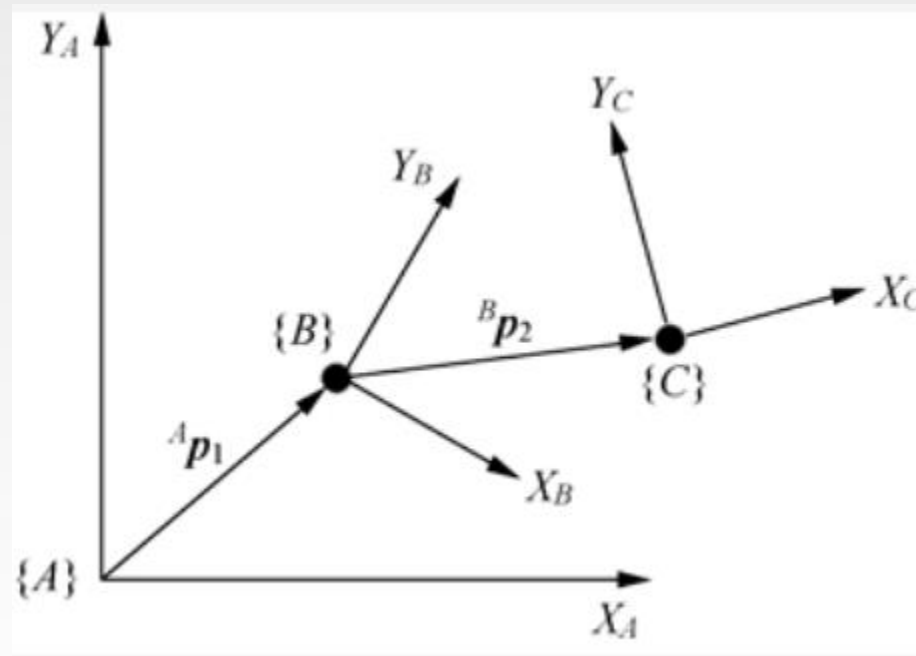
机器人的运动描述

★坐标系与位姿

坐标系的相对位姿也可以进行合成，以图中的情况为例，位姿可以表示为：

$${}^A\xi_C = {}^A\xi_B \oplus {}^B\xi_C$$

符号“ \oplus ”表示合成。含义为：坐标系 {C} 在坐标系 {A} 中的位姿，可以由坐标系 {B} 在坐标系 {A} 中的位姿与坐标系 {C} 在坐标系 {B} 中的位姿合成得到。

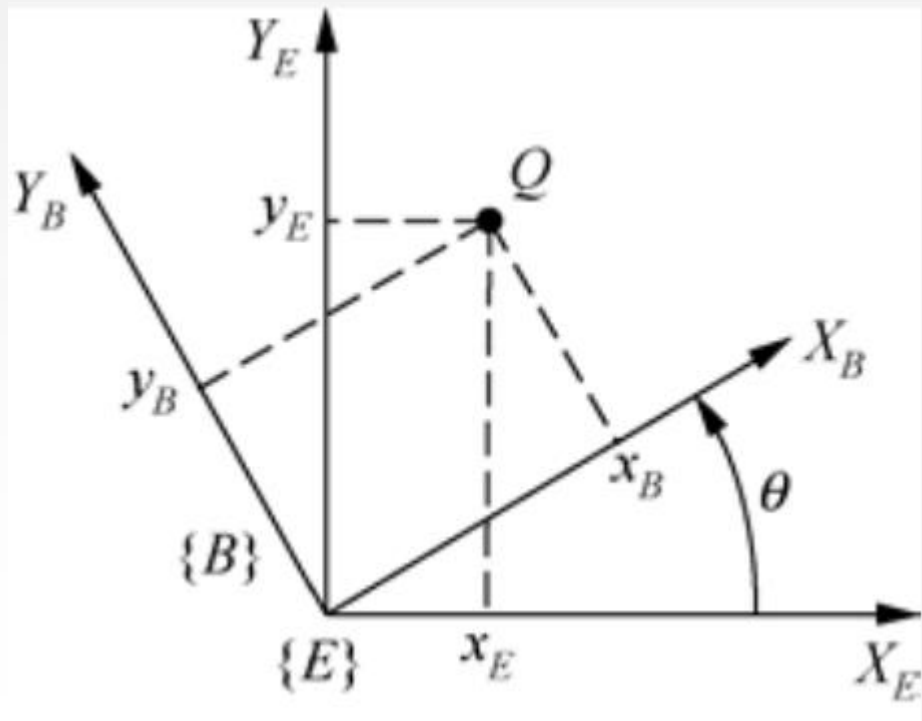


机器人的运动描述

★二维位姿

一个普通的二维空间可以用X-Y坐标系表示，那么在X-Y坐标系中如何表示位姿呢？这里先介绍两种坐标系的基本运动方式：旋转与平移。

首先创建一个坐标系 {E}，点Q的坐标用列向量表示为 $[x_E y_E]^T$ 。然后，保持原点不变，将坐标系逆时针转动 θ 角度，得到新坐标系 {B}，在新坐标系中，点Q的坐标变为 $[x_B y_B]^T$



$$\begin{aligned}x_E &= x_B \cos \theta - y_B \sin \theta \\y_E &= x_B \sin \theta + y_B \cos \theta\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} = {}^E_B \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad {}^E_B \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

${}^E_B \mathbf{R}$ 称为旋转矩阵，“R”左上角的“E”代表原坐标系，左下角的“B”代表旋转之后得到的坐标系，该矩阵给出了同一点Q在不同坐标系中坐标向量之间的关系。

机器人的运动描述

★二维位姿

$${}^E_B\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

矩阵 \mathbf{R} 为正交矩阵，即 $\mathbf{R}^T\mathbf{R}=\mathbf{I}$ ， \mathbf{I} 为单位矩阵， \mathbf{R}^T 为转置矩阵。正交矩阵满足 $\mathbf{R}^T=\mathbf{R}^{-1}$ 于是

$$\text{中} \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} = {}^E_B\mathbf{R} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} \quad \Longrightarrow \quad \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} = ({}^E_B\mathbf{R})^{-1} \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} = ({}^E_B\mathbf{R})^T \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} = {}^B_E\mathbf{R} \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix}$$

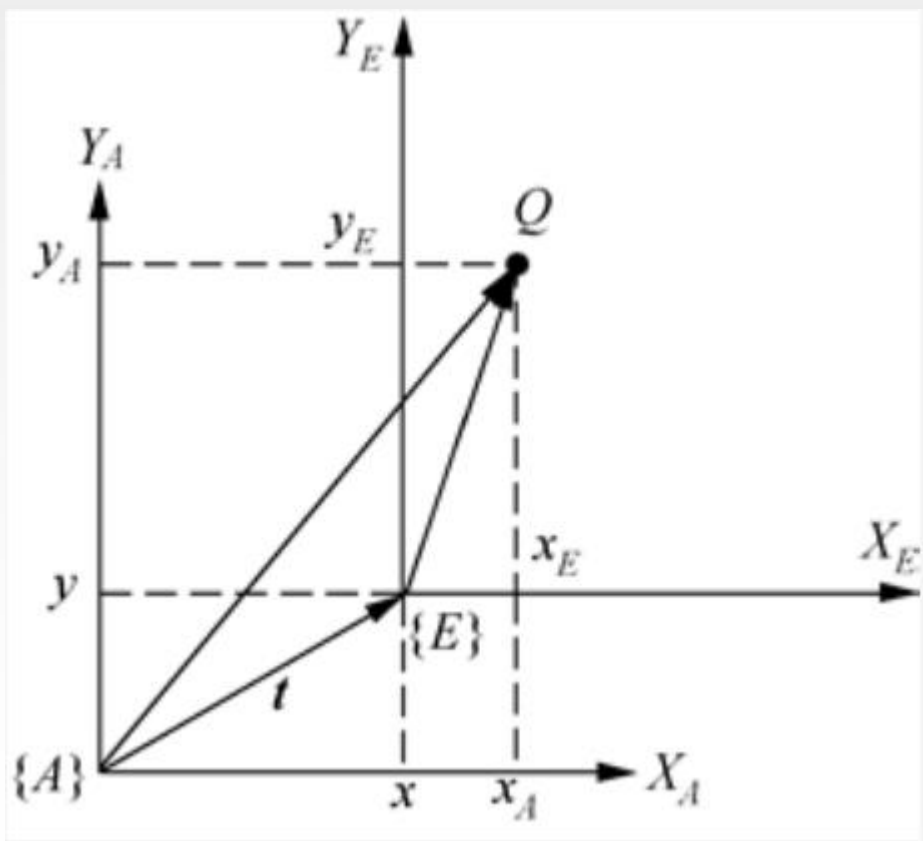
除此之外，正交矩阵的每一列，等于坐标系{E}的X轴、Y轴上的单位向量在坐标系{B}中的表示：

$${}^E\hat{\mathbf{x}}_B = {}^E_B\mathbf{R} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad {}^E\hat{\mathbf{y}}_B = {}^E_B\mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad \Longrightarrow \quad {}^E_B\mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^E\hat{\mathbf{x}}_B & {}^E\hat{\mathbf{y}}_B \end{bmatrix}$$

机器人的运动描述

★二维位姿

二维坐标系的平移，设坐标系 {E} 的X轴、Y轴与坐标系 {A} 的X轴、Y轴平行且方向一致，{E} 的原点位置在 {A} 中的坐标向量为 $t = [xy]^T$ ，如图所示。



很容易得到点Q在 {A} 中的坐标为：

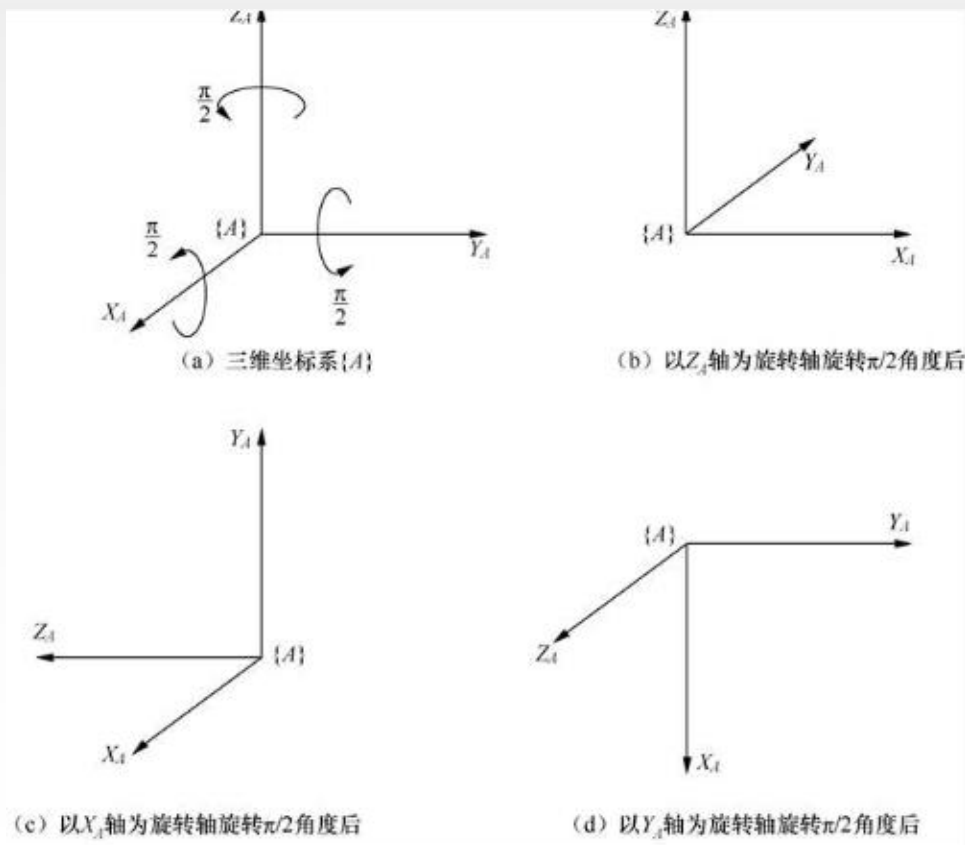
$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

一旦确定旋转矩阵R或平移向量t,就可知道一个坐标系相对于另一个坐标系的方向或位置，换句话说，知道了一个坐标系相对于另一个坐标系的位姿。因此，位姿完全可以由R和t通过某种组合描述。

机器人的运动描述

★三维位姿

三维坐标系本质上是在X-Y坐标系的基础上增加一个坐标轴Z, 它与X轴和Y轴正交, 正轴方向根据右手定则确定。设与三维坐标系中X-Y-Z轴方向相同的单位向量为 \hat{X} 、 \hat{Y} 、 \hat{Z} , 则任意一点P既可用它在每个坐标轴上的坐标值实数对(X, Y, Z)表示, 也可用向量形式表示: $P=X\hat{X}+Y\hat{Y}+Z\hat{Z}$



首先建立三维坐标系{A}, 如图(a)所示。

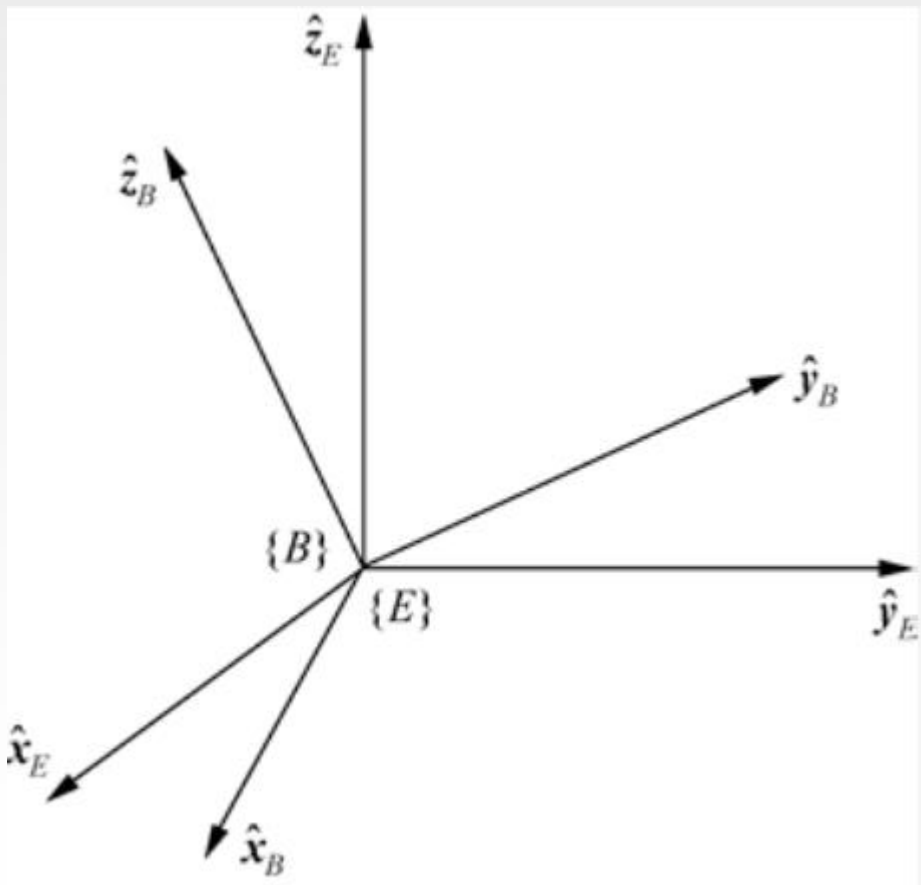
分别以 Z_A 、 X_A 、 Y_A 轴为转轴, 旋转 $\pi/2$ 角度, 可以得到的新坐标系, 分别如图(b)、(c)和图(d)所示。

注意, 此处的旋转动作定义为: 用右手握住转轴(或向量), 右手拇指指向坐标轴正方向(或向量箭头方向), 其余手指弯曲后所指方向为角度增大的方向。

机器人的运动描述

★三维位姿

设一个三维旋转矩阵为 ${}^E_B \mathbf{R}$, 二维坐标系的旋转矩阵为 2×2 的方阵, 因此这里的 ${}^E_B \mathbf{R}$ 为 3×3 方阵。首先建立坐标系 {E}, 坐标系 {B} 由坐标系 {E} 通过旋转运动得到, 它们的原点重合, 如图所示。

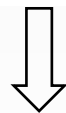


图中的坐标轴用单位向量表示, 容易发现下式成立:

$${}^E \hat{\mathbf{x}}_B = {}^E_B \mathbf{R} {}^B \hat{\mathbf{x}}_B, \quad {}^E \hat{\mathbf{y}}_B = {}^E_B \mathbf{R} {}^B \hat{\mathbf{y}}_B, \quad {}^E \hat{\mathbf{z}}_B = {}^E_B \mathbf{R} {}^B \hat{\mathbf{z}}_B$$

由于:

$${}^B \hat{\mathbf{x}}_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^B \hat{\mathbf{y}}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^B \hat{\mathbf{z}}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

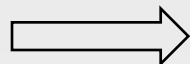


$${}^E_B \mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^E \hat{\mathbf{x}}_B & {}^E \hat{\mathbf{y}}_B & {}^E \hat{\mathbf{z}}_B \end{bmatrix}$$

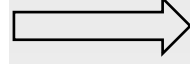
机器人的运动描述

★三维位姿

$${}^E_B \mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^E \hat{x}_B & {}^E \hat{y}_B & {}^E \hat{z}_B \end{bmatrix}$$

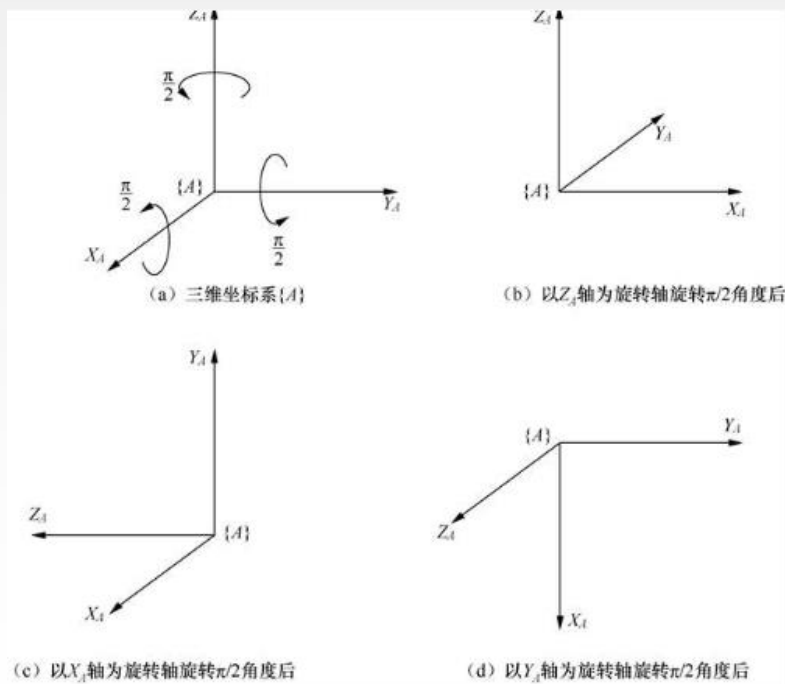


$${}^E_B \mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^B \hat{x}_E & {}^B \hat{y}_E & {}^B \hat{z}_E \end{bmatrix}^T = \left({}^B_E \mathbf{R} \right)^T$$



$${}^E_B \mathbf{R} = {}^B_E \mathbf{R}^{-1} = \left({}^B_E \mathbf{R} \right)^T$$

证明三维旋转矩阵是正交矩阵。以图中的情况为例，分别以 X_A 、 Y_A 和 Z_A 为轴旋转角度 θ 的三维旋转矩阵可表示为：



$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

备注：如果旋转动作是连续发生的，那么旋转顺序是不可交换的。

机器人的运动描述

★三维位姿

三维坐标系的平移运动比较简单，与图2.6所示的二维坐标系的平移情况相似。假设坐标系 {E} 的X轴、Y轴、Z轴与坐标系 {A} 的X轴、Y轴、Z轴平行且方向一致，{E} 的原点位置在 {A} 中的坐标向量为 $t=[x \ y \ z]^T$ ，于是得到点Q在 {A} 中的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

机器人的运动描述

推导前提:

坐标使用右手坐标系，角度逆时针旋转为正。

1. 绕X轴旋转角度为 俯仰角 即Pitch
2. 绕Y轴旋转角度为 偏航角 即Yaw (Head)
3. 绕Z轴旋转角度为 翻滚角 即Roll

二维坐标点的旋转

如右图所示, 根据三角函数关系, 可以列出向量OP与OP'的坐标表示形式:

$$x = |OP| \cdot \cos \alpha \quad x' = |OP| \cdot \cos(\alpha + \beta)$$

$$y = |OP| \cdot \sin \alpha \quad y' = |OP| \cdot \sin(\alpha + \beta)$$

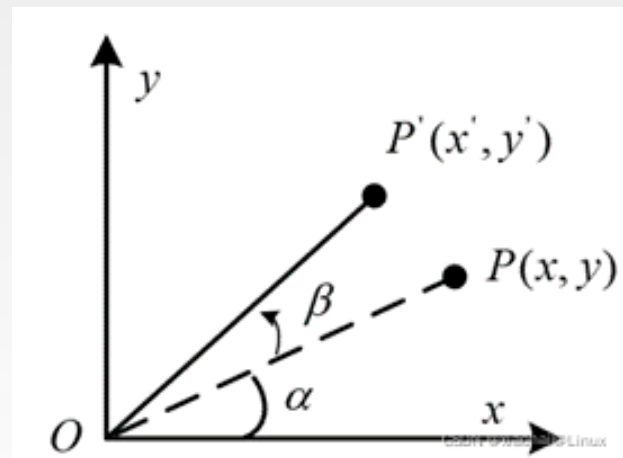
将P' (x', y') 表达式展开:

$$x' = |OP| \cdot \cos(\alpha + \beta) = |OP| \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta) = x \cdot \cos \beta - y \cdot \sin \beta$$

$$y' = |OP| \cdot \sin(\alpha + \beta) = |OP| \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta) = x \cdot \sin \beta + y \cdot \cos \beta$$

为方便运算理解, 我们将二维点旋转表示为矩阵:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$



机器人的运动描述

★三维旋转

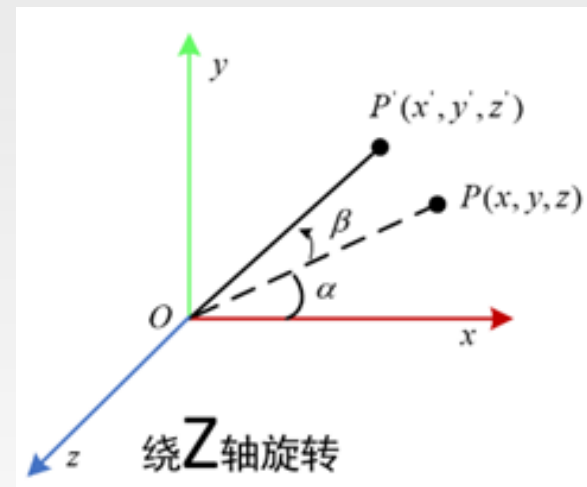
1、绕Z轴旋转参考二维点旋转矩阵同样的推导流程，我们可以推导出来三维点绕Z轴旋转的坐标表达式：

$$x' = |OP| \cdot \cos(\alpha + \beta) = |OP| \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta) = x \cdot \cos \beta - y \cdot \sin \beta$$

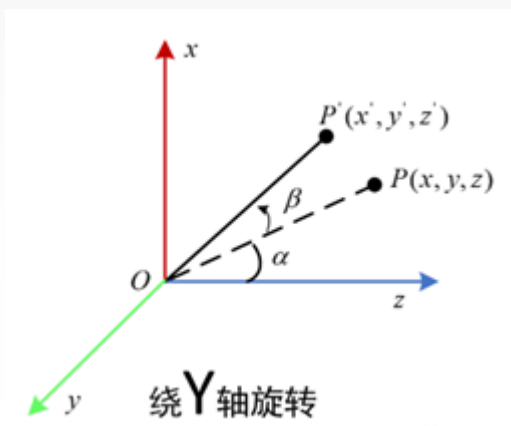
$$y' = |OP| \cdot \sin(\alpha + \beta) = |OP| \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta) = x \cdot \sin \beta + y \cdot \cos \beta$$

$z' = z$ 为方便运算理解，我们将三维点旋转表示为矩阵：

$$R_Z = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



2、同理绕Y轴旋转为矩阵：

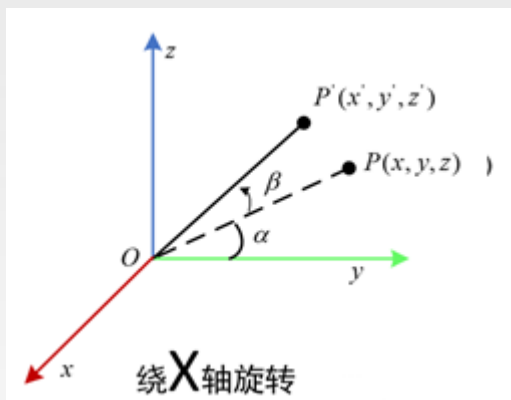


$$R_Y = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

机器人的运动描述

★三维旋转

3、同理绕X轴旋转为矩阵：



$$R_X = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

4、绕三轴旋转（先绕x，再绕y，最后绕z轴旋转。）：

$$M_{ZYX} = \begin{bmatrix} \cos(\text{Roll}) & -\sin(\text{Roll}) & 0 \\ \sin(\text{Roll}) & \cos(\text{Roll}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\text{Head}) & 0 & \sin(\text{Head}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\text{Head}) & 0 & \cos(\text{Head}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{Pitch}) & -\sin(\text{Pitch}) \\ 0 & \sin(\text{Pitch}) & \cos(\text{Pitch}) \end{bmatrix}$$

注：绕轴旋转的顺序不一样，得到的旋转矩阵也不一样！

机器人构成

机器人构成

机器人是一种复杂的自动控制系统，可以不依赖人类的操纵，仅依靠人工智能技术自主完成特定的任务。同人类的感觉器官类似，机器人感知系统的作用是获取内部状态和周围环境信息，并转化为一定的数据格式传输给机器人的“大脑”，使其进行相应的处理。机器人一般由执行机构、驱动装置、控制系统和检测装置等部分组成。

执行机构

驱动装置

控制系统

检测装置

机器人构成



执行机构

执行机构即机器人本体，例如，左图日本本田技研工业株式会社研制的仿人形机器人ASIMO，其本体具备和人一样的头部、颈部、躯干、手臂、腰部、腿部等共38个自由度关节。

驱动装置

驱动装置使其运动，机器人使用的驱动装置主要依靠电力驱动，如伺服电机、步进电机等，除此之外，也采用液压、气动等驱动装置

控制系统

给驱动装置的输入信号。控制系统一般由上、下两级微型计算机组成，上位机负责系统的管理、通信、运动学和动力学计算，并向下级微机发送指令信息。下位机进行插补运算和伺服控制处理，并给每个自由度关节发送控制信号，实现给定的运动

检测装置

控制系统需要的反馈信息是通过实时检测机器人的运动及工作情况，或者机器人周围环境情况得到的，这里就要求机器人必须具备检测装置，即传感器。

机器人感知系统

传感器在机器人的控制中起了非常重要的作用，正因为有了传感器，机器人才具备了类似人类的知觉功能和反应能力。人的五种感觉器官分别是视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉，那么机器人传感器也应该具备这基本的五感。除此之外，人还可以感知方向、角度、距离等，具备这些能力的传感器对机器人来说也是必不可少的。

根据安装位置及检测对象的不同，机器人传感器可分为内部传感器和外部传感器两类。

内部传感器

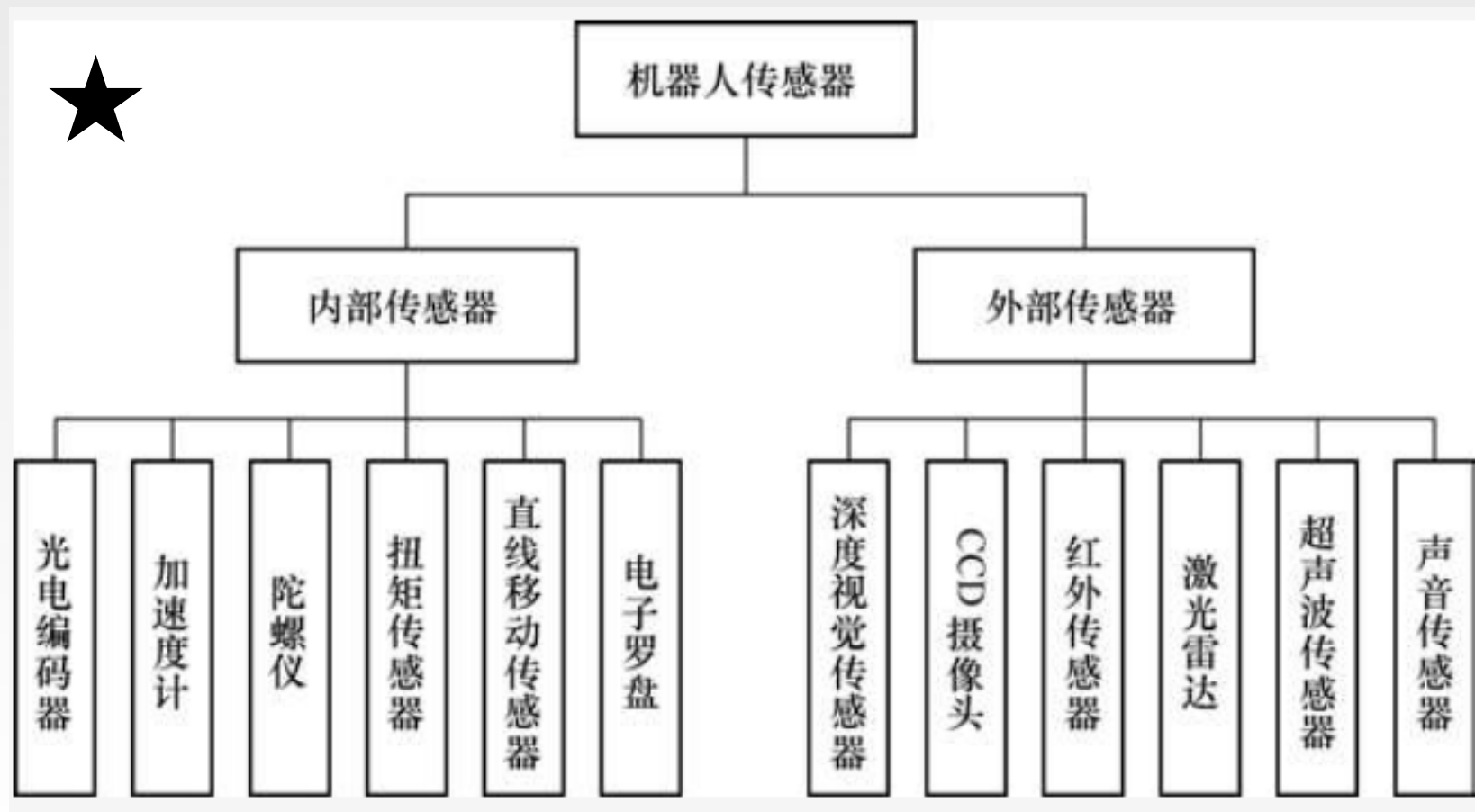
一般安装在机器人本体内部，主要检测内部运动及工作的实时情况，如电机的转速、机器人的倾斜角度、移动时的加速度等

外部传感器

一般安装在机器人本体表面，主要用来检测周围环境，使机器人能够获取外部信息，从而提升对环境的适应能力，如周围物体的颜色、障碍物的大小、位置及距离等。

机器人感知系统

常见的传感器名称如下：



内部传感器

★光电编码器

光电编码器是一种通过光电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器。光电编码器常用于电机转速和转动角度的测量。具有体积小，精度高，工作可靠，接口数字化等优点。它广泛应用于数控机床、回转台、伺服传动、机器人、雷达、军事目标测定等需要检测角度的装置和设备中。

原理

常见的光电编码器由光栅盘，发光元件和光敏元件组成。光栅实际上是一个刻有规则透光和不透光线条的圆盘，光敏元件接收的光通量随透光线条同步变化，光敏元件输出波形经整形后，变为脉冲信号，每转一圈，输出一个脉冲。根据脉冲的变化，可以精确测量和控制设备位移量。根据其刻度方法及信号输出形式，可分为增量式、绝对式以及混合式三种。



内部传感器

增量式编码器

增量式编码器是直接利用光电转换原理输出三组方波脉冲A、B和Z相；A、B两组脉冲相位差 90° ，从而可方便地判断出旋转方向，而Z相为每转一个脉冲，用于基准点定位。它的优点是原理构造简单，机械平均寿命可在几万小时以上，抗干扰能力强，可靠性高，适合于长距离传输。其缺点是无法输出轴转动的绝对位置信息。

绝对式编码器

绝对式编码器是直接输出数字量的传感器，在它的圆形码盘上沿径向有若干同心码道，每条码道上由透光和不透光的扇形区相间组成，码盘上的码道数就是它的二进制数码的位数，当码盘处于不同位置时，各光敏元件根据受光照与否转换出相应的电平信号，形成二进制数。这种编码器的特点是不需要像增量式编码器一样计算脉冲的个数，因为在任意位置都可读出一个与位置对应的固定数字码，相当于得到了一个角度值。

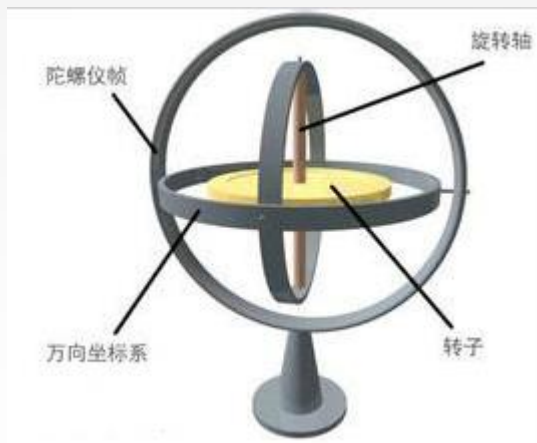
混合式绝对值编码器

混合式绝对值编码器，它输出两组信息：一组信息用于检测磁极位置，带有绝对信息功能；另一组则完全同增量式编码器的输出信息。

内部传感器

★陀螺仪

物体在高速旋转时，由于角动量很大，旋转轴会一直稳定指向一个方向，基于这种原理制成的定向仪器就称为陀螺仪。传统的陀螺仪是一种机械装置，广泛应用于航天与航海领域，其主要结构是将一个以极高角速度旋转的转子安装在一个万向坐标系内部，陀螺仪有两个平衡环，可以绕平面三轴作自由运动。陀螺仪是一种测量问题角速度的传感器。



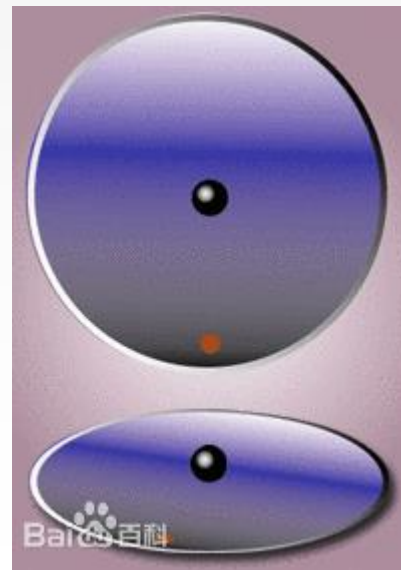
内部传感器

★微机械陀螺仪/加速度计

微机械MEMS是英文Micro Electro Mechanical systems的缩写，即微电子机械系统。建立在微米/纳米技术是指对微米/纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术。它可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成成为一个整体单元的微型系统。

微机械陀螺仪的工作原理与传统的陀螺仪不同，其主要利用科里奥利力，即旋转物体在有径向运动时所受到的切向力。最常见的方法是将一个角速度施加到振动的微型块上，产生科里奥利力会使微型块发生移动，这些位移可以通过电路检测为电容的变化，并最终转换为电压输出。

科里奥利力（Coriolis force）有些地方也称作哥里奥利力，简称为科氏力，是对旋转体系中进行直线运动的质点由于惯性相对于旋转体系产生的直线运动的偏移的一种描述。科里奥利力来自于物体运动所具有的惯性。



内部传感器

★微机械陀螺仪/加速度计

陀螺仪是一种测量物体角速度的传感器，物体线速度应该如何测量，这个问题是无法直接解决的，但是可以通过测量加速度，运用积分计算线速度。能够测量加速度的传感器称为加速度计，其理论基础就是牛顿第二定律。

基于MEMS技术的加速度计可分为以下几类：压阻式微加速度计、电容式微加速度计、扭摆式微加速度计和隧道式微加速度计。其中，电容式微加速度计是灵敏度最高、使用最广泛的一种，其原理是利用微型块加速运动时，受到惯性作用反向移动，其位移会引起感应器间的电容变化，并最终转换为输出电压。

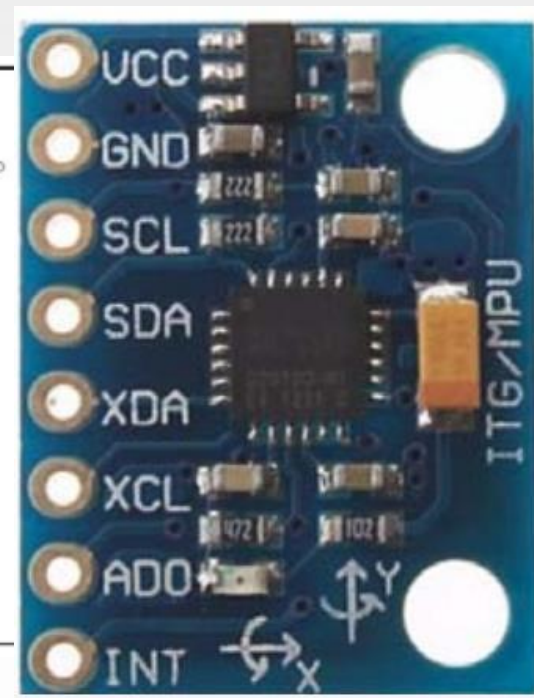
内部传感器

★微机械陀螺仪/加速度计

陀螺仪和加速度计的组合可应用于机器人的运动姿态检测领域，MPU-6000 (6050) 是全球首例整合性6轴运动处理组件，生产商是美国公司InvenSense，该传感器内置3轴加速度计和3轴陀螺仪，解决了组合陀螺仪和加速度计的封装问题，是一款革命性的产品。

陀螺仪的特性：

- (1) 以数字方式输出 X、Y、Z 轴角速率，有 4 种量程范围可以选择，分别为 $\pm 250^{\circ}/s$ 、 $\pm 500^{\circ}/s$ 、 $\pm 1000^{\circ}/s$ 和 $\pm 2000^{\circ}/s$ 。
- (2) FSYNC 引脚支持外部同步信号，包括图像、视频和 GPS 信号。
- (3) 集成 16 位 ADC 实现陀螺仪的同步采样。
- (4) 对温度变化稳定性较强。
- (5) 改善低频噪声性能。
- (6) 带有数字可编程低通滤波器。
- (7) 陀螺仪的工作电流：3.6mA。
- (8) 待命电流：5 μ A。
- (9) 工业级灵敏度校准。



外部传感器

★深度摄像头

深度摄像头与普通摄像头的区别在于,除了能够获取平面图像,还可以获得拍摄对象的深度信息,也就是三维的位置和尺寸信息,于是整个计算系统就获得了环境和对象的三维立体数据,这些信息可以用在人体跟踪、三维重建、人机交互、SLAM等领域。



intel RealSense™ Depth Camera D435是一款可以实现立体跟踪的摄像头,能够为各种应用场景提供高质量的深度图像,特别是它的广角视野非常适合机器人和虚拟现实等应用。这款小尺寸摄像头的射程可达10m,配置有一个RGB视觉传感器、一个IR(红外)发射器和两个IR成像器。摄像头采用“主动立体成像原理”,本质上就是模仿人类双眼的视差,通过发射一束红外光线,然后通过两个红外成像器接收红外光线在物体上的反射生成图像,最后用三角定位原理计算出包含三维深度信息的图像。同时,RGB视觉传感器采集彩色图像,最终将彩色视频流与深度流对齐。

外部传感器

★激光雷达

激光雷达是一种利用非接触激光测距技术的扫描式传感器，其工作原理与一般的微波雷达系统类似，首先向周围发射激光光束，然后收集反射回来的光束并与发射的光束比较，处理后得到二维或三维的点云数据，采用这项技术，可以准确地获取周围物理空间的环境信息，测距精度可达厘米级。因此，激光雷达广泛应用于汽车自动驾驶、移动机器人定位导航等领域。

市面上的激光雷达产品主要分为三角测距激光雷达和TOF(飞行时间)激光雷达两种。

外部传感器

★三角测距激光雷达

三角法的原理并不复杂，由激光器发射的激光在遇到障碍物后反射，并由线性电荷耦合器件(CCD)接收。激光发射器和接收器之间存在一定的距离，由于光线是直线传播，因此不同距离的物体在CCD上的成像位置有所差异。运用平面几何中的三角公式，就能计算出被测物体的距离。目前，国内主流的三角测距激光雷达为360°旋转测距，扫描频率为5~15Hz，测量频率在8000次/秒左右，可以生成范围在10~25m障碍物的二维点云图，测量精度一般在1%左右。



外部传感器

★TOF(飞行时间)激光雷达

TOF激光雷达的原理更加简单，激光器发射一个激光脉冲，并由计时器记录发射的时间，激光遇到障碍物反射后经接收器接收，此时计时器记录返回的时间。两个时间相减即得到光的“飞行时间”，结合光的速度很容易计算出障碍物的距离。国内销售的TOF激光雷达测量范围一般在20~40m, 测量精度在厘米级，数据采集频率最高可达100kHz, 销售价格较百元级别的三角测距激光雷达要高得多。



PAVO激光雷达

机器人通信系统

通信系统可以实现机器人个体内部或者机器人个体之间的协调工作，从形态结构上可以分为有线通信和无线通信两种。

★有线通信

有线通信最先被发明，狭义上现代的有线通信是指有线电信，即利用金属导线、光纤等有形介质传送信息的方式。光或电信号可以代表声音、文字、图像等。按照传输数据的方式划分，可以分为串行总线和并行总线。常见的串行总线：I2C、SPI、RS232、UART、USB等。

常见的并行总线：STD、PC总线、IEEE488总线。

★无线通信

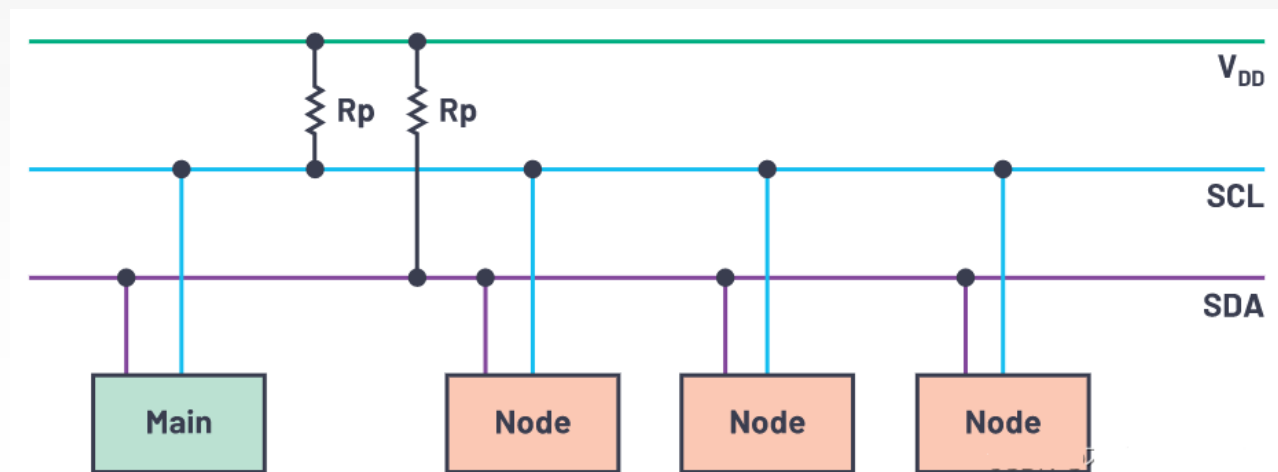
无线通信是指多个节点之间不需要通过导体或缆线连接而进行的远距离传输通信，目前机器人常用的无线通信技术主要有ZigBee、WiFi、蓝牙和2.4GHz无线数传这几种。

机器人通信系统

★有线通信

I2C总线是由Philips公司开发的一种简单、双向二线制同步串行总线。它只需要两根线即可在连接于总线上的器件之间传送信息。

主器件用于启动总线传送数据，并产生时钟以开放传送的器件，此时任何被寻址的器件均被认为是从器件。在总线上主和从、发和收的关系不是恒定的，而取决于此时数据传送方向。如果主机要发送数据给从器件，则主机首先寻址从器件，然后主动发送数据至从器件，最后由主机终止数据传送；如果主机要接收从器件的数据，首先由主器件寻址从器件，然后主机接收从器件发送的数据，最后由主机终止接收过程。在这种情况下，主机负责产生定时时钟和终止数据传送。

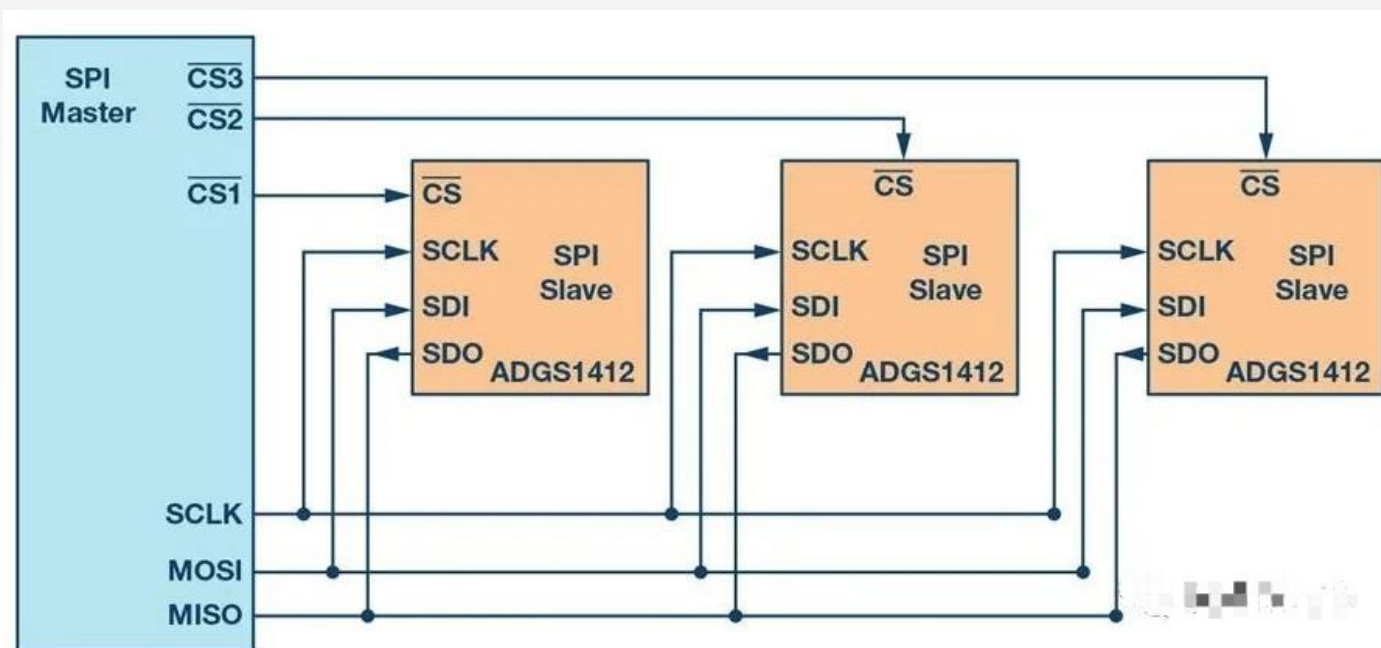


机器人通信系统

★有线通信

SPI 是由摩托罗拉(Motorola)公司开发的全双工同步串行总线，是微处理控制单元(MCU)和外围设备之间进行通信的同步串行端口。主要应用在EEPROM、Flash、实时时钟(RTC)、数模转换器(ADC)、网络控制器、MCU、数字信号处理器(DSP)以及数字信号解码器之间。

SPI 系统可直接与各个厂家生产的多种标准外围器件直接接口，一般使用4 条线:串行时钟线SCK、主机输入/从机输出数据线MISO、主机输出/从机输入数据线MOSI 和低电平有效的从机选择线CSS。



机器人通信系统

★有线通信

RS-232标准接口（又称EIA RS-232）是常用的串行通信接口标准之一，它是在1970年由美国电子工业协会(EIA)联合贝尔系统、调制解调器厂家及计算机终端生产厂家共同制定的用于串行通讯的标准。它的全名是“数据终端设备(DTE)和数据通讯设备(DCE)之间串行二进制数据交换接口技术标准”该标准规定采用一个25个脚的DB-25连接器，对连接器的每个引脚的信号内容加以规定，还对各种信号的电平加以规定。后来IBM的PC机将RS232简化成了DB-9连接器，从而成为事实标准。而工业控制的RS-232口一般只使用RXD、TXD、GND三条线。

串口通信最重要的参数是波特率、数据位、停止位和奇偶校验。对于两个进行通信的端口，这些参数必须匹配。

机器人通信系统

★无线通信

ZigBee无线通信技术是基于蜜蜂相互联系的方式而研发生成的一项应用于互联网通信的网络技术，主要用于距离短、功耗低且传输速率不高的各种电子设备之间进行数据传输以及典型的有周期性数据、间歇性数据和低反应时间数据传输的应用。它具有以下特点。

执低功耗：由于ZigBee的传输速率低，发射功率仅为1mW，而且采用了休眠模式，两节5号电池可以维持6-24月。

低成本： ZigBee模块的初始成本在6美元左右，估计很快就能降到1.5—2.5美元，并且协议是免专利费的。

低时延： 通信时延和从休眠状态激活的时延都非常短，典型的搜索设备时延30ms，休眠激活的时延是15ms，活动设备信道接入的时延为15ms

低速率： ZigBee工作在20~250kbit/s的速率，分别提供250kbit/s (2.4GHz)、40kbit/s (915 MHz) 和20kbit/s (868MHz) 的原始数据吞吐率，满足低速率传输数据的应用需求。

高容量： 一个星型结构的Zigbee网络最多可以容纳254个从设备和一个主设备， 一个区域内可以同时存在最多100个ZigBee网络，而且网络组成灵活。

高安全。 ZigBee提供了三级安全模式，包括安全设定、使用访问控制清单防止非法获取数据和采用高级加密标准的对称密码。

机器人通信系统

★无线通信

WiFi是一个创建于IEEE802.11标准的无线局域网技术，英文全称为wireless fidelity，中文意思是无线保真，在无线局域网的范畴是指“无线相容性认证”，实质上是一种商业认证，同时也是一种无线联网的技术。**WiFi**使用的频段为2.4GHz\5GHz，其最大优点是传输速度较快，一般可达150Mbit/s。此外，WiFi的可靠性较高，与有线以太网整合十分方便，组网成本较低，因此在民用领域用途广泛，手机、平板电脑、PC等都支持WiFi功能。目前，全球WiFi芯片主要生产商有博通（Broadcom）、英特尔（Lantiq）、高通（Qualcomm）、美满（Marvell）和宽腾达（Quantenna），我国的WiFi模块生产商有华为、锐捷、联发科等，一般的WiFi模块都可以通过串口与单片机相连。

机器人通信系统

★无线通信

蓝牙是世界著名的5家大公司——爱立信 (Ericsson)、诺基亚(Nokia)、东芝(Toshiba)、国际商用机器公司 (IBM)和英特尔(Intel)于1998年5月联合宣布的一种无线通信技术,主要适用于短距离通信,能够在包括移动电话、PDA、无线耳机、笔记本电脑、相关外设等众多设备之间进行无线信息交换,有效地简化了移动通信终端设备之间的通信。蓝牙在全球通用的2.4GHzISM(即工业、科学、医学)频段工作,使用IEEE802.11协议。蓝牙设备的最大发射功率分为100mW、2.5mW和1mW三种,传输距离为0.1~10m。当两个设备通过蓝牙连接时,一个设备作为主机,另一个设备作为从机。

例如,手机与蓝牙音箱配对时,手机作为主机,音箱则作为从机。蓝牙芯片的生产商有英国CSR(2014年被高通收购)、美国TI、中国台湾瑞昱等。蓝牙模块和WiFi模块一样,都带有串口引脚,可以与单片机相连。

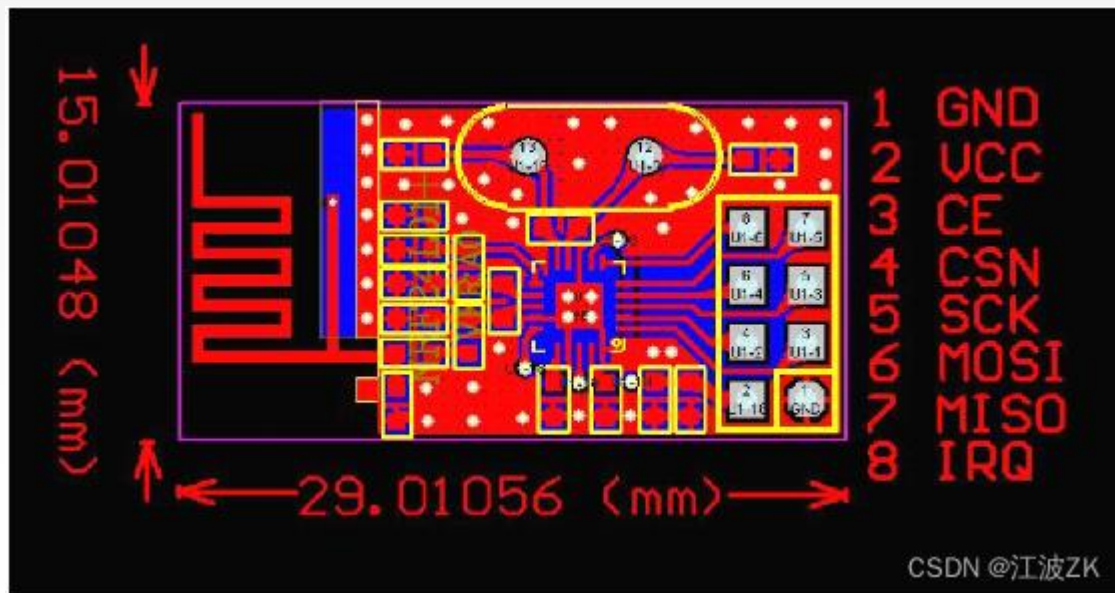
机器人通信系统

★无线通信

2. 4G无线数传：前面介绍的Zigbee、WiFi和蓝牙通信技术具有各自的优点，但是，如果只需要点对点的控制，使用这三种方式就显得大材小用，在这种情况下可以选择不带任何网络协议的普通2.4GHz无线数传方式，目前广泛用于遥控玩具领域的是基于nRF24L01芯片的模块，该芯片的生产商是挪威公司Nordic，采用FSK 调制，集成NORDIC自家的Enhanced Short Burst协议。可以实现点对点或是1对6的无线通信。无线通信速度最高可达到2Mbps。NRF24L01采用SPI通信，可以很方便的连接到MCU上面。

NRF24L01的特点

- ①2.4G全球开放的ISM频段，免许可证使用。
- ②最高工作速率2Mbps，高校的GFSK调制，抗干扰能力强。
- ③126个可选的频道，满足多点通信和调频通信的需要。
- ④内置CRC检错和点对多点的通信地址控制。
- ⑤可设置自动应答，确保数据可靠传输。



章节习题

1. 简述人工智能的概念。
2. 简述机器人的概念。
3. 简述智能机器人与一般机器人的主要区别。
4. 简述智能机器人的经典架构。
5. 简述发展智能机器人网联云控架构的必要性。
6. 在你所在城市寻找服务机器人的应用案例，亲自体验并总结其优点与缺点。
7. 了解我国的火星探测计划，以及我国“天问一号”火星车具备的主要功能。
8. 简述位姿的概念。
9. 了解位姿的合成
10. 二维坐标系的平移向量和旋转矩阵分别是什么？
11. 分别以坐标系的X轴、Y轴、Z轴为旋转轴，设旋转角度为 θ ，求对应的旋转矩阵。
12. 简述增量式光电编码器的工作原理。
13. 根据安装位置及检测对象的不同，机器人传感器可分为哪两类？
14. 市面上的激光雷达产品主要分为哪两种？家用扫地机器人一般选用哪种激光雷达？