

农业生物机器人技术



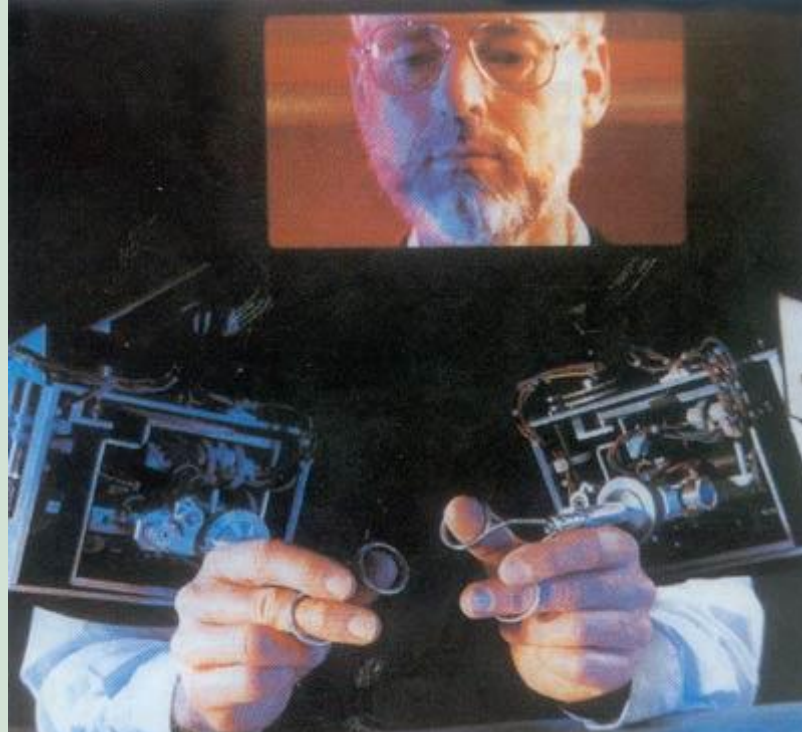
序言——机器人



机器人乐队



机器人导游



机器人手术



机器人牙医



机器人护士助理





机器人救援



工业机器人



喷涂机器人





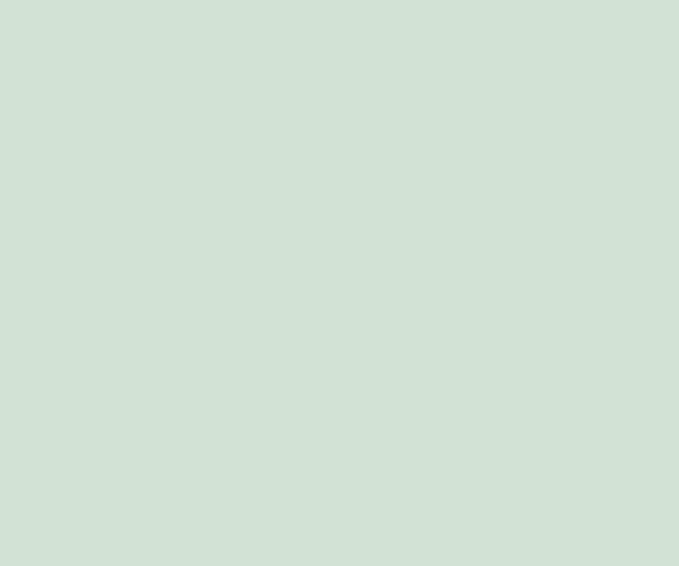
机器人清洗



机器人挖树根







Big Dog



课程主要内容

- 第一章 机器人概述
- 第二章 农业机器人基本情况
- 第三章 传感器
- 第四章 机器人运动学
- 第五章 农业机器人事例
- 第六章 机器人的总体和机械结构设计



第一章、机器人概述

1、什么是机器人

- 机器人不是人，一般的理解，机器人是具有一些类似人的功能的机械电子装置或者叫自动化装置。机器人的定义仍然没有一个统一的意见。

一般定义：

由程序控制，具有人或生物的某些功能，可以代替人进行工作的机器。

- 美国机器人协会(RIA—Robot Institute of America):
一种用于搬运材料、部件、工具或其它特种装置的可重复编程的多功能的操作机。
- 日本工业机器人协会(JIRA—Japanese Industrial Robot Association):
一种带有存储器件和末端执行器的通用机械，它能够通过自动化的动作替代人类劳动。
- 世界标准化组织(ISO):
机器人是一种能够通过编程和自动控制来执行诸如作业或移动等任务的机器。
- 中国(原机械工业部):
工业机器人是一种能自动定位控制、可重复编程、多功能多自由度的操作机，它能搬运材料零件或夹持工具，用以完成各种作业。

- 机器人的定义仍然没有一个统一的意见。原因之一是机器人还在发展，新的机型，新的功能不断涌现。根本原因主要是因为机器人涉及到了人的概念，成为一个难以回答的哲学问题。

- 森政弘与合田周平提出的：“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性等7个特征的柔性机器”。



2、仿人机器人应具备的条件：

- 1)、具有脑、手、脚等三要素的个体；
- 2)、具有非接触传感器（用眼、耳接受远方信息）和接触传感器；
- 3)、具有平衡觉和固有觉的传感器。

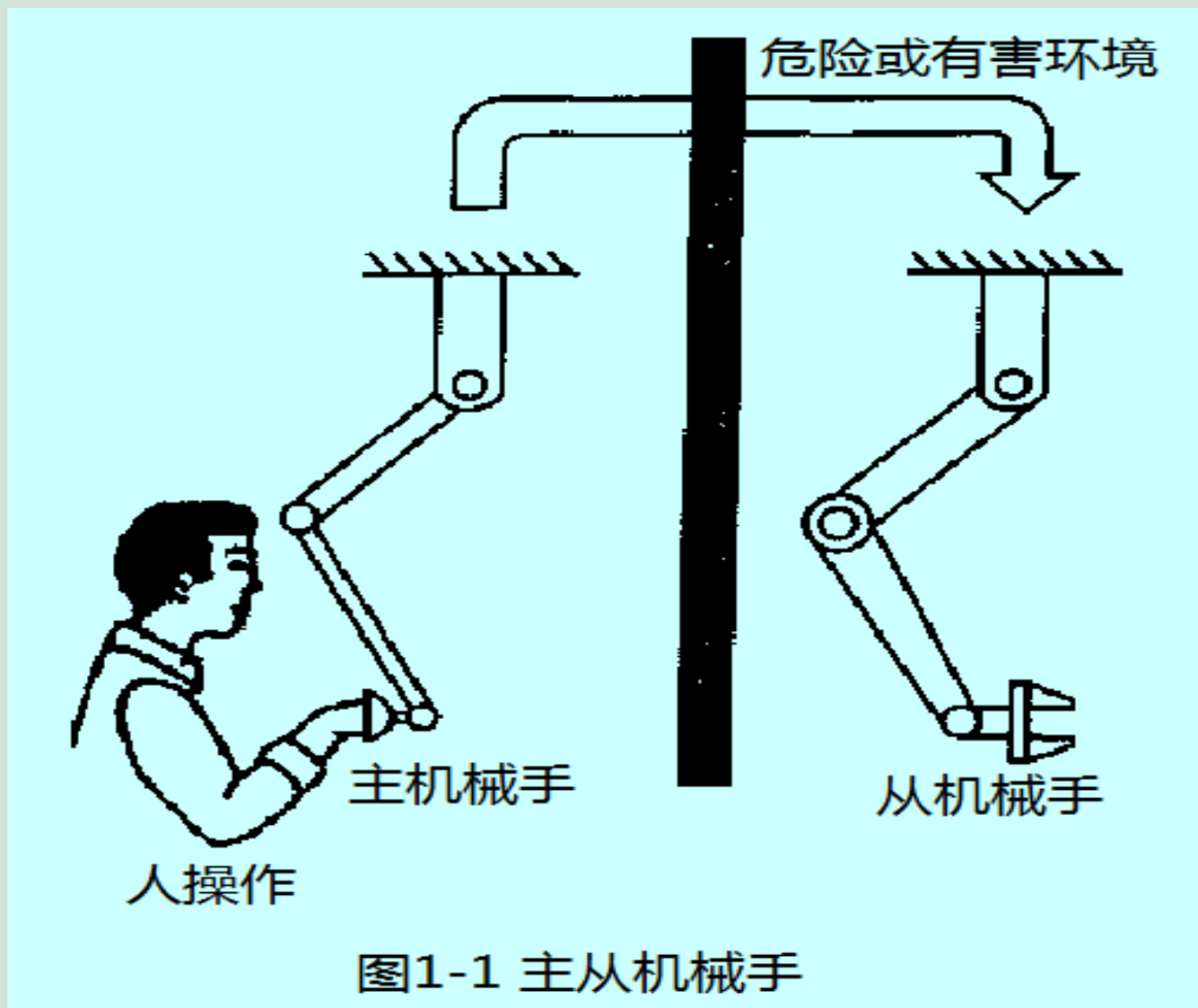


3、机器人的由来

机器人——来自于1920年捷克斯洛伐克作家卡佩克的一个科幻内容的小说，叫《罗萨姆的机器人万能公司》。这本小说中他构思和幻想了一个机器人，它的名字叫罗伯特 (Robota捷克文：苦力、劳仆)，也就是我们英文中的Robot，它可以不吃饭，它能够不知疲劳的，不知疲倦地进行工作。



- 1947年产生了世界上第一台主从遥控的机器人



- 1962年美国研制成功PUMA通用示教再现型机器人，标志着机器人走向成熟，（第一台机器人名叫Unimate）

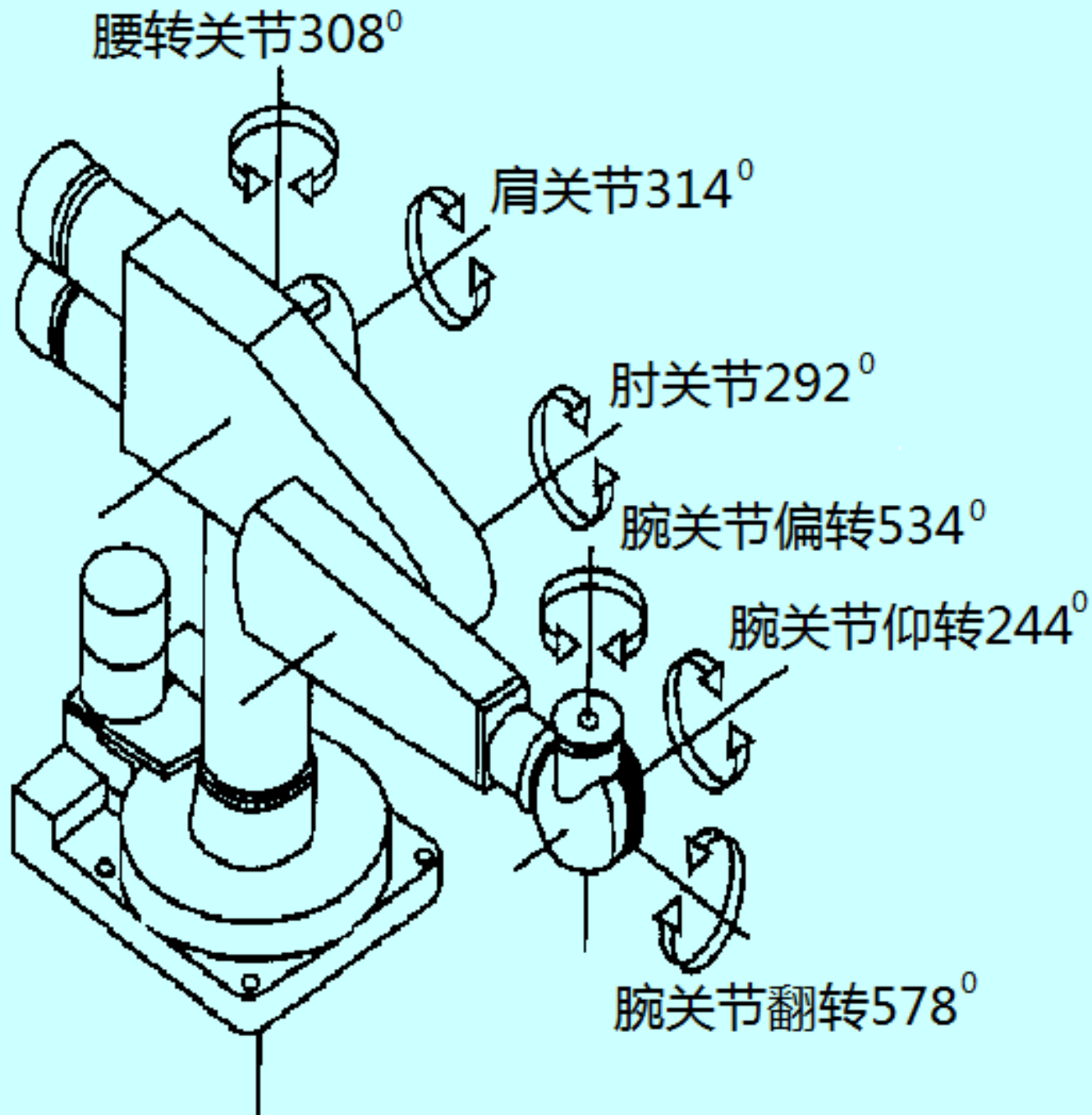


图2-2 PUMA562型机器人

4、机器人技术产生的背景：

- 1)、机器人技术的发展，是生产力发展需求的必然结果，也是人类自身发展的必然结果。
- 2)、机器人技术的发展，是一个科学技术发展共同的一个综合性的结果，同时，为社会经济发展产生了一个重大影响的一门科学技术。
- 3)、电子技术，计算机技术以及制造技术等相关技术的发展也为机器人技术提供了强大的技术保证。

5、为何要发展机器人

- 1) 可以代替人做人不愿意干的事:
- 2) 可以做不好干的活:
- 3) 完成不适合人直接干、干不了和干不好的一些工作: 这也是非常重要的机器人发展的一个理由。



6、各国发展机器人技术的主要原因

(1) 发展机器人可以提高综合国力。

1) 发展工业机器人可以增强一个国家的制造能力

2) 发展特种机器人可增强国家的可持续发展能力

3) 智能机器人做为新一代生产和服务工具，在制造领域和非制造领域占有更广泛、更重要的位置，这对人类开辟新的产业，提高生产与生活水平具有十分现实的意义。

6、各国发展机器人技术的主要原因

- **（2）** 发展机器人技术可以提高国防实力。
- **（3）** 发展机器人可以形成一个巨大的产业。
- **（4）** 发展机器人可以提高一个国家的国际地位。



7、机器人的发展过程

(1) 三个阶段

1)第一代机器人：可编程的示教再现型机器人

它是通过一个计算机，来控制一个多自由度的一个机械，通过示教存储程序和信息，工作时把信息读取出来，然后发出指令，机器人可以重复的根据人当时示教的结果，再现出这种动作

2) 第二代机器人：带感觉的机器人；

基于传感器控制具有一定自主能力的机器人；

3) 第三代机器人：智能机器人

- 那么只要告诉它做什么，不用告诉它怎么去做，它就能完成运动，感知思维和人机通讯的这种功能和机能。



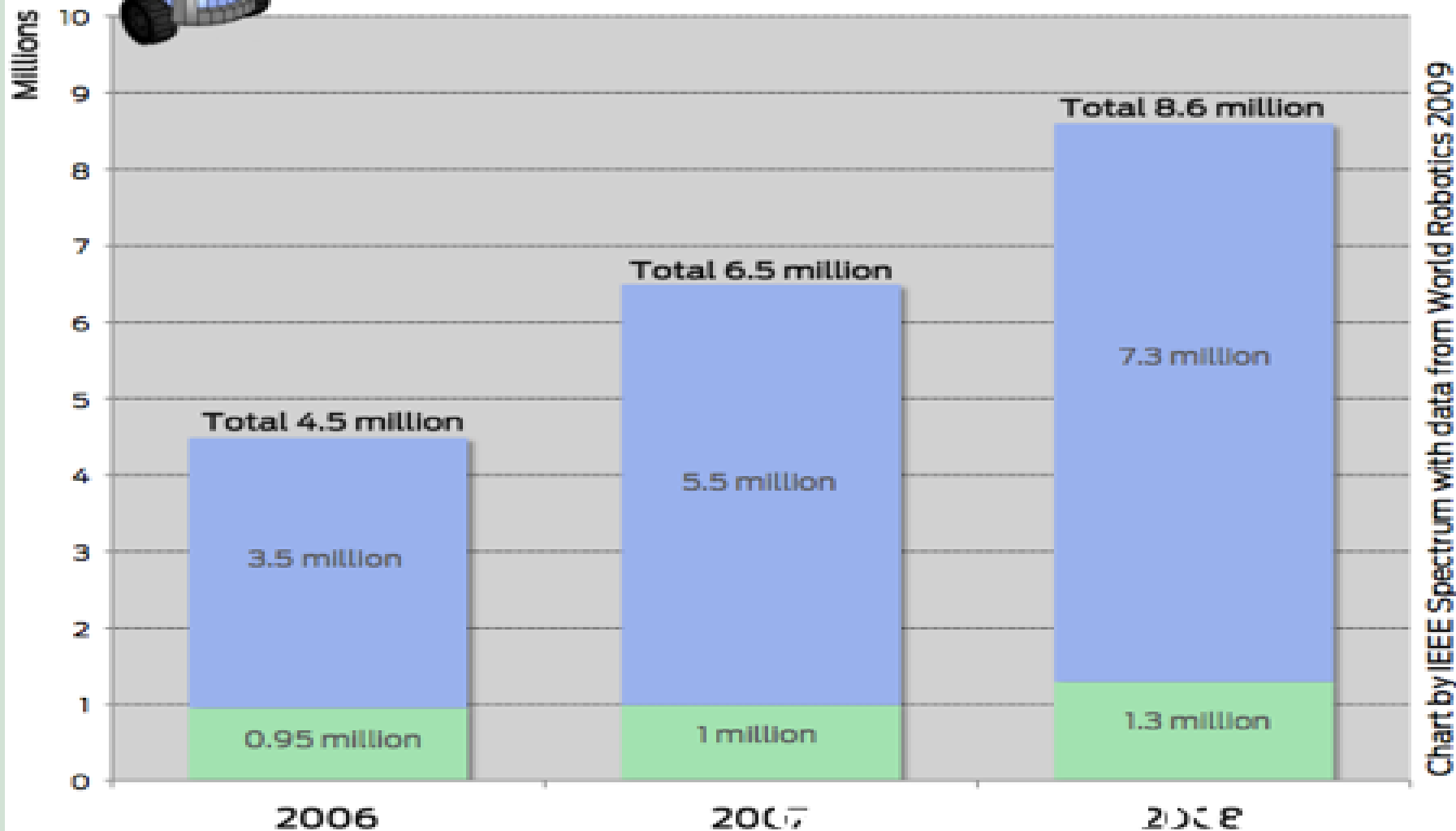
（2）机器人发展的数量

- 据美国电气和电子工程师协会（IEEE）报道，根据World Robotics统计，截至2008年，全球机器人数量已达860万个，其中工业机器人130万台，服务机器人730万个。
- 根据《世界机器人》统计，截至2013年，全球机器人数量已超过1000万个，其中工业机器人170万个，服务机器人830万个。



World Robot Population

Service Robots
Industrial Robots



从2008年到2013年，工业机器人数量由130万增加到170万，服务机器人则由730万增加到830万，机器人的总数量增加了16%。

第二章、农业机器人基本情况

- 1、从农业机械到农业机器人
- 农业机械对农业做出了巨大贡献，给农业带来了巨大变革；
- 存在许多难以实现机械化的作业，如按顺序依次摘取成熟的柔软果实的作业，包装作业，嫁接，插条等需要人的手指完成的精细农业，剪枝等需要辨识复杂形状并需要直觉判断的作业，挤奶作业，等等；
- 需要改变传统的农业机械的概念，新一代机械需要拥有人类的五官或超过五官的感知能力具有对传感器收集的信息进行恰当判断的能力，以及利用拥有与人的上肢近似形状的结构进行作业的能力，这就是农业机器人(Agricultural Robot)



播种机械



移植机械



种植



苗期管理



田间管理机械



成熟



准备收获



收获机械



耕耘机械



播种准备



生物圈
种子发芽、成长、结果
BC过程：
生物学(Biology)
与化学(Chemistry)



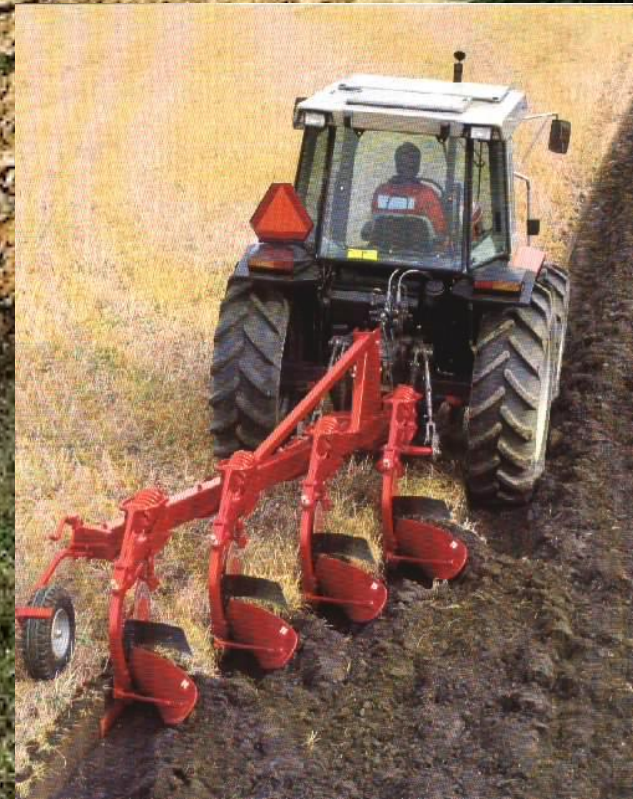
食料、种子

农产品加工 收获

资源环境
M过程：农业机械
完成耕、种、收等



通过科学的种植和管理培育出优质绿色农产品











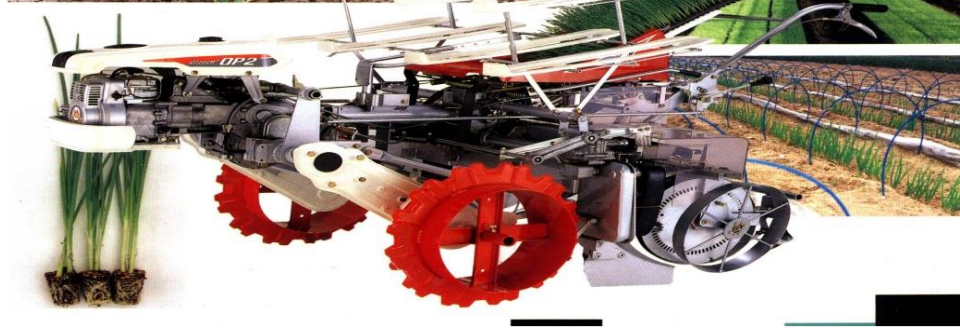


育苗移栽对气候有补偿作用，可充分利用光热资源。





旱地育苗移栽是一项农业高新技术、增产措施。









噴灌









■ 2、什么是农业机器人？

与农业生产相关的、拥有像手臂一样多自由度机构的机械系统，具有高度感知与判断等机能的自动机械以及虽然外形仍为传统农业机械但可以自主移动的机械，称为农业机器人。

■ 3、研究农业用机器人的原因

- (1)：尽管有许多农业作业已经实现了机械化，但仍有许多危险的、劳动强度大的和单调乏味的工作不适合人去做，需要一定的与人一样的智能去完成，如喷药作业，畜舍清理作业等。

(2) 生产率的提高：农业的生产率很低，为非农业的四分之一左右。主要原因是劳动力费用占用了农业生产费用的50%。因此，农业生产率的提高是急待解决的研究课题。

(3) 解决劳动力不足的问题: 蔬菜、水果生产的挑选、水果收获等作业80%是手工作业, 并且时间集中, 各种作业也需要劳力。由于城市化的发展, 劳动力的解决是非常困难的。引进农业用机器人是非常必要的。

(4) 作业者的安全、卫生环境改善。防除作业由于使用农药剂, 危及到作业者的身体健康。此外, 畜舍的清扫、蔬菜果树的各种作业也是非常辛苦劳累的。

(5) 作业质量的提高。



(6) 机械的通用性的提高。利用机器人的多自由度的、高通用性基体，通过改变软件和部件，可以对应多种作业。

(7) 大型机械所带来的问题的解决。欧美为了追求生产率，而使用大型机械。这带来了对土地的碾压，能量的消耗等问题。因此，利用日本拿手的小型机械技术，来生产小型机器人，让其昼夜工作，并可同时多台工作，依此进行大规模的农业经营。

(8) 无人化作业

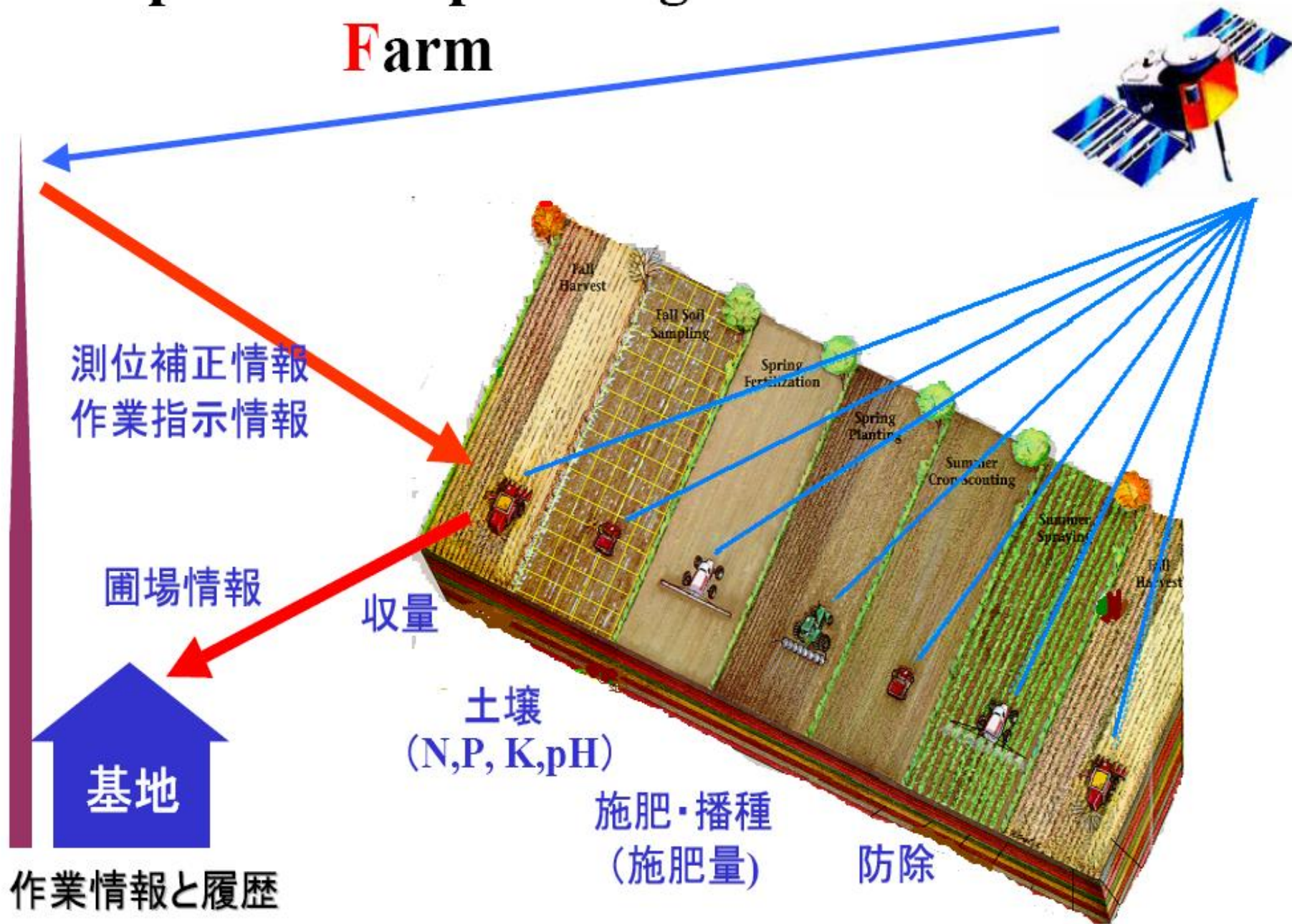
(9) 精确农业的需求

生长状态，叶片颜色等



Site Specific Crop Management Farm

Satellite



4、对农业生物机器人的特殊要求

1) 具有对作业对象的识别能力

需要处理大小、形状、颜色和表面特征动态变化的对象。

植物、动物和食品的可能形态是多样、复杂，目标对象常是随机地处于一个三维空间，随着植物的生长以及其它外部因素如风、机器和作业人员等的影响，这些位置可能发生改变。

2) 视觉功能的智能化

果实收获作业时，能够在枝、叶等复杂环境中识别出果实。



(a)



(b)



3) 准确判断作业对象的位置

为机器人动作（路径规划、移动目标）提供依据。

4) 需要判断果实的成熟度

收获成熟的果实（成熟度的不一致性）

5) 作业手爪有时要求具有柔软性能

作业对象后期加工过程中的品质保持，在设计机器人时，需要仔细考虑和研究机器人接触或变化对生物体的影响。



6) 在田间作业时应具有自动引导行走功能
需要在行走的过程中，同时进行作业

7) 安全、可靠

农作业季节性很强，作业期间短；

作业对象为生物体等。

8) 结构简单、价格便宜

使用者为农业生产者，要求操作方便，成本低廉。

5、农业机器人发展现状

■ 5.1 国外发展情况

- **(1) 日本：** 是研究农业机器人最早的国家之一。日本的农业机器人技术发展也最为成熟，已研制出多种农业生产机器人，如嫁接机器人、育苗机器人、农药喷洒机器人、施肥机器人、番茄采摘机器人、移栽机器人、黄瓜采摘机器人和葡萄采摘机器人等，理论与应用都居世界前列。
- **(2) 美国：** 农业机器人技术发展也非常快。由于美国自身科学技术发达，领土广阔，农业机械化程度很高，其行走式农业机器人理论技术发展得非常成熟。

5.1 国外发展情况

- **（3）西班牙：** 发明的采摘柑橘机器人由一台装有计算机的拖拉机、一套光学视觉系统和一个机械手组成，能够从橘子的颜色、大小判断出是否成熟并决定能否采摘。它每分钟摘柑橘**60**个，是人工采摘的**7**倍。另外，采摘柑橘机器人能够依靠装有视频箱的机械手对当即采摘的柑橘按大小进行分类。
- **（4）英国：** 西尔索研究所开发的采蘑菇机器人装有录像机、红外线测距仪和视觉分析软件，能够首先确定哪些蘑菇可以采摘以及属于哪种等级，然后测出其高度以便进行采摘。它每分钟能摘蘑菇**40**个，比手工快**2**倍。

5.1 国外发展情况

- **(5) 法国：**研制的分拣机器人能在潮湿的环境里工作，把大个番茄和小粒樱桃加以区别，然后分别装运开来。它还可以用来分拣不同大小的土豆，并不会碰坏它们。
- **(6) 丹麦：**研制出田间除草机器人，可大幅度减少除草剂的施用。该种机器人有4个轮子，由电池驱动。使用1台照相机来完成地面扫描，通过识别软件，使用15种不同的参数来描述杂草的大小和对称性等外部特征，通过GPS给杂草定位。科学家认为，要把杂草和庄稼没用错误地区分开是个非常难的问题，因此，还需要更多的研究。

5.1 国外发展情况

- **(7) 澳大利亚：**剪羊毛机器人是20世纪80年代中期澳大利亚制造出来的世界上第一个可以在活的动物身上进行作业的机器人，他用一只手按住羊的头部，用两只手按住羊的脚，把羊按在专用的平台上，还有两只手拿着两把剪刀，贴着羊的身子飞快地剪羊毛。

■ 5.2 国内发展情况

- 近年来，我国对农业机械机器人的研发也取得显著成绩，主要有耕耘机器人、除草机器人、施肥机器人、喷药机器人、蔬菜嫁接机器人、收割机器人、采摘机器人等。

6、现在已开发出的农业用机器人

■ (1) 耕耘作业机器人

一般是在原有的拖拉机上添加方位传感器、控制装置等自动调节机构，使之能辨别、判断自身位置和方向、能进行转向控制等。



■ (2) 农药喷撒机器人

主要是防止农药对人体的危害。除了可以根据地形进行喷撒作业，还可以判断树木的状态、气象条件，判断控制喷撒。



■ (3) 搬运作业机器人

可在园内自由自在地行走，对于要收获的物品，可以进行堆积、运送、搬运到所指定的地点。



西红柿、黄瓜、结球菜、柑桔

■ (4) 收获及管理机器人

可在园内自由行走，判断果实、蔬菜的熟度，并检测其位置，然后采摘。以及判断和认识枝体、果实，进行必要的修整、摘除。



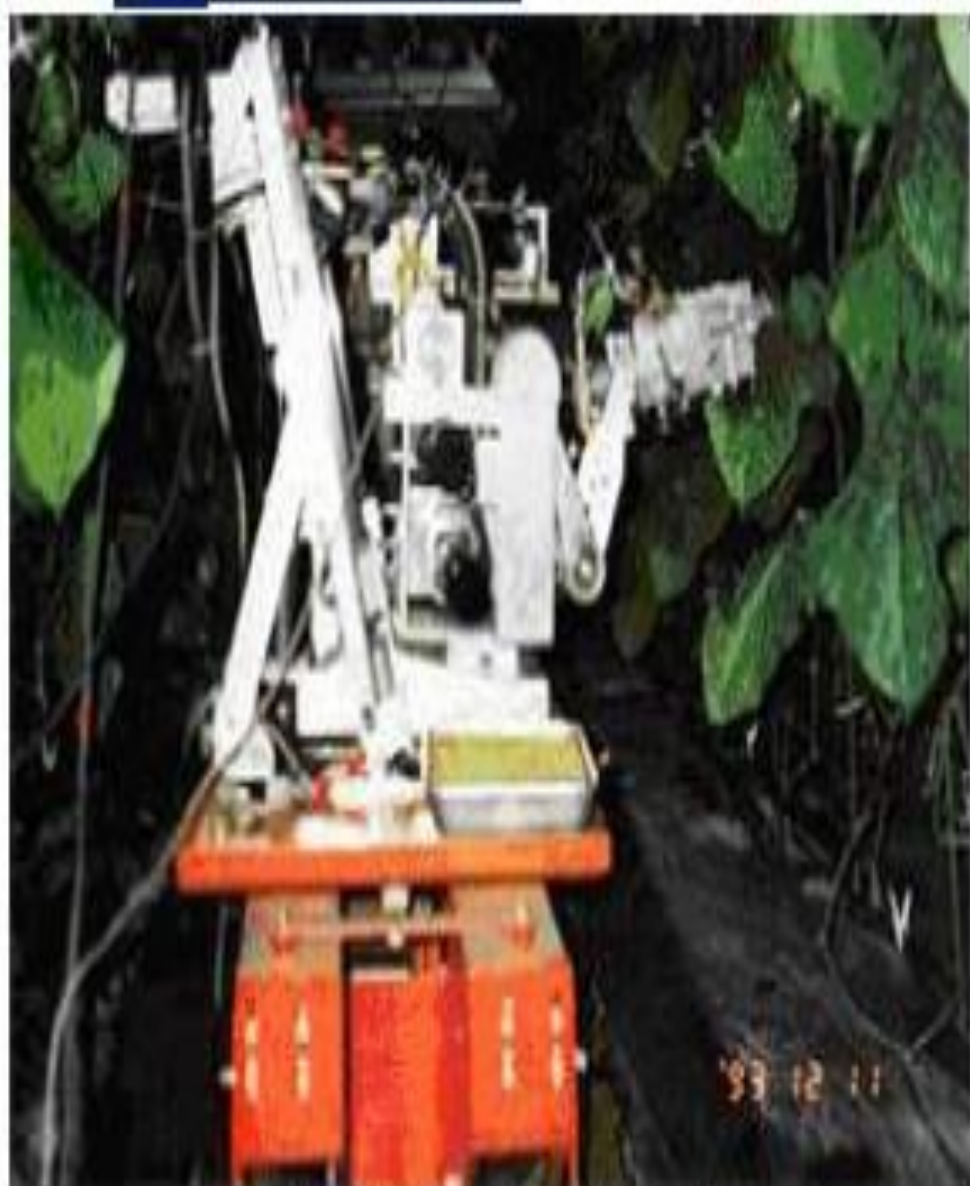


图3 日本研制的黄瓜收获机器人

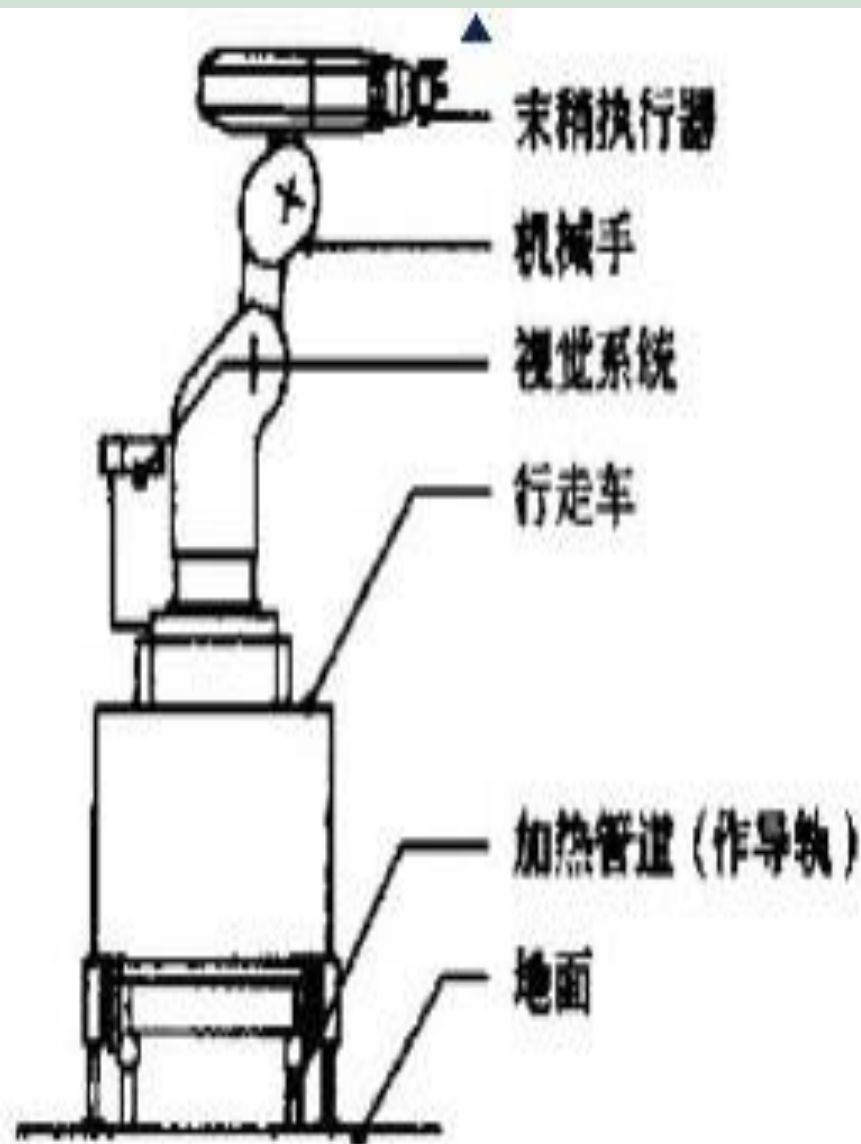


图4 自走式黄瓜收获机器人

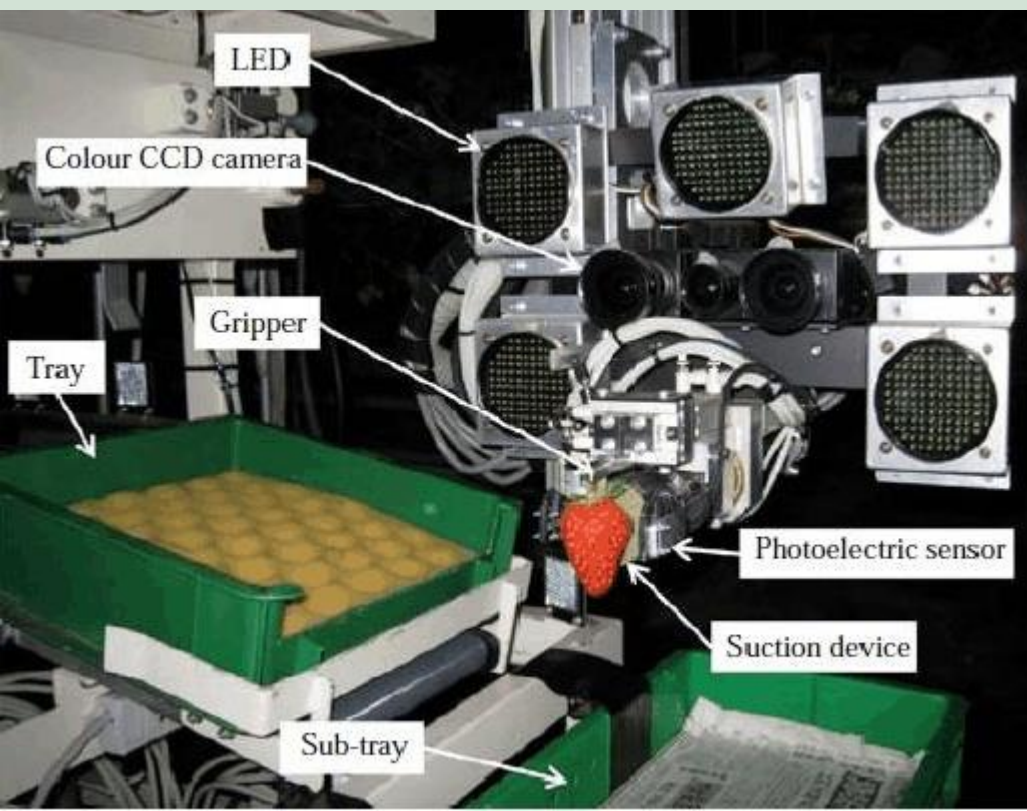
番茄收获机器人

是采用彩色摄像机作为视觉传感器寻找和识别成熟果实。采用7个自由度的机械手完成采摘作业。



草莓采摘机器人

- 机器人的视觉系统与番茄采摘机器人相似，末端执行器采用真空系统加螺旋加速切割器。



葡萄采摘机器人

- 5个自由度的极坐标机械手，末端的机械臂可以在葡萄架下水平匀速运动。传感器一般采用彩色摄像机。



■ (5) 室内管理、移栽机器人

在植物工厂内，通过传感器，检测出温度和湿度等栽培条件，进行自动控制以及必要的作业。

■ (6) 嫁接机器人

可实现切断、合位和接苗三个环节。提高作业速度。





台木苗

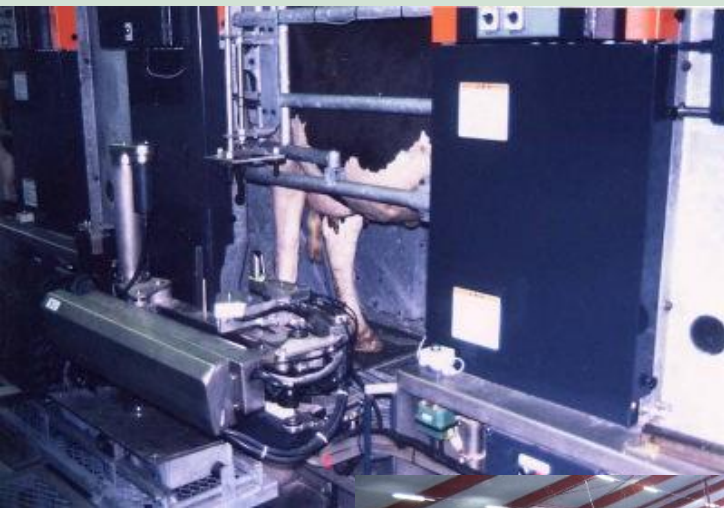
穂木



接合クリップ



(7) 挤奶机器人



(8) 其他机器人



除草机器人



水稻移栽机器人



剪羊毛

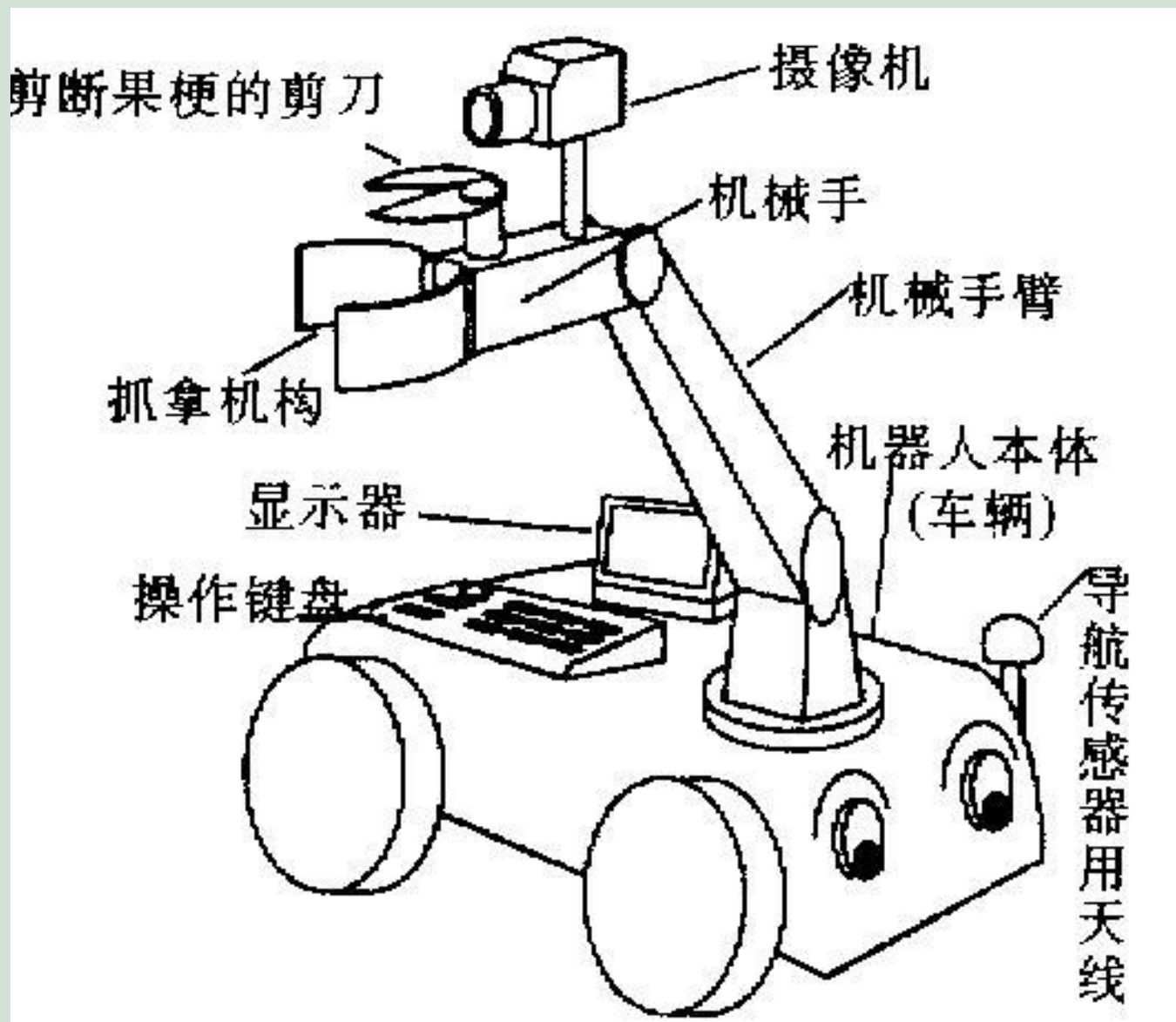


剪羊毛机器人

7、农业用机器人所需的技术

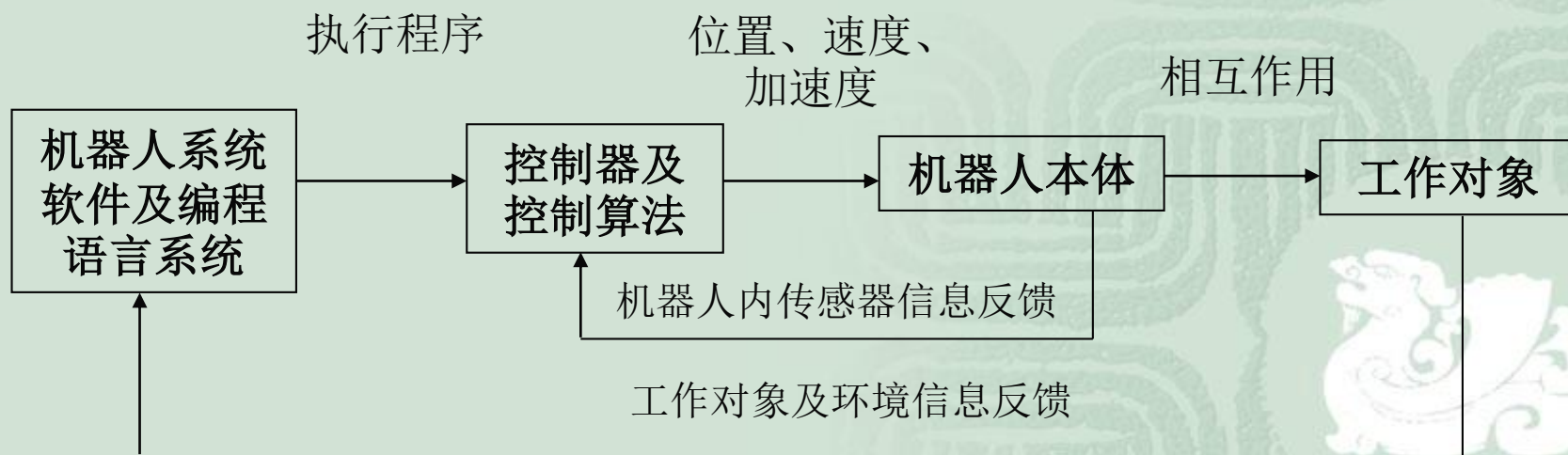
技术项目	技术内容	相当于人类的部位	作用
走行技术	由于作业对象物不动,所以需将作业物体移动到其附近	脚	可以自由的行走
视觉技术	检知作业对象物	目	判断对象物的有无以及其位置
作业部的动作及控制 ① 作业部 I (手) ② 作业部 II (臂)	向对象物施加所要达到的目的动作 ① 直接作用于对象物(抓,摘取等) ② 带动手来完成相应的动作	手,指 臂(从腰到腕)	具体地进行相应的动作
智能,控制	控制前3项,进行判断和指示	头脑	走行控制,作业顺序的控制,作业开始和结束的判断

8、农业生物机器人系统的基本组成



8、农业生物机器人系统的基本组成

- 机器人系统是由机器人和作业对象及环境共同构成的。
- 机器人由机器人本体、控制器和软件三大部分构成；为获取作业对象及环境信息还需要传感器系统。
- 机器人系统的构成：如图所示：



1) 机器人本体


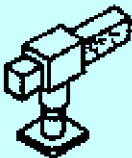
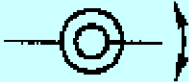


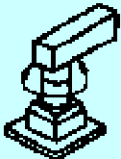
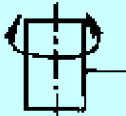
- 机械手、移动机构——两部分构成
- 单独存在的机械手或移动机构也称为机器人。
- (1) 机械手是由手臂和末端执行器组成
 - ∞ 手臂通过关节的运动使末端执行器进行预定的运动或达到预定的位置。
 - ∞ 末端执行器直接作用于任务对象，它是手部、抓持机构、手爪及固定于手臂末端的工具等的总称。

(1) 机械手组成

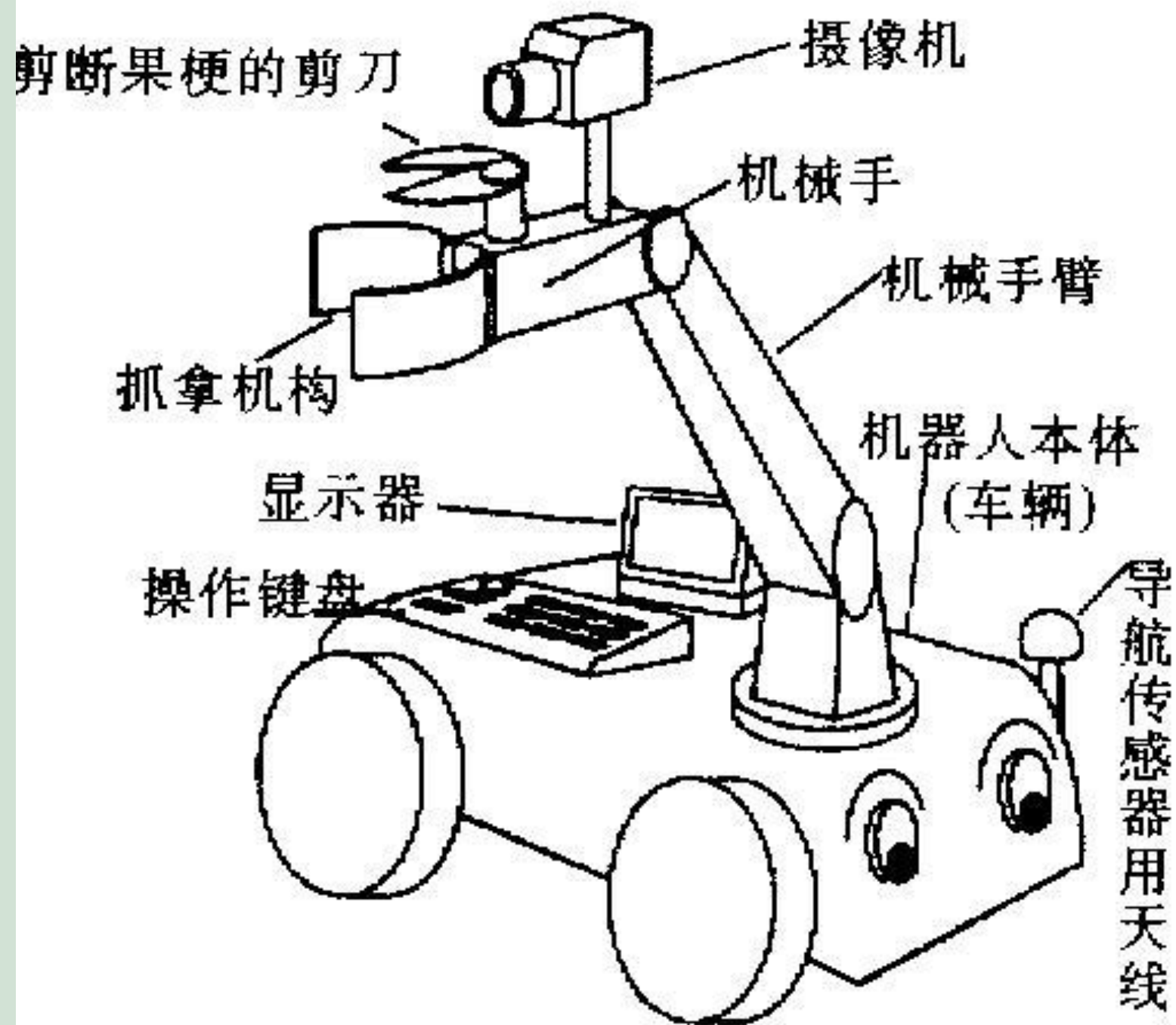
由杆件和运动副构成机器人手臂的方法可分为两种：

- ∞ 串联，构成串联杆件机械手臂，或称开链机械手臂；
- ∞ 并联，构成并联机构机械手臂，或称闭链机械手臂。

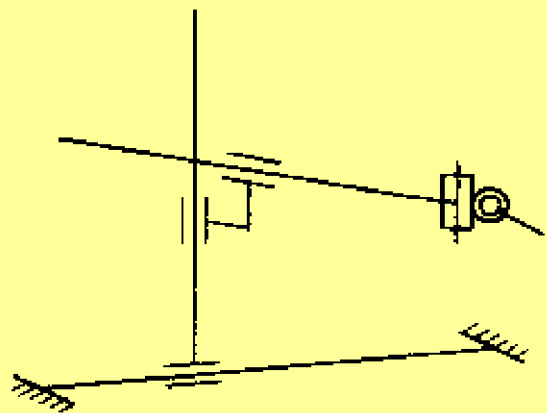
表2-1 单自由度运动副

名 称	符 号	举 例	名 称	符 号	举 例
平 移			旋转(1)		
回 转			旋转(2)		

- 为了使机器人手部在机器人的工作空间内到达任意位置并实现任意姿态，机器人必须至少有6个自由度，以便实现位置和姿态的控制。对于某些专用机器人不需要6个自由度，应在满足要求的前提下尽量减少机器人的自由度数，以便减少机器人的复杂程度，降低机器人制造成本。
- 有些机器人的工作环境复杂：工作时回避障碍，可能需要具有7个或7个以上的自由度。这种机器人称为具有“冗余性”的机器人。

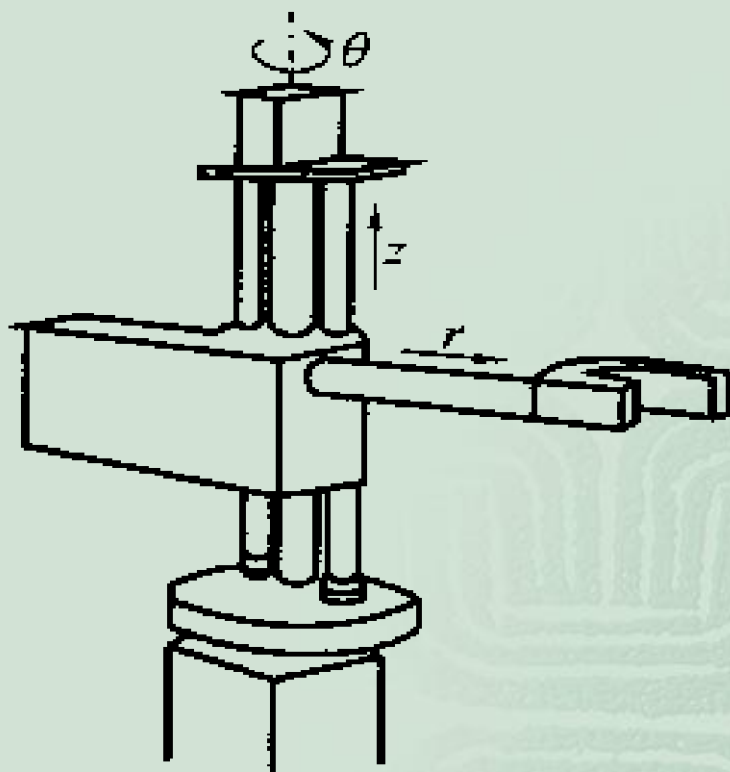


- 平移副、回转副和旋转副组合，可以有**直角坐标型、圆柱坐标型、极坐标型和关节型4种机器人**。机器人的结构形式由用途决定，即由所完成工作的性质选取。
- **直角坐标型机器人由3个独立平移自由度**组成。这种类型的机器人结构和控制算法简单，应用于弧焊和装配等场合，但工作空间较小，不适合运动速度过高的场合。



■ 圆柱坐标型

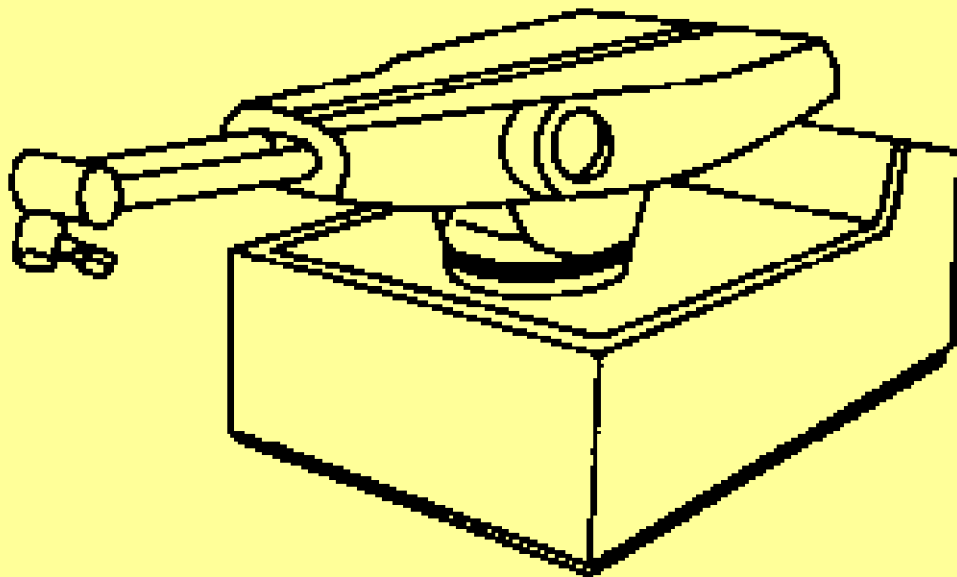
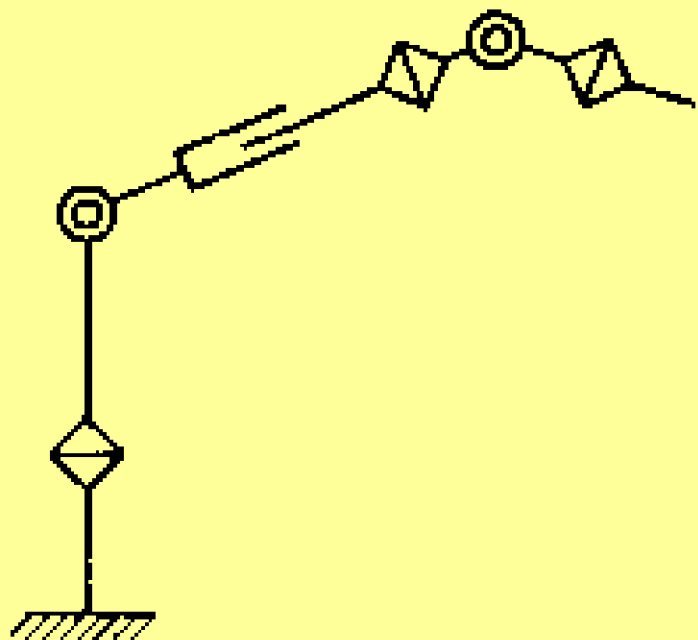
- 圆柱坐标型机器人是由一个回转和两个平移自由度组合构成。这种机器人适用于用回转动作进行物料的转载。



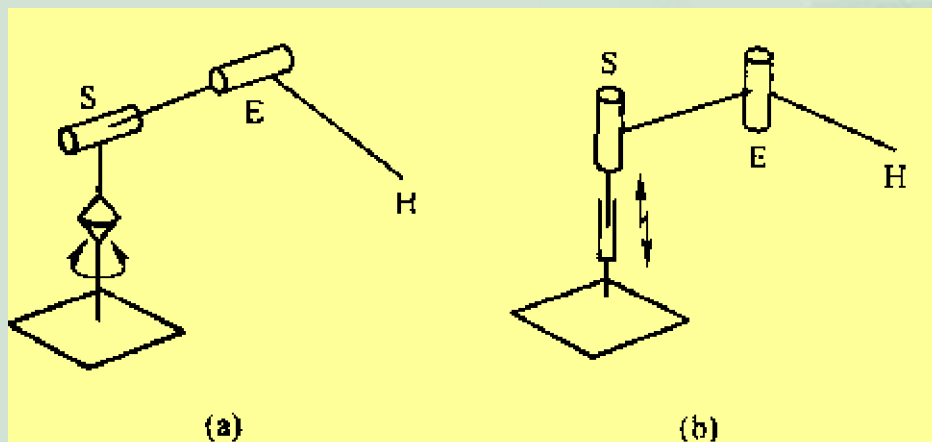
圆柱坐标式机器人



- 极坐标型
- 是由回转、旋转和平移自由度组成的机器人。



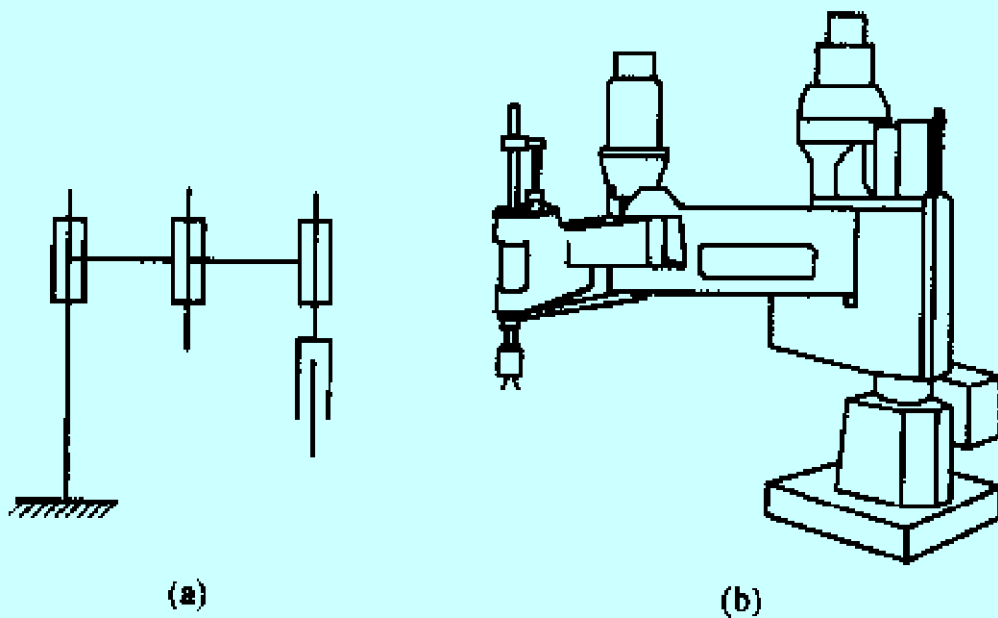
- 关节型结构
- 关节型机器人常由回转和旋转自由度构成，与坐标型机器人相比具有工作空间大的特点，它有多种形态和驱动方式。
- 从形态上，可以区分为关节绕水平轴旋转的“立式”和绕垂直轴旋转的“卧式”。
- 从驱动方式上，可以区分为每个关节单独驱动的直接驱动方式和用连杆机构间接驱动方式。



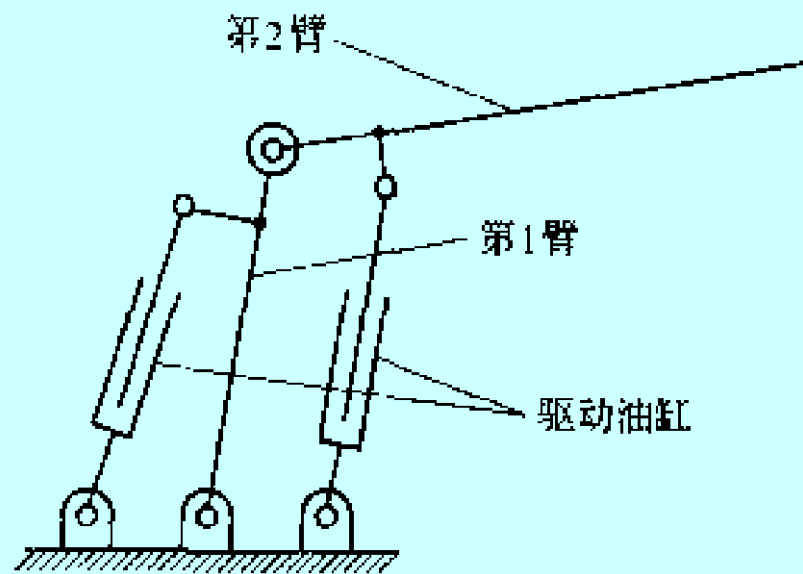
关节型机器人
(a)立式;(b)卧式

- 关节型圆柱坐标机器人：
关节型圆柱坐标机器人有2个转动轴，
1个移动轴。

- 关节型极坐标机器人：
关节型极坐标机器人由2个回转轴和1个旋转轴构成。它主要应用于焊接和喷漆



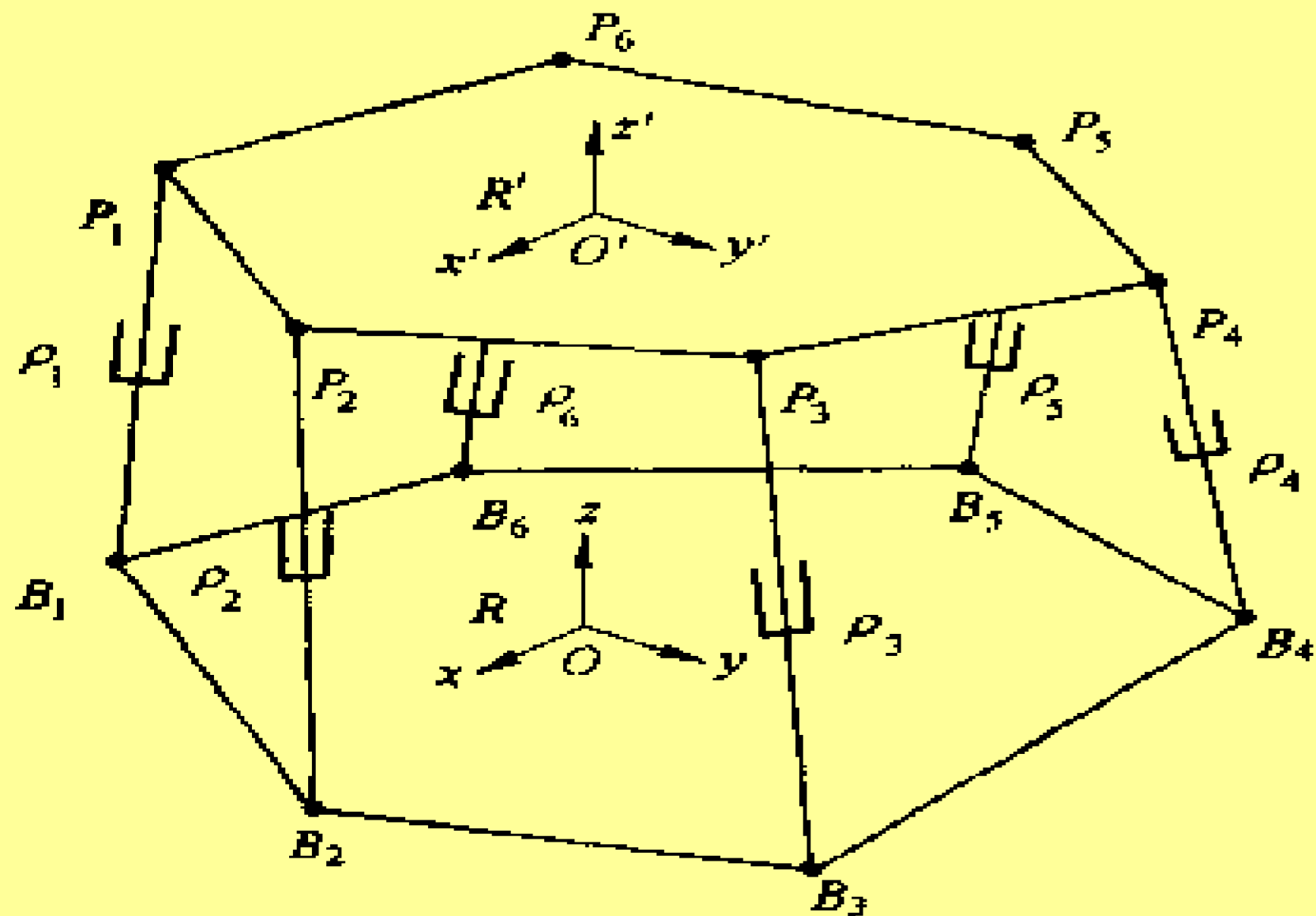
关节型圆柱坐标机器人
(a)结构图;(b)应用实例



直接驱动关节型极坐标机构

并联机器人结构

- 澳大利亚著名机构学教授Hum在1978年应用六自由度平台机构作为机器人机构。根据这种机构的结构特点，人们把它称为并联机构。
- 并联机构从结构上是用6根支杆将上下两平台联接而形成的。这6根支杆都可以独立地自由伸缩，它分别用球铰和虎克铰与上下平台联接，这样上平台与下平台就可进行6个独立运动，即有6个自由度，在三维空间可以作任意方向的移动和绕任何方向的轴线转动并联机器人是一类全新的机器人，并联机器人机构问题属于空间多自由度多环机构学理论的新分支。



一般六自由度 Stewart 机构

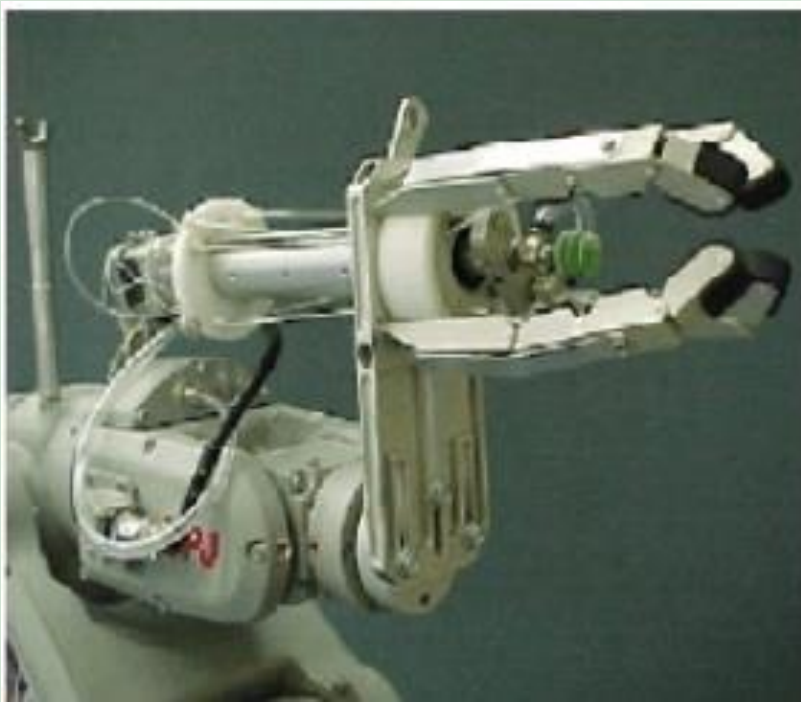
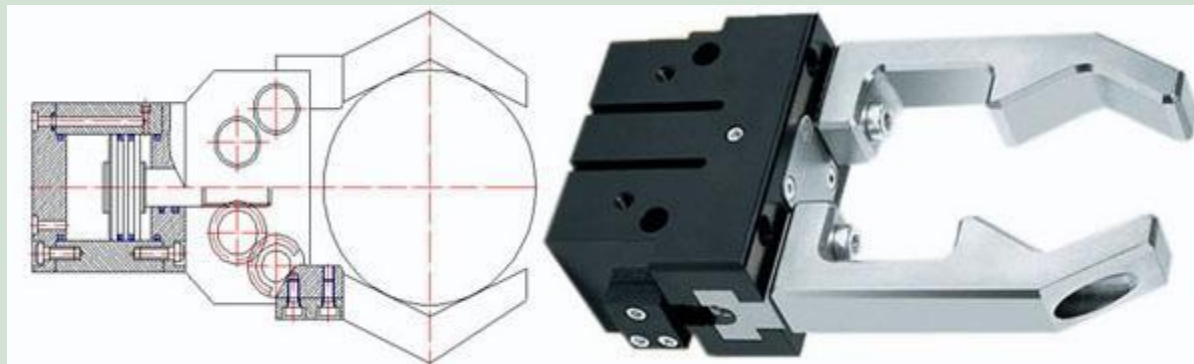
并联式与串联式确实形成鲜明的对比。串联的优点恰是并联的缺点，而并联的优点又恰是串联的缺点。由于串联并联在结构上和性能上的对偶关系，串联并联之间在应用上不是替代作用而是互补关系，且并联机器人有它的特殊应用领域，因此可以说并联机构的出现，扩大了机器人的应用范围。

并联机构适用于如下领域：

- (1)模拟运动，如飞行员三维空间训练模拟器、驾驶模拟器；
- (2)对接动作，如宇宙飞船的空间对接，汽车装配线上的车轮安装；
- (3)承载运动，如大扭矩螺栓紧固，短距离重物搬运；
- (4)金属切削加工。可应用于各类铣床、磨床、钻床。
- (5)可用于测量机。用来作为其他机构的误差补偿器；
- (6)用于微动机构或微型机构，如手术机器人。

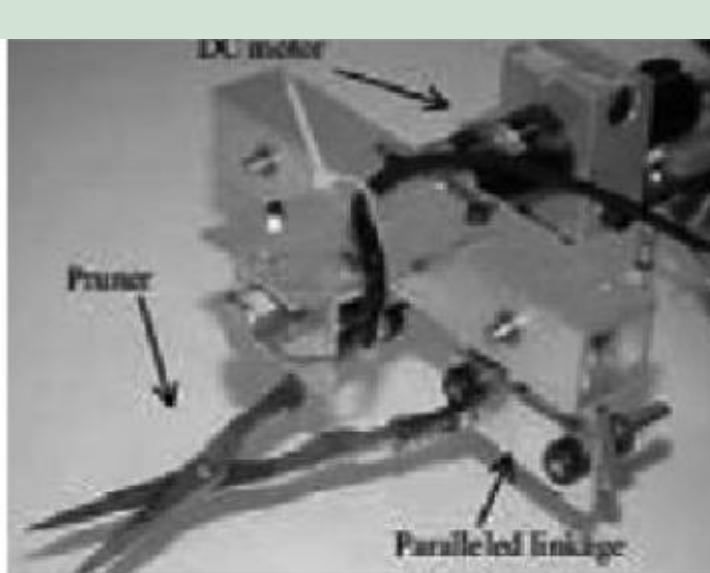
(2) 末端执行器

■ (a) 夹持机构:

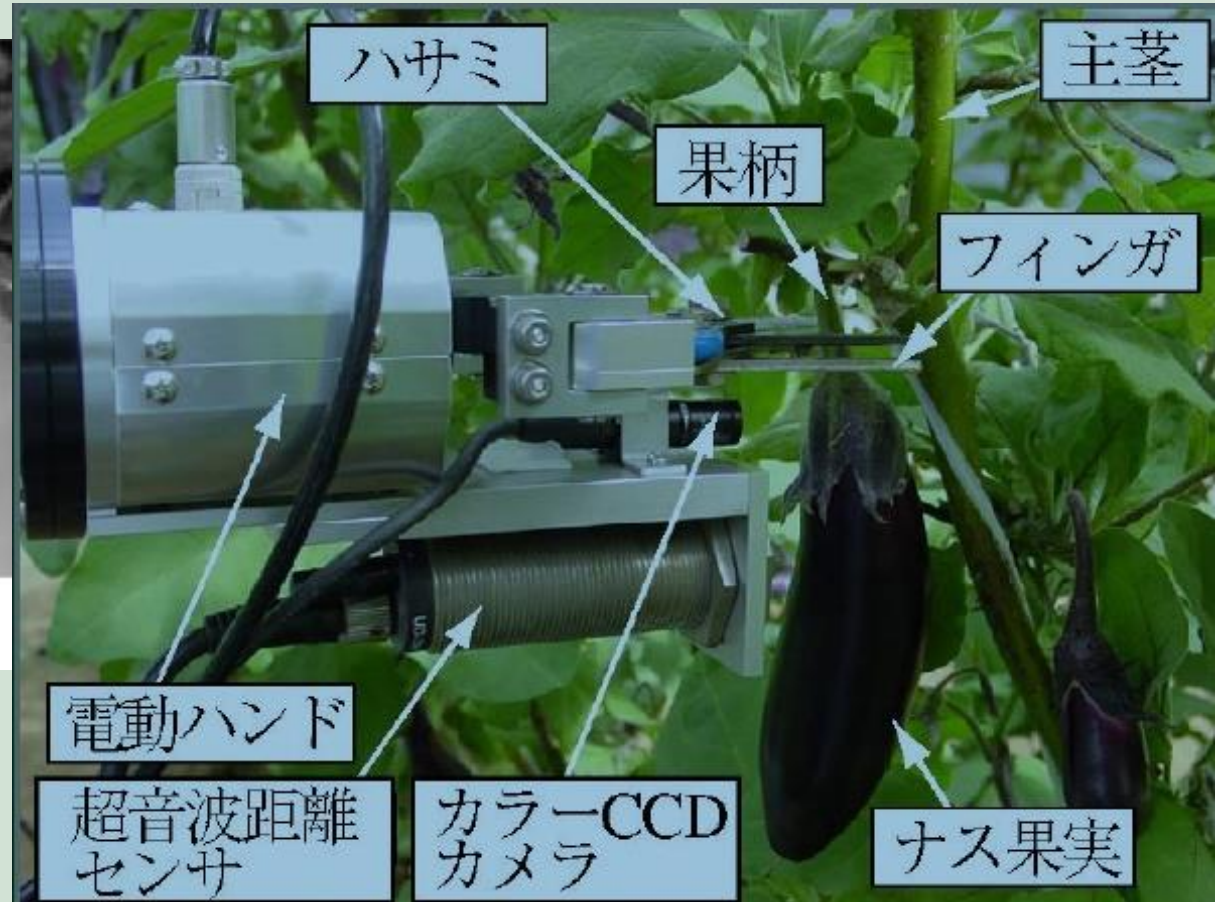


(2) 末端执行器

■ (b) 切断机构

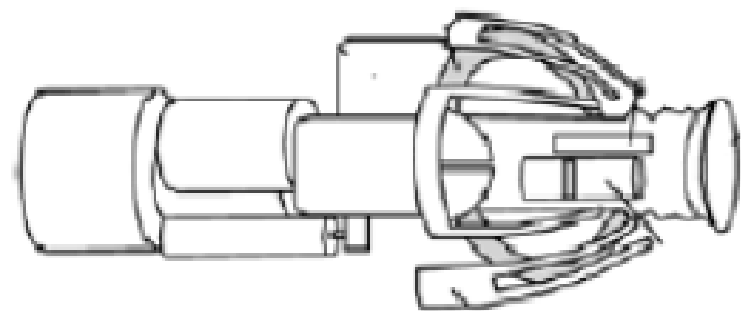


1 甜椒采摘末端执行器

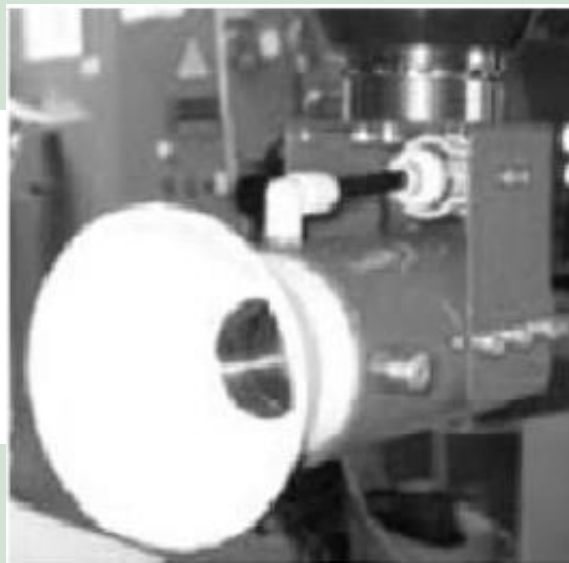


(2) 末端执行器

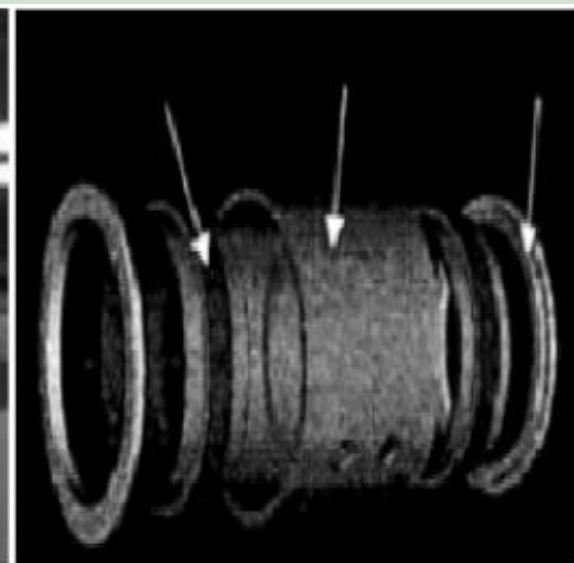
■ (c) 吸引机构



柑橘采摘末端执行器



(a)



(b)

苹果采摘末端执行器

■ （3）机器人的移动机构

行走机构按其结构分类如下：

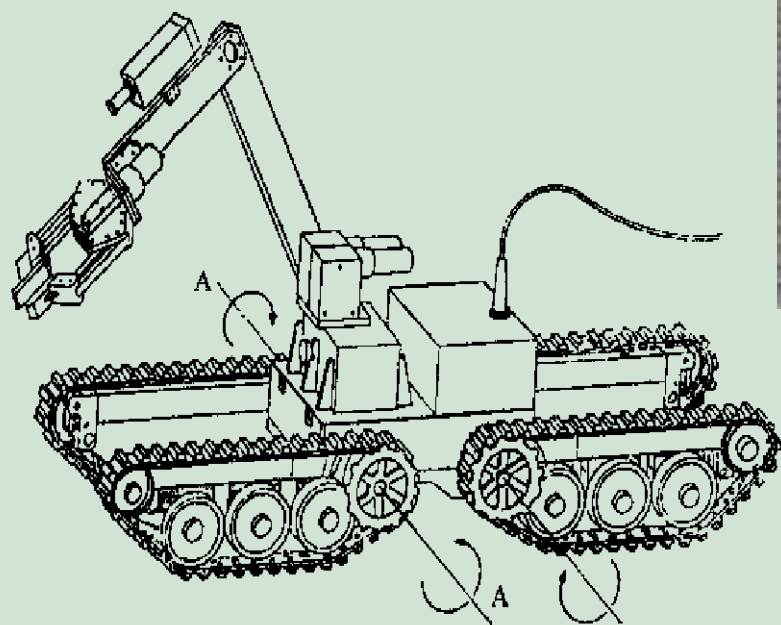
① 车轮式——三个轮、四个轮、特殊车轮



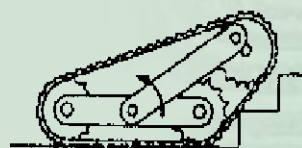
②脚式——二只脚、三脚、四脚、五脚、六脚、八脚



③ 履带式



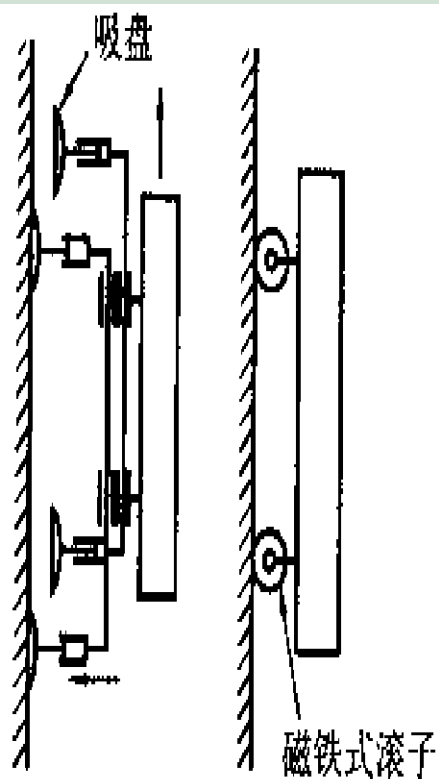
(a) 双重履带式机器人(6个自由度)



(b) 形状可变式履带机构

图 2-57 容易上、下台阶的履带式移动机器人

④其他方式.



(a) 吸盘式

(b) 磁吸滚子式

图 2-58 能在壁面上爬壁的机器人

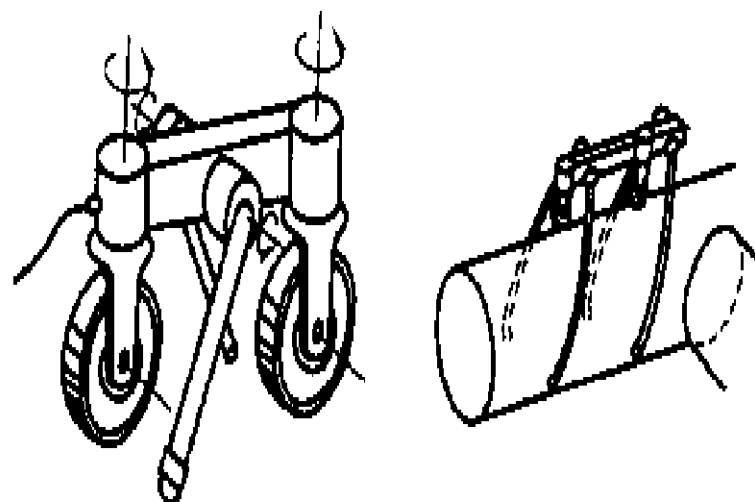


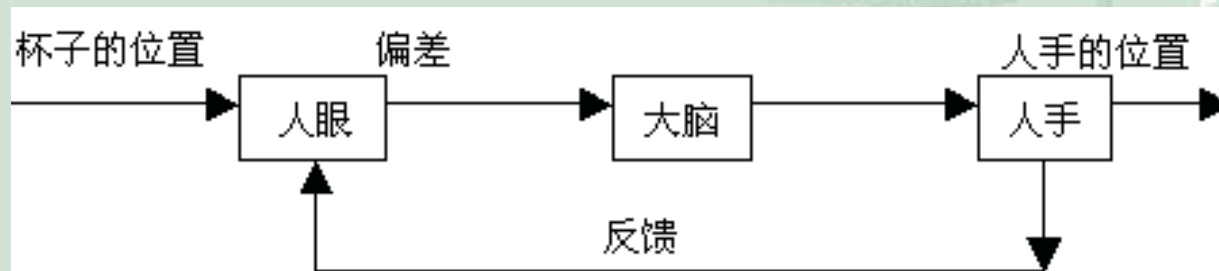
图 2-59 车轮和脚混合式的移动机器人

(4) 执行机构的分类

- 执行机构主要分为三类：
- **电动执行机构**：直流伺服电动机、交流伺服电动机和步进电动机
- **液压执行机构**：液压缸和液压马达;液压泵、驱动部分、油箱和安全阀;管道也是必不可少的。
- **气动执行机构**：很难实现对机械手、末端执行器或气动泵、管道和阀门等设备的精确定位。气缸和马达、气泵、气罐、安全阀等。

2) 控制器及控制算法

- **一个游戏的例子：** 让张三和李四分别去拿放在一张桌子上的杯子，张三把自己的双眼蒙上，而李四却不用蒙上双眼。看看他们谁能顺利地拿到杯子。结果是很明显的,张三很有可能要试很多次才能拿到杯子，但是李四会很顺利地拿到杯子。这是为什么呢？有人会说，这太简单了，因为张三看不见。但是为什么看不见就拿不到呢？可能就回答不出了。我们来分析一下拿杯子这个动作完成的过程，就会清楚其中的秘密。人在打算拿桌子上的杯子时，首先要看一下，杯子的位置与自己手的距离有多少，然后人的大脑会命令自己的手做出动作，向减少这个距离的方向移动，同时不断的观察两者之间的距离还有多少，直到人的手碰到了杯子，大脑就命令手停止运动，杯子也就拿到了。



2) 控制器及控制算法

- 一个自动化系统无论结构多么复杂都是由下面几部分组成：
- 检测比较装置：所起作用相当于人眼在上面例子中的作用，主要是获得反馈，并且计算我们要达到的目的与现在的实际情况之间的差值。
- 控制器：所起作用相当于大脑在上面例子中的作用，主要是用来决定应该怎样做。
- 执行机构：主要所起作用相当于人手在上面例子中的作用，完成控制器下达的决定。
- 控制量：也就是所要达到的目的，相当于手和杯子之间的距离。控制量是我们自动化机器所要达到的最终目的。

控制算法

- 是对控制量的求解方法

（机器人行走、机械手位姿、作用力等）

- 机械手位姿，主要有以下两个基本问题：

(1) 对一给定的机器人，已知杆件几何参数和关节变量，求末端执行器相对于给定坐标系的位置和姿态。给定坐标系为固定在大地上的笛卡尔坐标系，作为机器人的总体坐标系，也称为世界坐标系；常称做运动学正问题。

(2) 已知机器人杆件的几何参数，给定末端执行器相对于总体坐标系的位置和姿态，确定关节变量的大小。常称为运动学逆问题。

- 作用力，研究机器人的运动特性与力的关系。描述这种动态关系的微分方程称为机器人动力学模型。
- 有两类问题：
 - 动力学正问题：已知机械手各关节的作用力或力矩，求各关节的位移、速度、加速度、运动轨迹；
 - 动力学逆问题：已知机械手的运动轨迹，即各关节的位移、速度和加速度，求各关节的驱动力和力矩。

3) 计算机硬件系统及系统软件

- 现在，几乎所有的机器人都采用微型计算机进行控制。从机器人控制角度要求微型计算机具有数据处理能力强、灵活可靠、易于配置、价格低廉、体积小等特性。随着微电子技术的发展，微型机性能不断提高，为实现机器人复杂的控制奠定了物质基础。
- 为实现对机器人的控制，除了具有强有力的计算机硬件系统支持外，还必须有相应系统软件。通过系统软件的支持，可以方便地给机器人控制程序，让机器人完成某一具体任务。系统软件通过机器人语言把人与机器人联系起来，机器人语言可以是编制控制程序的语言，也可以以声音的形式进行人机交互。

4) 传感器

人的感觉以视觉、触觉及听觉为主；而机器人也需要对其动作进行感觉，其感觉装置被称为传感器。

机器人感觉的过程：将物体内外有关的物理特性变换成有用的信息。物理特性包括电、磁、光、机械（如有无物体、位置、速度、压力、形状等）量等。

可分为两个阶段：

- (1) 将物理特征变换成信息；
- (2) 将得到的信息加工处理变成有用信息。



传感器的分类

内部传感器：检测机器人本身状态（位置、速度、作用力等）的传感器。

外部传感器：检测机器人所处环境（是什么物体，离物体的距离有多远等）及状况（抓取的物体滑落等）的传感器。

外部传感器分为末端执行器传感器和环境传感器。

末端执行器传感器：主要装在作为末端执行器的手上，检测处理精巧作业的感觉信息。相当于触觉。

环境传感器：用于识别物体和检测物体与机器人的距离。相当于视觉。

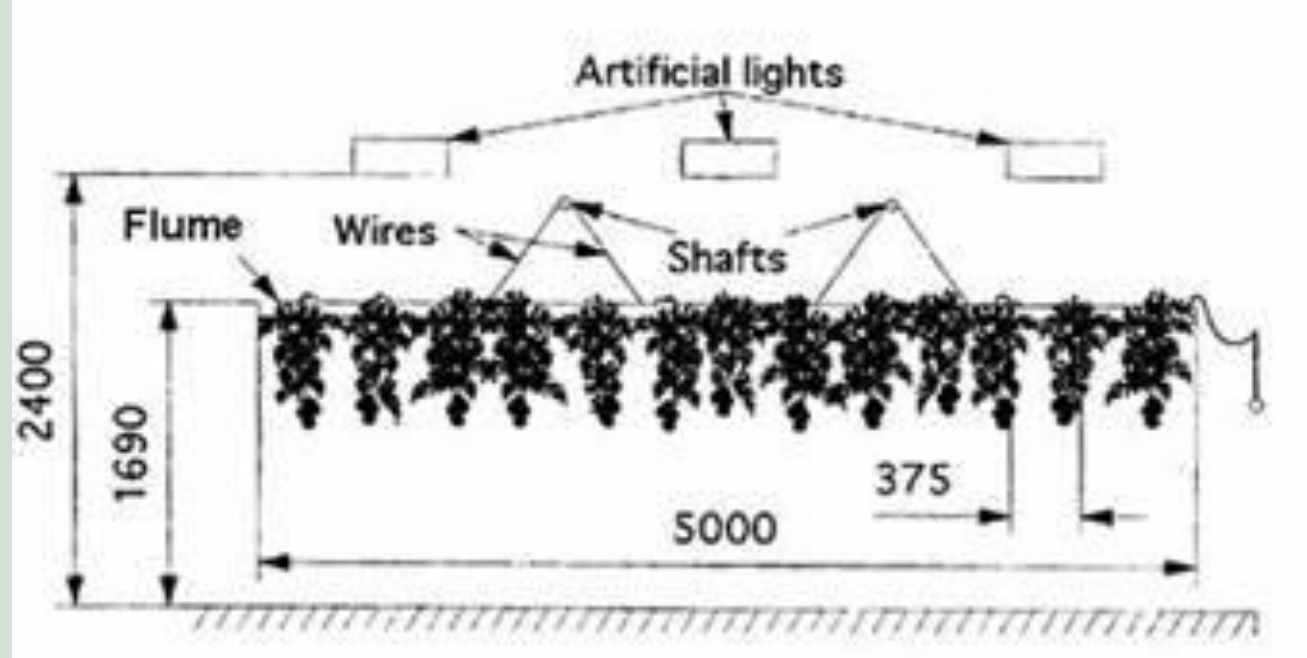
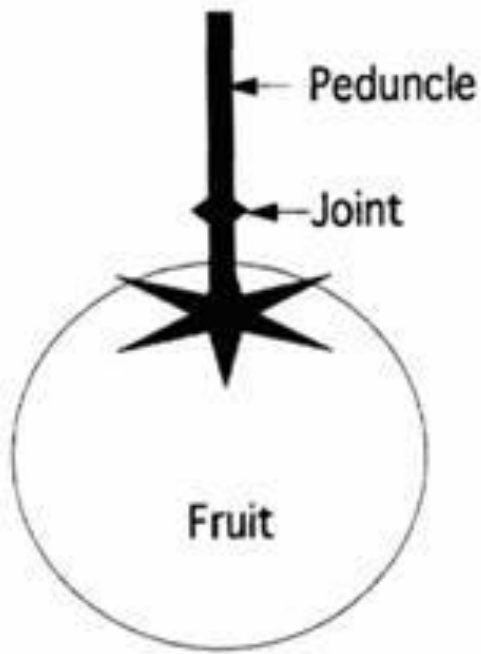
5) 植物栽培方式与机械手

■ (1) 植物栽培方式

- 由于作物种类、栽培方法、生长时期、生长区域的不同，人们从事的生物生产也不相同。更改植物适应系统可以提高生产率从而使农民的工作变得轻松。
- 生物生产机器人的视觉传感器、机械手、末端执行器、行走装置都不如人的灵活。因此需要改进机器人的各个部件和对栽培方式进行更深入的研究来提高机器人的工作效率。

■ (2) 在垂直面内栽培的作物

- 番茄植株经常在垂直面内进行栽培。大多数番茄的叶序呈一定规则生长，因此所有的花序都出现在三组真叶背面的同一个方向上。在日本通常采用移植的办法使所有的花序都处于田垄的外侧。大部分的水果串都暴露在外面，因此人类和机器人都能很好的适应这种栽培方式。但是水果上方的枝叶有时会遮盖水果，或者偶然扭曲的茎杆会改变水果的生长方向。

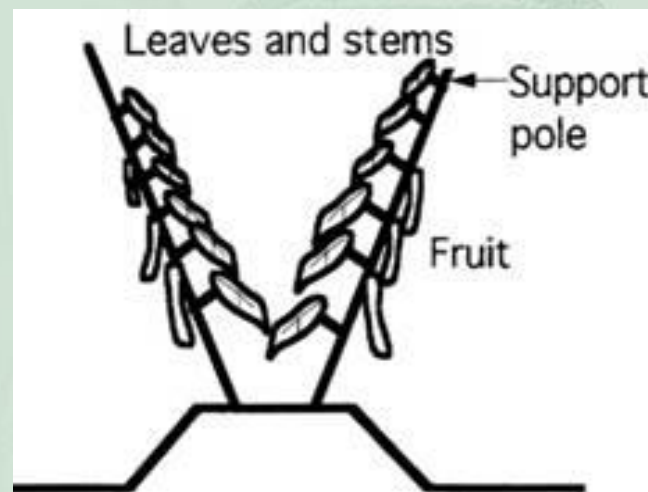


番茄的节点

单桁架向下生长的番茄栽培方式
简单的直动关节机械手更为适合



黄瓜栽培方式



黄瓜植株的倾斜支架栽培方式



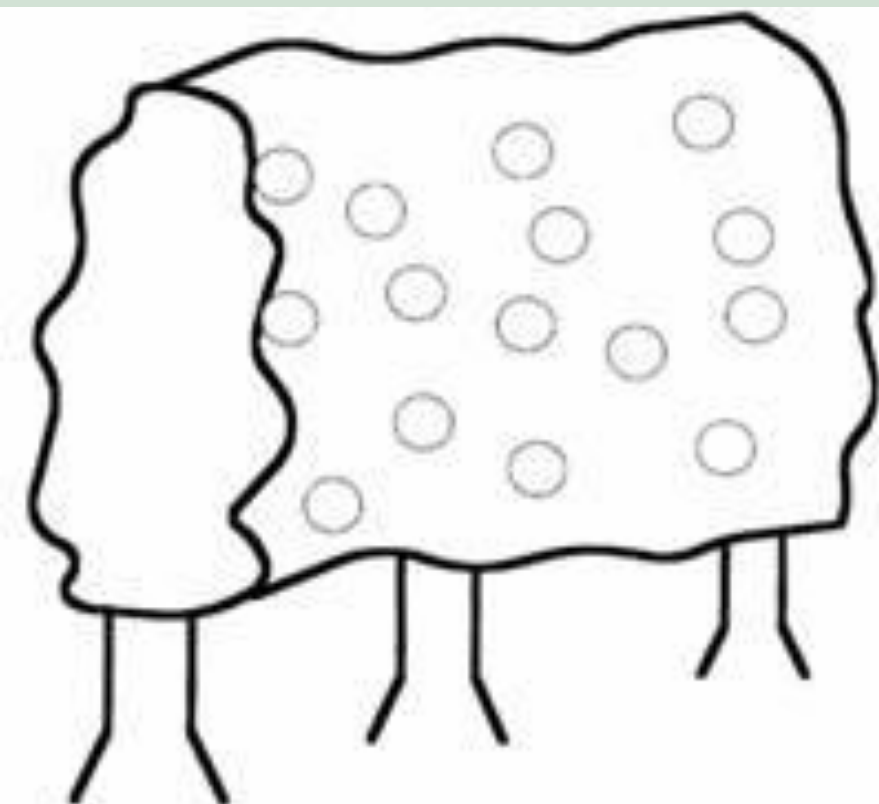
机械手需要一个能在垂直面范围内有效移动的机构。由于需要回避挡在果实前的枝叶，选择较多自由度的机构比较合适。



极坐标机械手或者拥有平行于支架的直动关节的多关节机械手均都能适用于这一方式，很好的完成采收工作

■ **（3）球状栽培的果树**

- 柑桔类和苹果类果树一般呈球状发育生长。尽管水果一般都生长在球形表面或附近，但是果树的叶和嫩枝经常会挡住水果。
- 适用于这一栽培方式的机械手需要很长的手臂，能够覆盖树冠范围的动作领域和足够多的自由度以避开障碍物。
- 就柑桔采收而言，由于果实的方向和位置都各不相同，还需要末端执行器、行走机构和其他部件的配合。

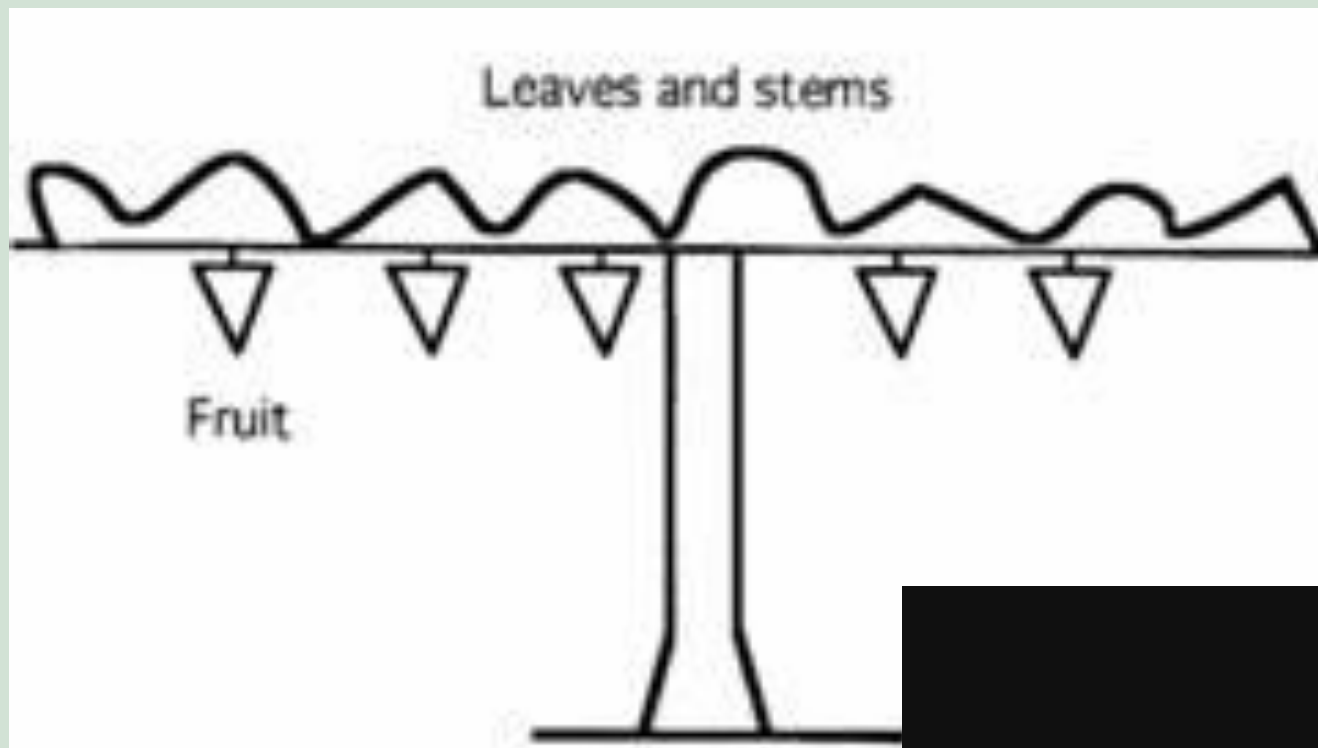


- 研究：桔树的垂直平面栽培
- 更适于机械和人工采收



■ (4) 棚架栽培的作物

- 葡萄、猕猴桃、梨等水果一般在水平棚架上进行栽培。温室内，水果沿屋顶在倾斜架上栽培。在棚架内作业时，因作业人员不得不总是抬头向上进行工作，劳动强度很大。
- 果实与枝叶在棚架的上下可自然分离开来。适合于使用机器人进行采收，装袋，喷雾等作业。
- 机械手往往可以沿棚架移动，从棚架的下方或水平方向接近果实。含有一个直动关节的机械手是最好的选择，因为它能采用简单的控制方法实现高速工作。



- 棚架栽培方式

■ (5) 地表附近栽培的作物

- 西瓜、卷心菜等作物以及植物的幼苗几乎都是在地表生长，在这一栽培方式下直角坐标和多关节机械手比较适合，而圆柱坐标和极坐标机械手应用起来相对困难。
- 另外，对质量大的对象，如西瓜，南瓜等，还需要对机械手进行力学和强度方面的评价。



■ (6) 其他对象

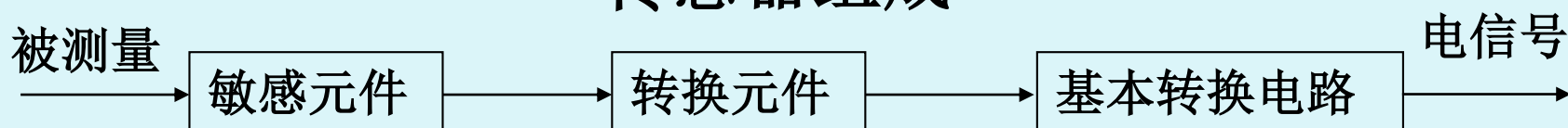
- 室内进行的操作，如播种、移植、嫁接、挤奶、喷雾等。
- 可以营造一个相当于工业条件的理想环境。利用某些机械结构就能同时对很多对象进行有效的处理，如播种、喷雾、嫁接等。挤奶的操作需要在严格的空间中使用机械手，不需要很大的自由度和很大的灵活性，也不需要大工作空间和大的关节行程。
- 如上所说，生物生产的对象和操作都不尽相同，当对机械手进行设计时，不但要考虑到工作对象和操作过程，还要考虑环境条件、其他机器系统、机器人和其他系统之间的关系等。

6) 末端执行器的操作

- 考虑机械手的运动时需从两方面来进行，即正运动学和逆运动学。正运动学是首先给定各关节的位移、速度、加速度来求解杆件和执行器的位置、速度和加速度。逆运动学是首先给定杆件和执行器的位置、速度、加速度来求解所需的关节变量的位置、速度、加速度。

第三章 传感器

传感器组成

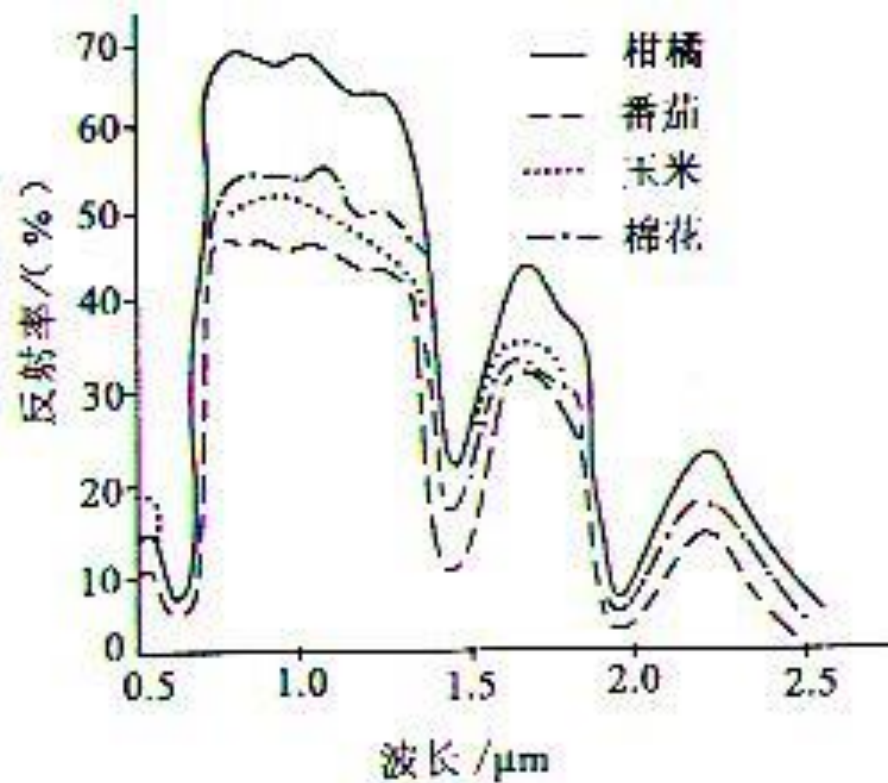
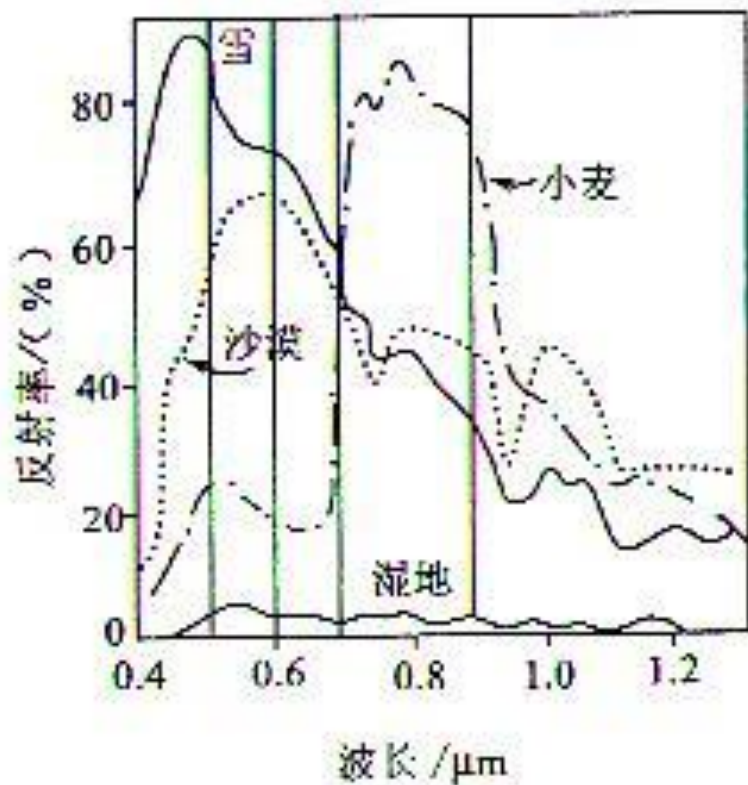


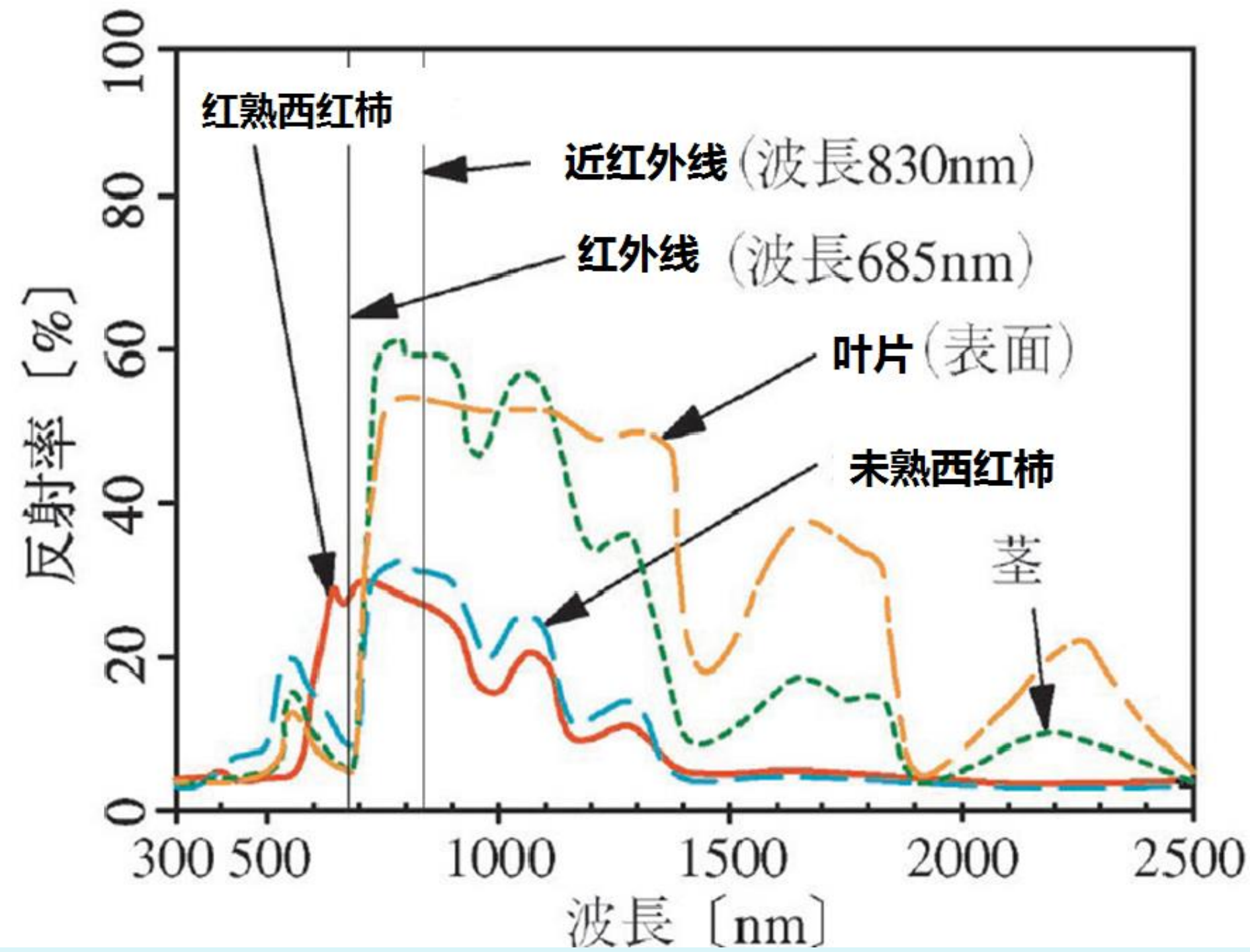
(一) 农业机器人机器视觉

- 机器视觉作为农业机械机器人的外部传感器，是其最大的信息源。
- 1、对农业机械机器人的机器视觉的要求高：
 - 太阳光照射强度：在0-10万lx（甚至更大）范围内变化；
 - 色温度：2000-6000k范围内大幅度变化；
 - 涉及可见光、近红外、紫外、x射线、远红外等区域。
- 2、机器视觉特别重视的特征：
 - 是对象物的大小、形状、颜色以及纹理。

• 3、对象的光学特性:

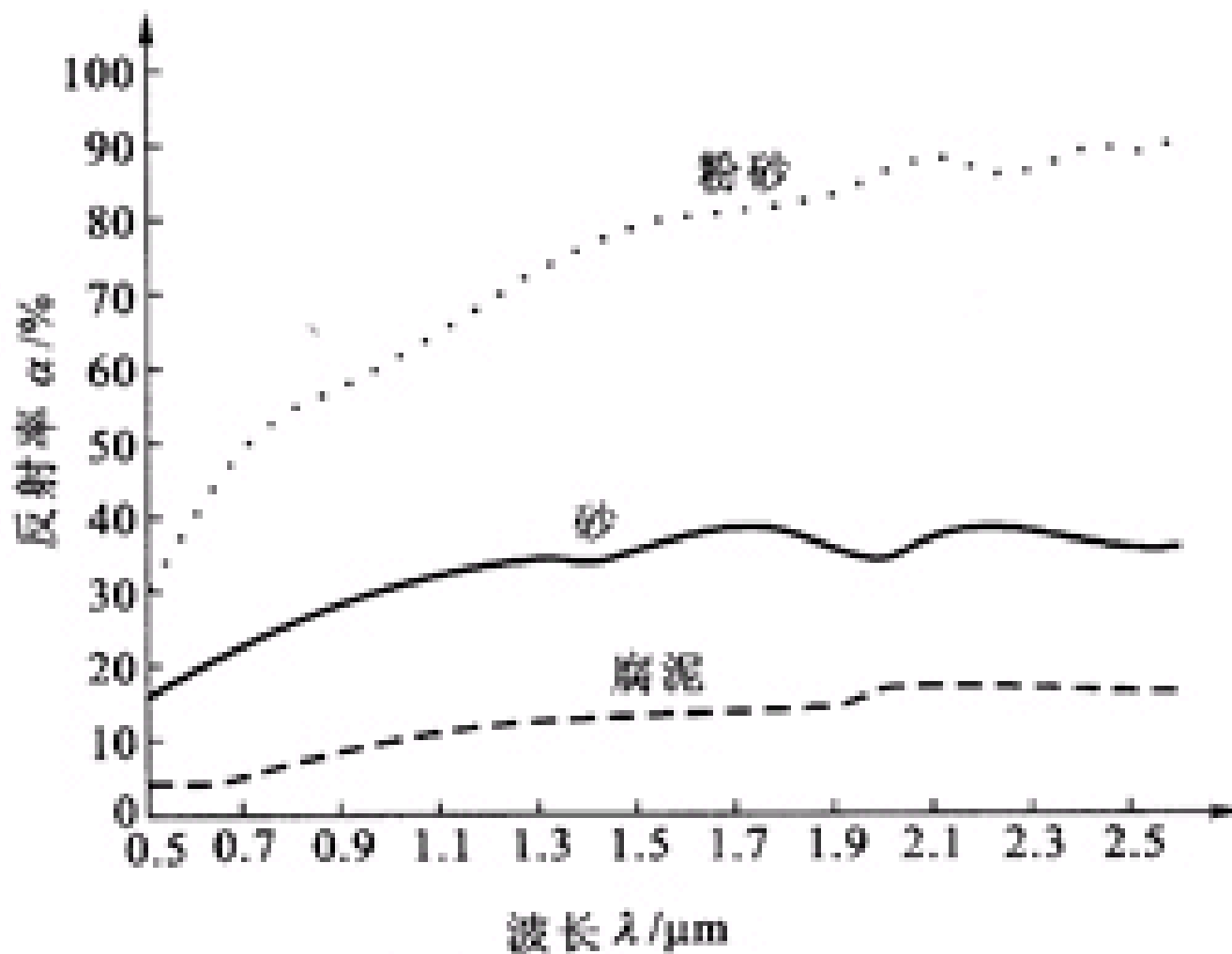
• 反射特性:





土壤的反射率

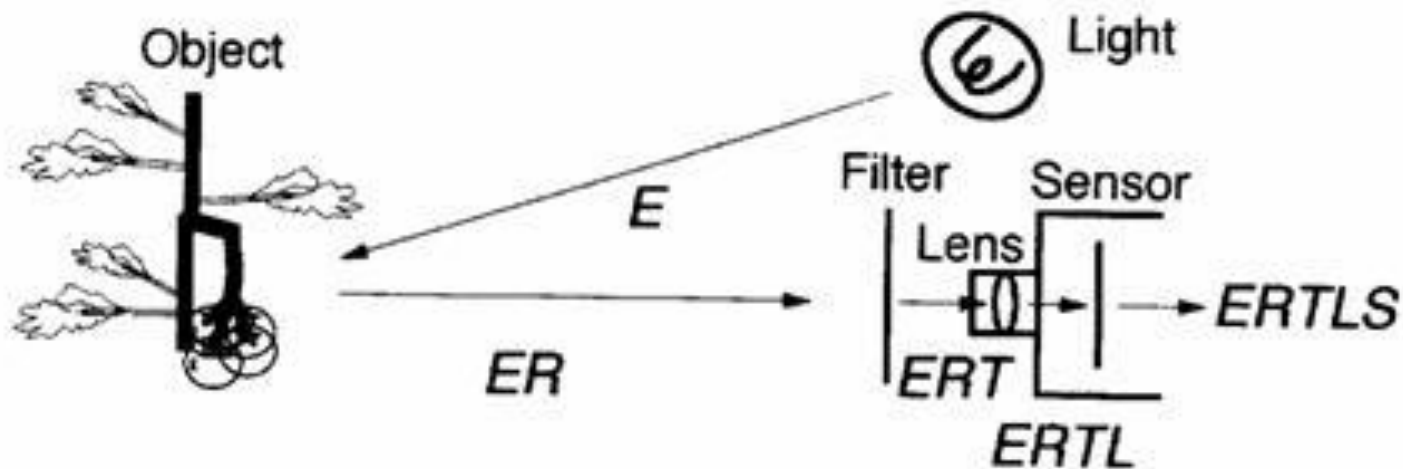
- 不同土壤、不同的含水率等



三种土壤的反射波谱曲线

资料来源：梅安新，彭望琰，秦其明等。《遥感导论》p40

4、光能量的流动



光到传感器输出的能量流动

- E : 来自光源的能量; R : 对象物的反射率;
- ER : 反射后的光能; T : 滤光片透射率;
- L : 透镜透射率; $ERTL$: 透射后的光能;
- S : 摄像机的 摄像元件感光度; λ : 波长
- $ERTLS$: 输出影像信号; O : 摄像信号
- $O = \sum ERTLS \Delta \lambda$

• 5、照明

• (1) 照明基础

• 光通量[lm ，流明]:

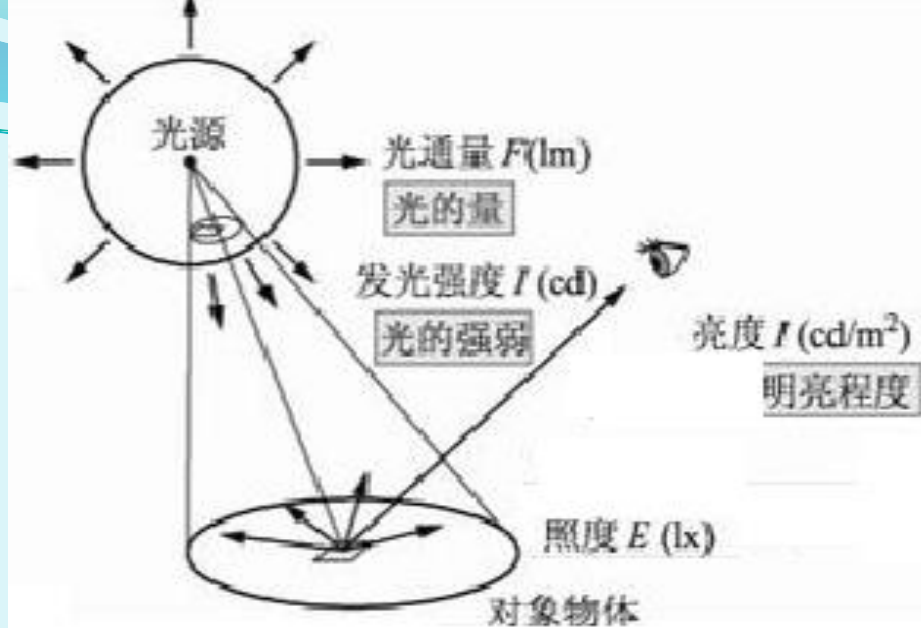
单位时间内所传送光的量，
是指 从光源发出的可见光区域的光的总量；

• 光量[lm.s ，流明秒]: 是指光通量的时间积分；

• 发光强度[cd ，坎德拉]: 是表示光的强度的指标，对于点光源来说，表示某给定方向单位立体角所辐射的光通量。 $1\text{cd}=1\text{lm}/\text{sr}$ ， sr (球面度)是立体角。

• 光照度[lx ，勒克斯]: 是指单位面积所入射的光通量， $1\text{lx}=1\text{lm}/\text{m}^2$ ；

• 光亮度[cd/m^2]: 表示从接受光的某个方向看时的明亮程度， $\text{cd}/\text{m}^2=\text{lm}/(\text{sr}.\text{m}^2)$



(1) 照明基础

- **光通量维持特性**：表示使用时间与光通量的关系。

人工光源 在接近使用寿命时，光亮就会减少。

卤素灯在接近使用寿命时光通量大体减少10%。

- **色温度[k, 开尔文]**：某物体高温发光时，发出同样颜色光的热辐射黑体的温度。卤素灯色温度：**2700-3500K**
- **寿命[h, 小时]**：即在设定条件下进行试验时，统计上半数的灯被用坏时的时间。卤素灯**500-4000h**
- **平均演色性指数**：是表示被光源照射时能够忠实再现物体本来颜色的指标。接近**100**，演色性好。
- **光束角[o,度]**：指发光强度衰减到一定比例的左右**2**点与灯中心连线所成的夹角。

(2) 照明方式

- 为了正确获得对象物体的信息，**抑制晕光**（镜面反射光、直接反射光）和**光斑**是最大的课题。
- **直接照明方式**：一般使用偏振滤光片
优点：用摄像机等采集的图像颜色再现性高；使用偏振滤光片可以避免产生晕光。
- **间接照明方式**：使用漫反射板使光强度衰减、光发散；还可以将光照射在灯箱壁面上，获得**2次或3次**间接照射光。

(3) 灯的种类

- **卤素灯：**灯丝温度很高时钨蒸发，与加入的卤素气体结合，在灯泡内形成卤化钨。卤化钨通过灯泡内的对流移动，在高温的灯丝附近再分解成卤素和钨，钨返回灯丝。利用了卤素循环，其演色性高、高温发光、非常明亮，寿命长，应用广泛。



不帶反光杯

帶反光杯



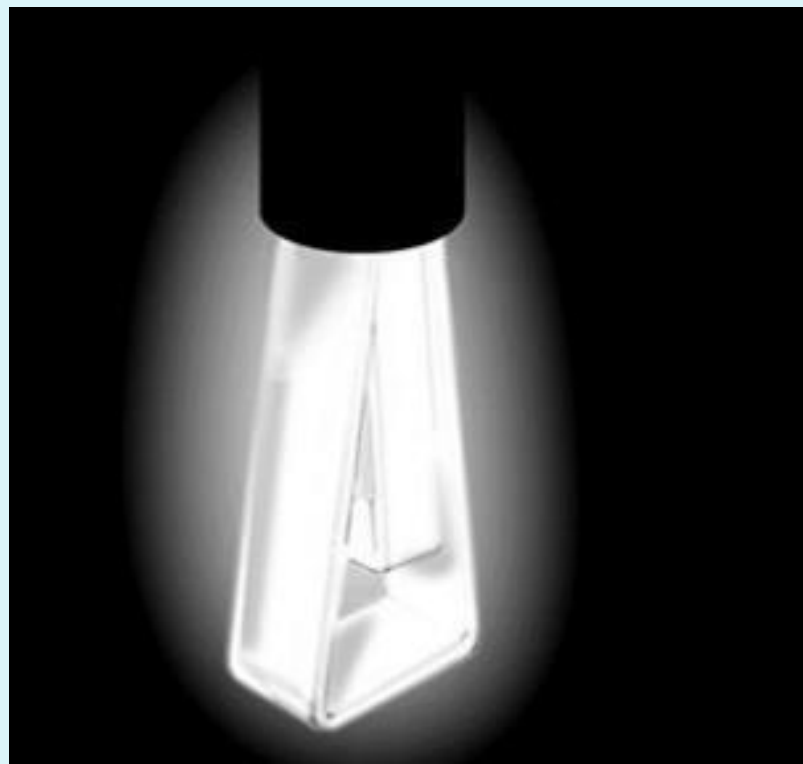
(3) 灯的种类

- **白炽灯：** 钨制成的灯丝，通电时使钨丝发热达2000度以上至白热化、产生略带红色的白色光。家庭常用的电热发光照明光源。与卤素灯相比，效率低、体积大，但演色性与卤素灯一样高，平均演色性指数接近100，色温度2000-6000K。



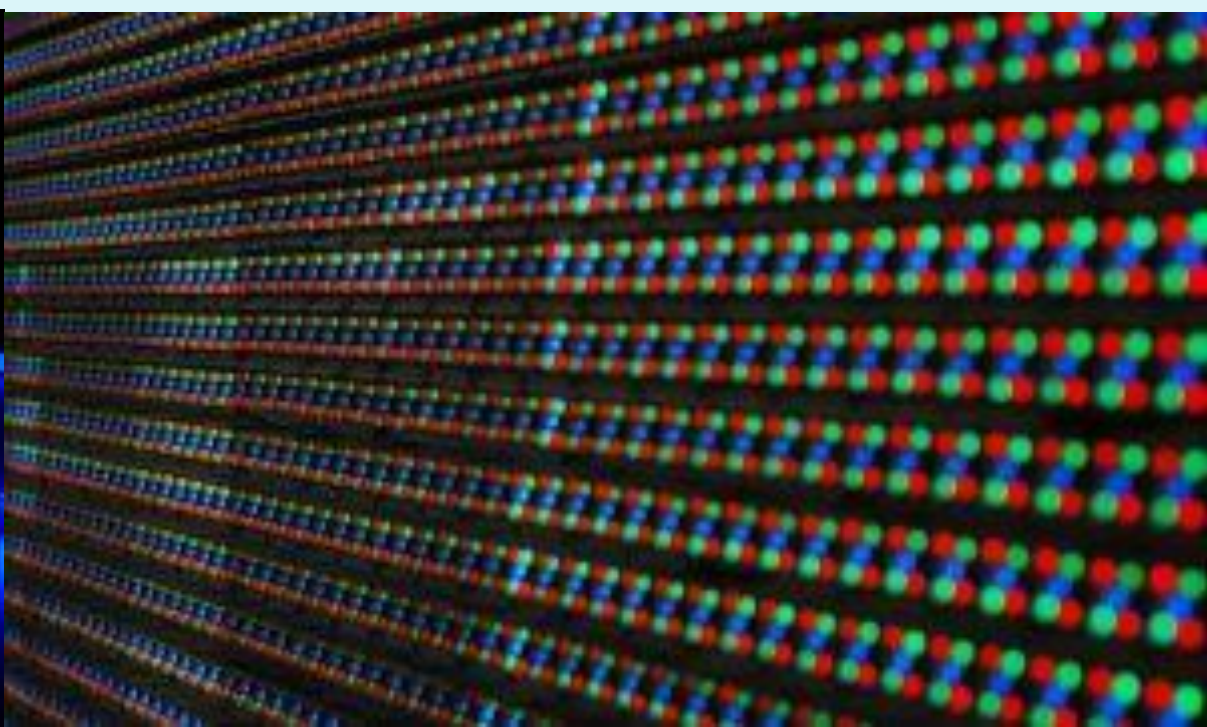
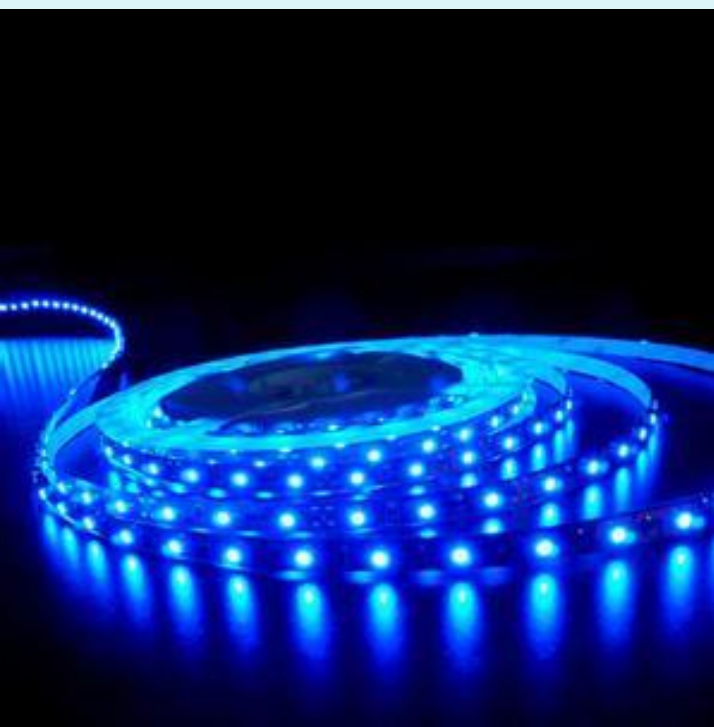
(3) 灯的种类

- **荧光灯**:日常用的最多的是荧光灯。通过热电子与水银蒸气中水银原子发生冲撞,产生紫外线,照射到荧光管上的荧光物质上发出可见光。与卤素灯相比,色温度高、亮度低,演色性60-80。



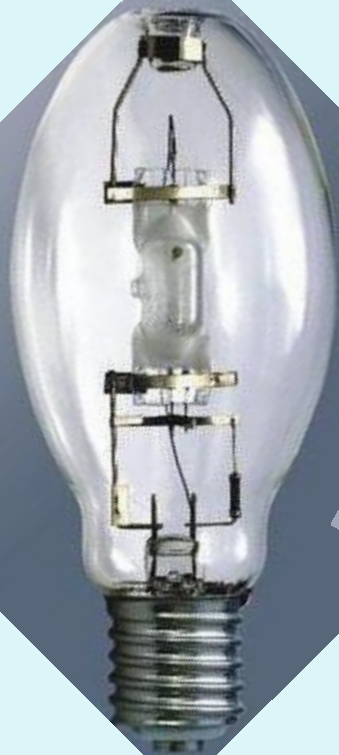
(3) 灯的种类

- **LED（发光二极管）**：通如电流就发光的半导体芯片制成的直径为1-5mm的小灯。多个排列一起用于照明。寿命长、色温高。



(3) 灯的种类

- HID灯（高压气体放电灯）：金卤灯、水银灯、高压钠灯等的总称。没有灯丝，高电压放电。



(3) 灯的种类

各种灯的特性

项目	卤素灯	白炽灯	荧光灯	LED	HID
亮度	高	中	低	低	高
演色性	高	高	低	中	中
光通量维持特性	高	高	中	高	低
寿命	中	短	中	长	长
价格	低	低	中	高	高

(3) 灯的种类

- **光纤照明：**当光源部分和照射部分需要分开设置时，以及照射部分的尺寸需要很小时等，经常使用光纤。由光源、电源、光量控制装置、光纤导管、光输出端附件等组成。光源：卤素灯、金卤灯等。通过更换光输出端附件，得到点、线、面光源等。



6、摄像元件和摄像机

● (1) 摄像元件：

- 分为摄像管（光导摄像管）和固体摄像元件（图像传感器）。
- 机器人常用固体摄像元件：分为CCD（charge coupled device, **电荷藕合器件**）和MOS(metal oxide semiconductor, 金属氧化物半导体)两类。

项目	CCD	MOS
分辨率	高	低
耗电	多	少
敏感度	高	低
饱和曝光量	小	大
电子溢流	有	无
配套装置价格	高	低
照片剪辑	困难	容易

CCD

- **CCD基本结构**是一个间隙很小的光敏电极阵列。阵列放置在摄像机镜头图像平面上(如同普通摄像机的感光胶片位置)，一幅图像就投射到**CCD阵列**平面上。由于每个光敏元件产生的电荷与其照度成正比，电荷聚集在每个光敏元件下面的电容里。然后用两相时钟脉冲把电荷顺序地传递到放大器输入端，于是在放大器的输出端产生代表图像的电压信号。对电压采样，进行二值数字化处理。每一定时间间隔扫描一遍。

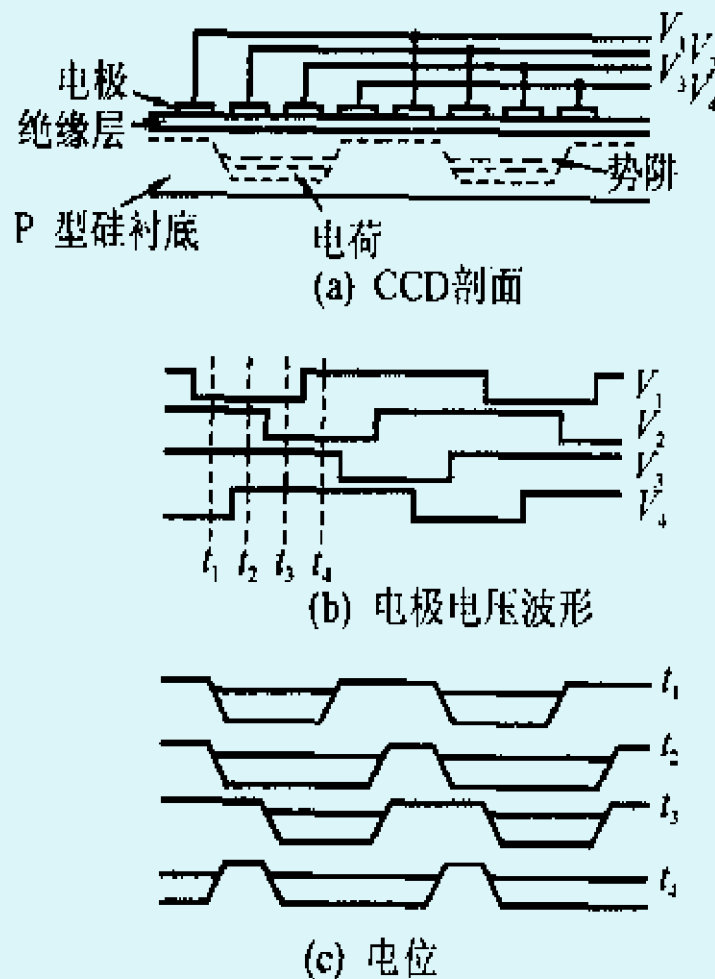
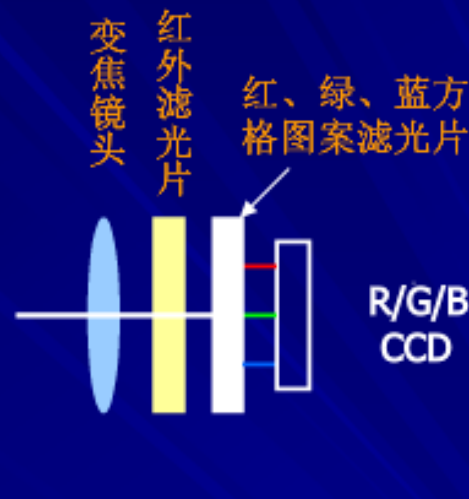
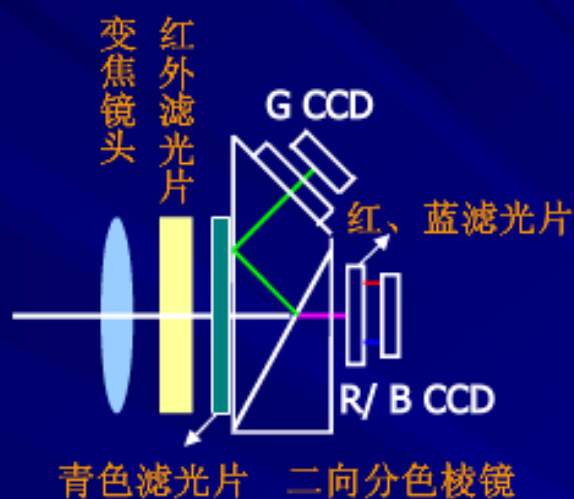
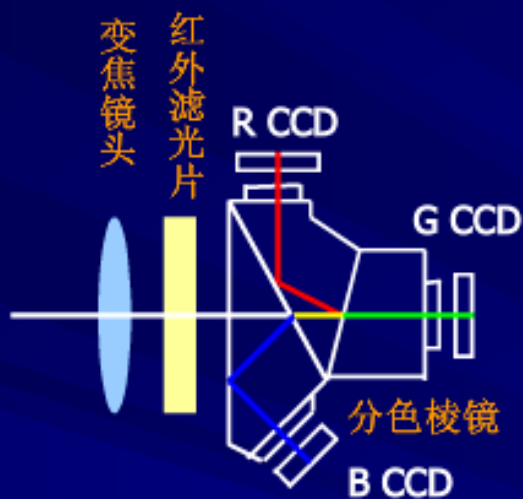
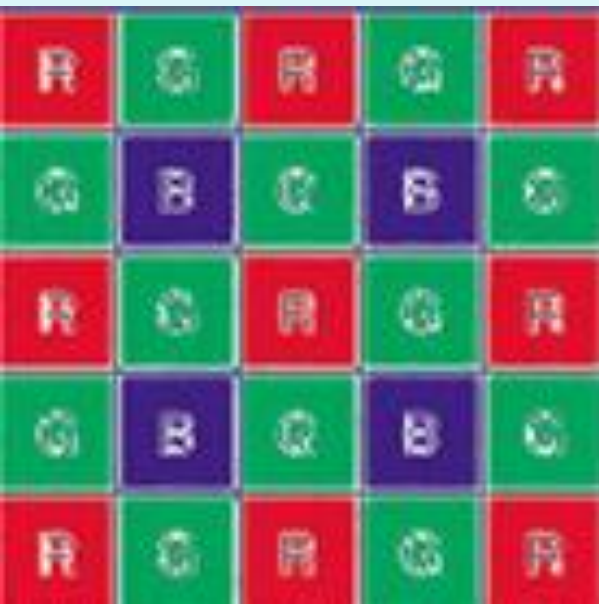


图 8-26 CCD 图像传感器

彩色摄像机的分光：棱镜和滤色片分光

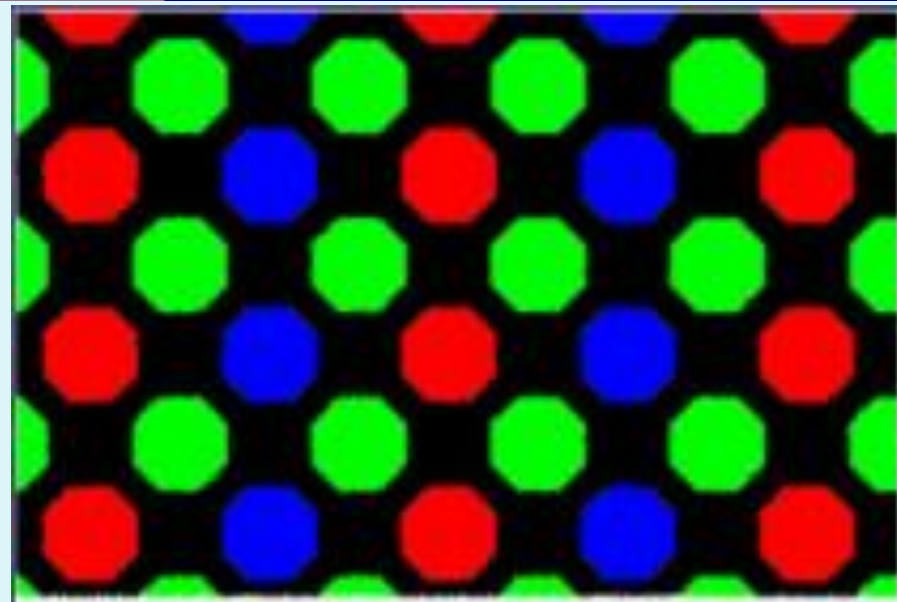


(a)三板式的棱镜分光 (b)二板式的二向色棱镜分光 (c)单板式的方格图案滤色片分光



• 正方格排列

蜂巢型排列：
敏感度高、可
获得有效像素
数高的解像度；
光学系统及周
边设备复杂，
价格高



蜂巢型排列

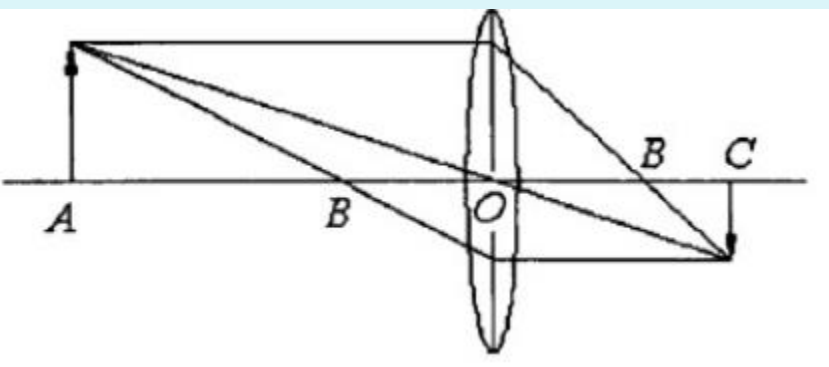


(2) 镜头

- 镜头相当于人眼的晶状体，如果没有晶状体，人眼看不到任何物体；如果没有镜头，那么摄像头所输出的图像就是白茫茫的一片，没有清晰的图像输出。
- 镜头接口以C型接口为最多，镜头直径多数是25.5、27、30.5mm
- 镜头的F值（焦距/镜头口径）一般是1.4，明亮镜头的F值是1.3左右。
- 对于C型接口镜头，焦距：3.5、4.5、6、8、12.5、16、25、50、75mm

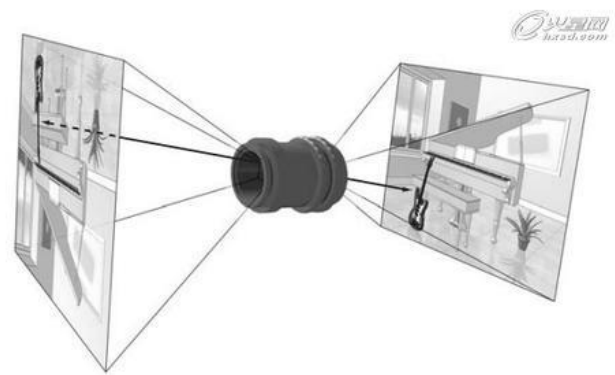
(2) 镜头

- 视角：将拍摄的视野与到对象物体的距离的关系用角度来表示的参数。



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{m} + \frac{1}{n}$$

其中： $f = OB$ ，为透镜焦距； $m = OC$ ，为像距； $n = AO$ ，为物距。



图像的投影

$$x = \frac{-fX}{Z}, y = \frac{-fY}{Z}$$

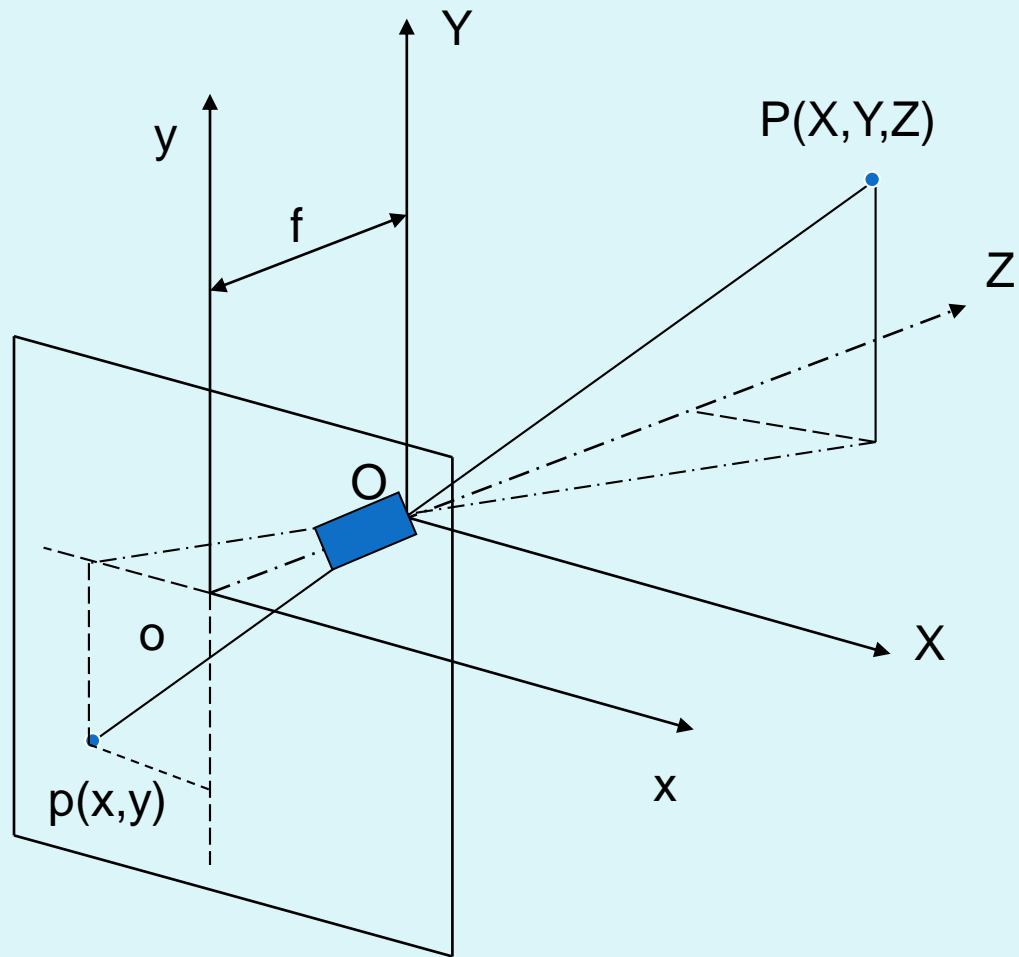
O : 原点, 透镜中心。

Z 轴: 光轴, 摄像机的前方

xy 轴: 组成图像面。

P 点: 物体上一点。

p 点: P 在图像面上的投影



● (3) 摄像机

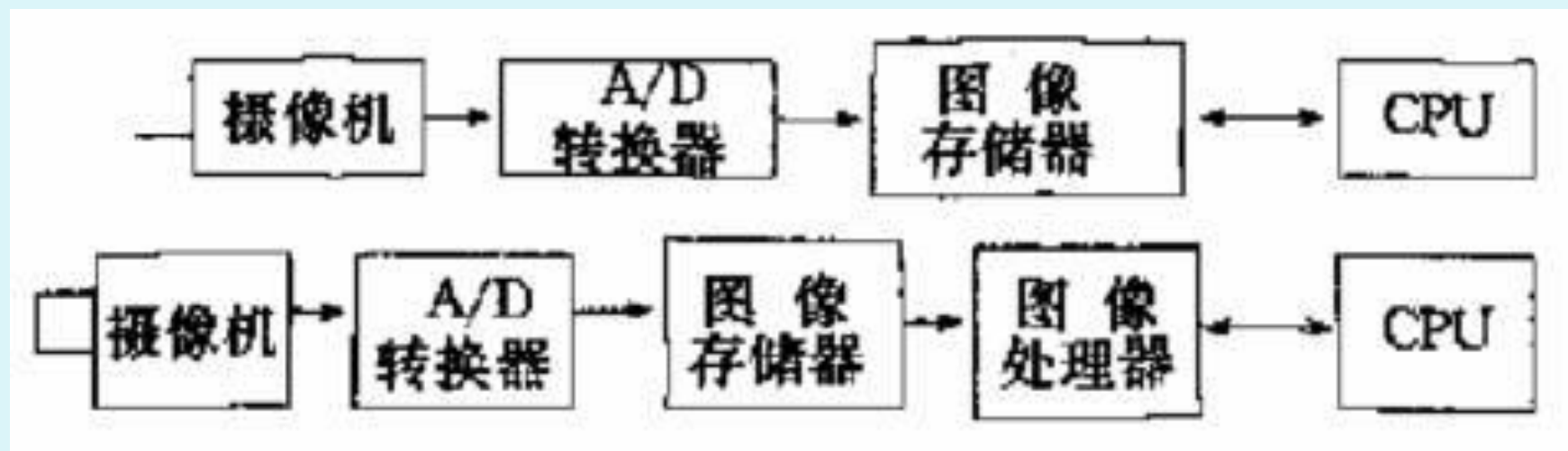
- 主要由一个或多个摄像传感器、镜头、一个扫描发生器、增幅（放大器）和信号处理器组成的外围电路。
- 一个彩色TV摄像机具有三个图像传感器，被分配对三原色（红（R）、绿（G）、蓝（B））或者其补色。机器人视觉系统中通常采用具有一个图像传感器的摄像机。
- 在野外的情况下，光照依据环境而变化，光圈控制系统是必须的。由于环境影响色温，进而在摄像机中具备一个自动化的色温控制系统也是十分重要的。

(3) 摄像机

- **白平衡：**不管在任何光源下，都能将白色物体还原为白色，对在特定光源下拍摄时出现的偏色现象，通过加强对应的补色来进行补偿。一般是以G信号为基准来调节R和B。
- **对于农产品：**除了花以外，几乎都处在从绿色到红色的可见光区域的长波长一侧。因此如果缩小对蓝到绿色的敏感度，提高对绿到红色的敏感度，微小的颜色差别也能够很容易地检测出来。

● 图像输入装置及其处理装置

- 从摄像机的输出信号是一个模拟电波图像信号，这个模拟信号通过数模转换（A/D）器来完成。经过A/D转换后，输出信号就被转换为数字信号。
- 当对图像处理速度要求不高时，计算机能通过读图像数据到内存中进行图像处理，如图中上侧所示。
- 由于图像可能具有大量的信息，有时候也需要一个专用的图像处理器来进行图像的快速处理，如图的图下侧所示。



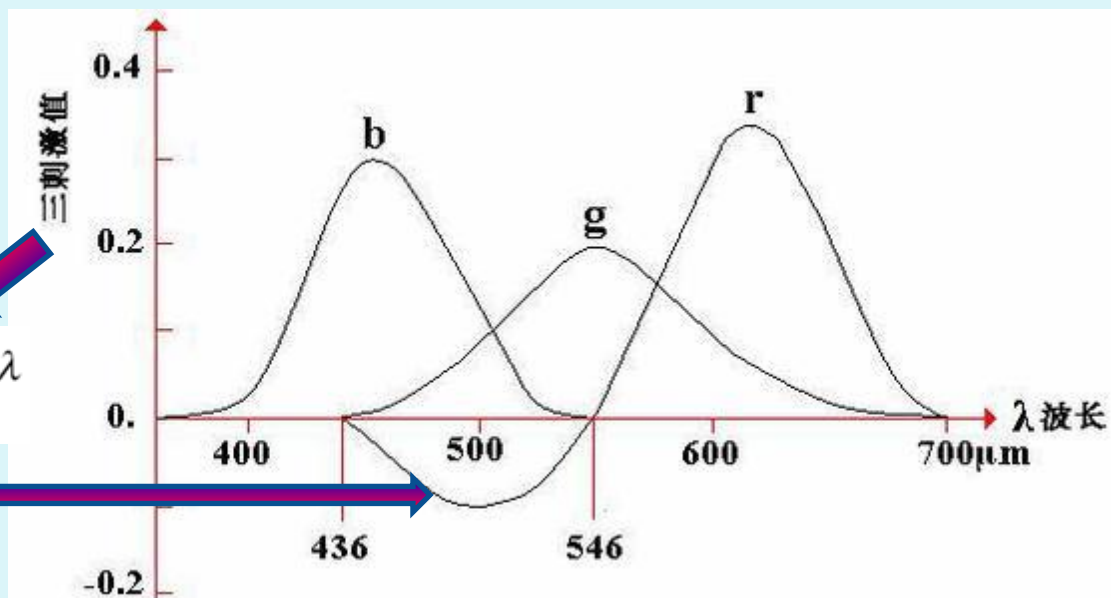
7、机器视觉软件

- 1) 颜色变换：农产品多数具有颜色特征，对彩色摄像机的RGB信号采取颜色变换，通过提取特定的颜色，识别对象。
- (a) 色度变换：一般所谓的红、绿、蓝三原色表色是将人眼的敏感度间接用配色函数来表示。人们使用此配色函数对色彩加以描述运用。

- 选定700nm、546.1nm、435.8nm作为三原色波长
- RGB表色系的配色函数

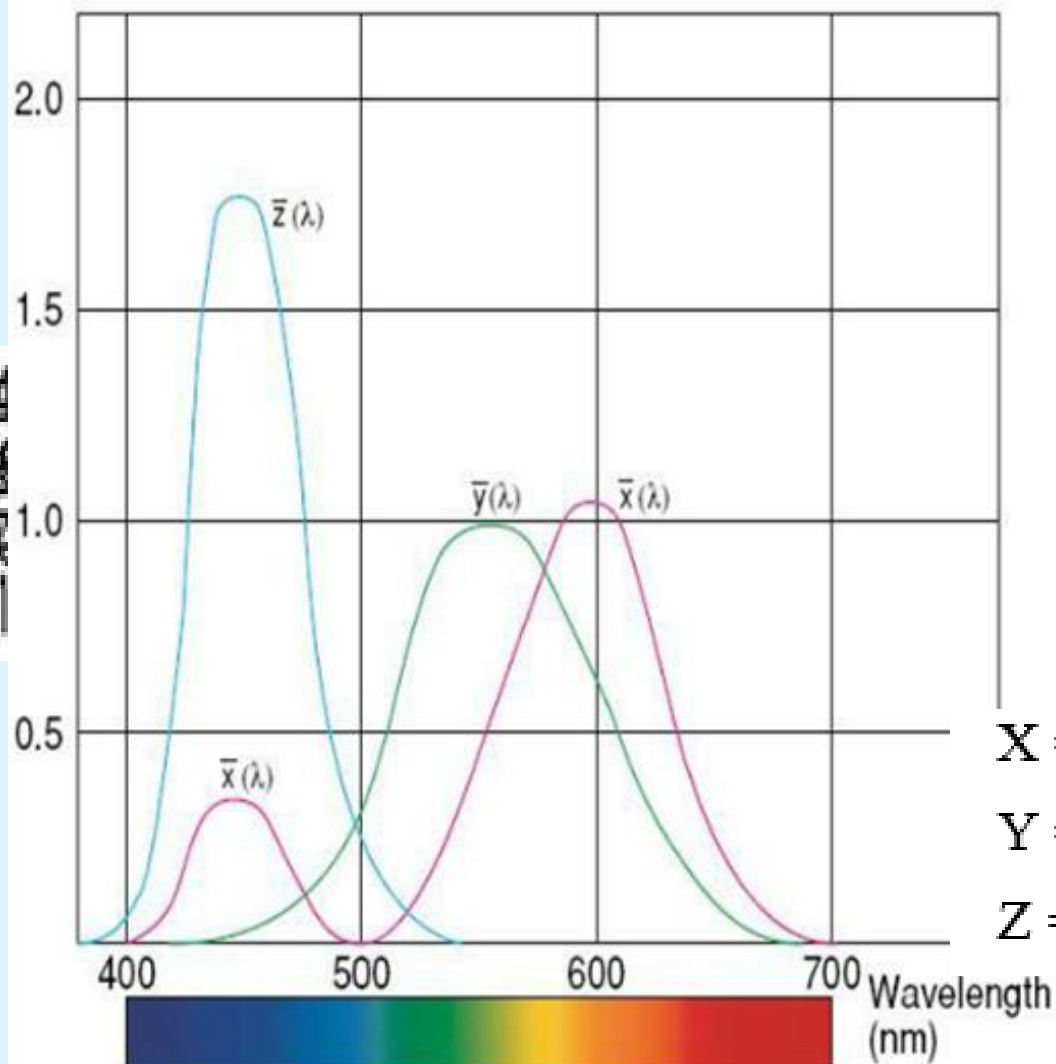
$$R = \int_{\lambda} p_{\lambda} r_{\lambda} d\lambda, G = \int_{\lambda} p_{\lambda} g_{\lambda} d\lambda, B = \int_{\lambda} p_{\lambda} b_{\lambda} d\lambda$$

负值



(a) 色度变换

- XYZ表色系配色函数：



此图描述的是人眼对假想的三原色X0、Y0、Z0的感应度。

原色(X0): 饱和度比光谱红还高的红紫色

原色(Y0): 饱和度比520nm光谱绿还高的绿

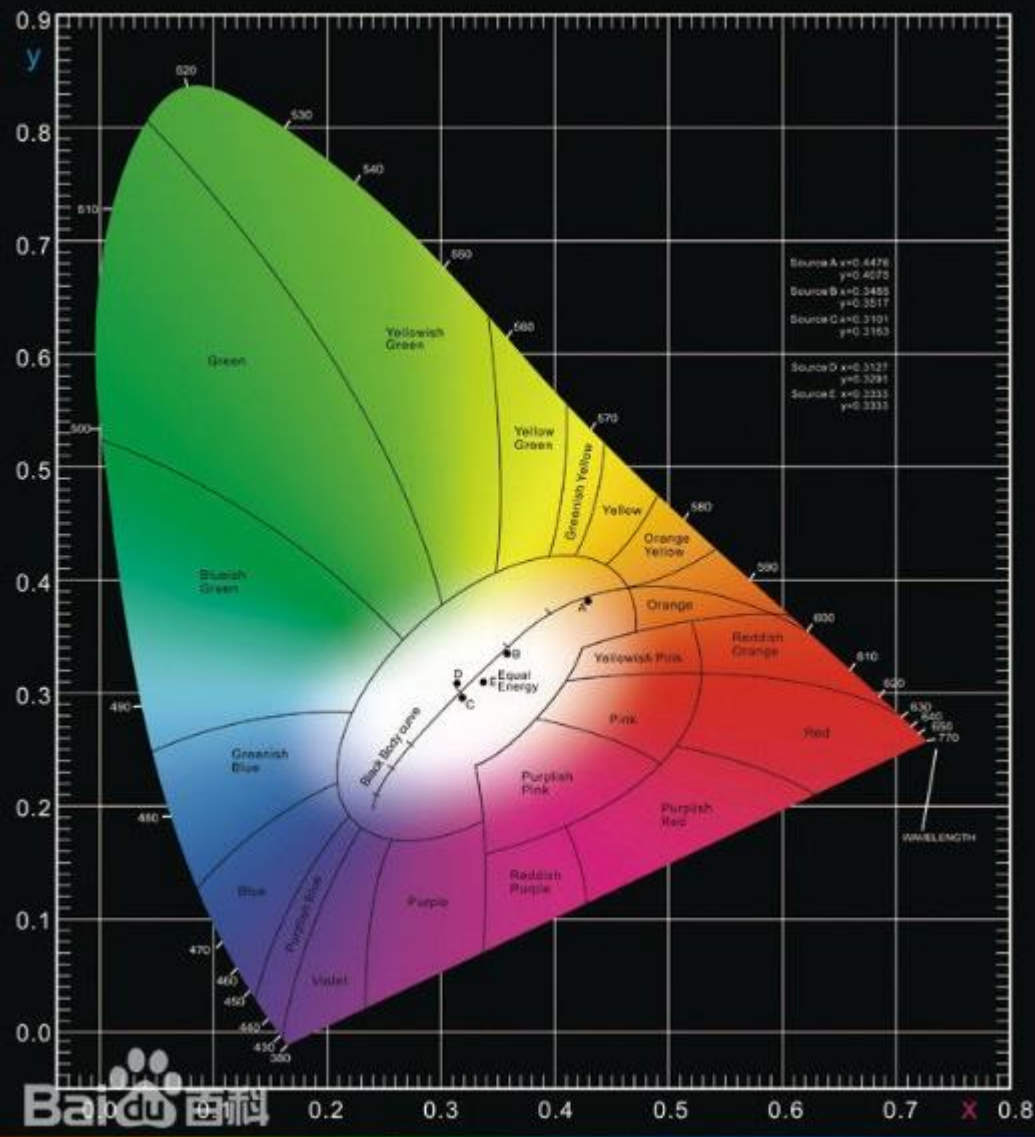
原色(Z0): 饱和度比477nm光谱蓝还高的蓝

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B$$

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B$$

$$Z = 0.0000R + 0.0565G + 5.5943B$$

CIE1931_{2°} 色度图 CHROMATICITY DIAGRAM



色度坐标

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y$$

亮度Y

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B$$

该表色系及色度变换特性：
绿色部分人的视觉无法区分；
蓝色部分有区别；亮度Y值
增加到2倍，人类也只能感觉到增加了1/3次幂左右的亮度。

XYZ表色系的色度坐标

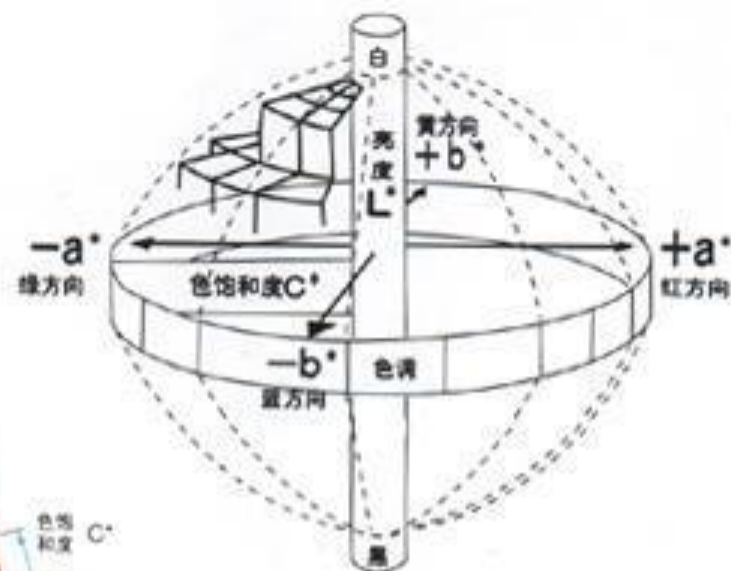
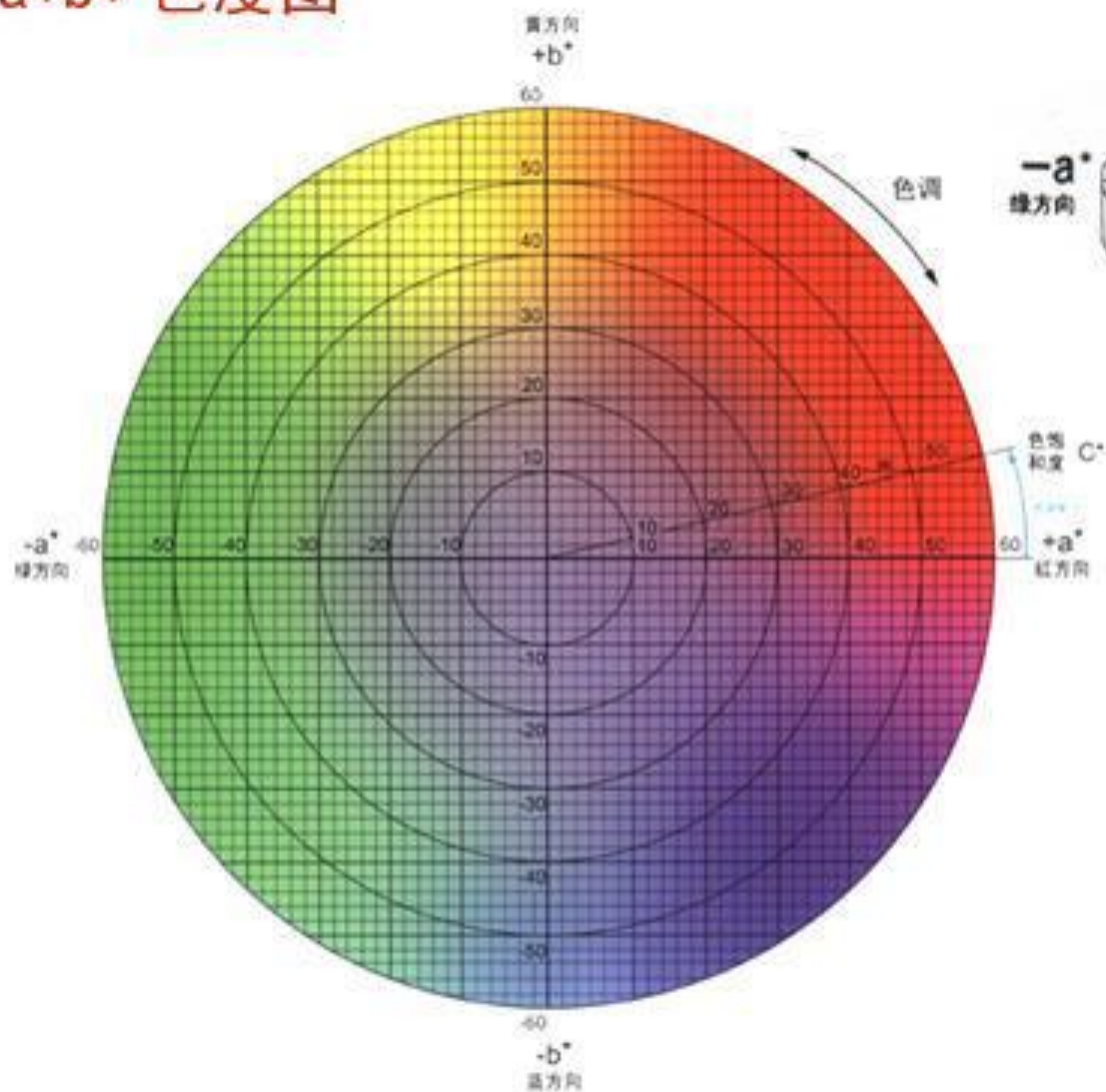
1) 颜色变换

- (b) $L^* a^* b^*$ 变换:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \\ b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \end{aligned}$$

- X_n, Y_n, Z_n 为标准照明时的白色基准值的三刺激值,
 $X_n=0.95, Y_n=1.0, Z_n=1.08892$

L*a*b* 色度图



7、机器视觉软件

- 2) 前处理:
 - (1) 边缘检测滤波: 使特征量的提取变得容易。
 - (2) 平滑化滤波: 平均化滤波、高斯滤波、中值滤波
 - (3) 灰度图像的各种处理:

排序滤波、图像间运算、灰度变换、快速傅立叶变换、二值化处理

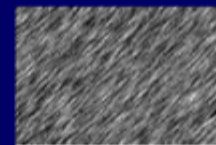
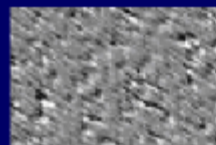
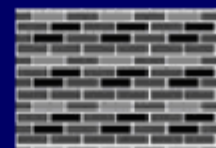
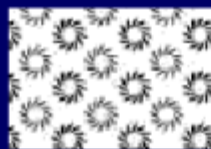
- (4) 二值图像的各种处理:

膨胀、腐蚀、收缩、开运算、闭运算、轮廓提取等。

7、机器视觉软件

- 3) 二值图像的特征量测量
 - (1) 尺寸：最大径、等价圆直径、惯性等价椭圆径
 - (2) 伪体积：从二维图像类推出三维体积
 - (3) 形状特征量：圆形度、复杂度、占有率、离心率等
- 4) 纹理特征量：

提到纹理，人们自然会立刻想到木制家俱上的木纹、花布上的花纹等。木纹为天然纹理，花纹为人工纹理，它们反映了物体表面颜色和灰度的某种变化。这些变化与物体本身的属性相关。



7、机器视觉软件

- 5) 深度测量和立体视觉
- 在生物生产中，经常需要机器人从场景中捕获深度数据。测量深度数据有两种基本不同的光学技术：主动法和被动法。前者又可细分为传播时间法和三角测量法。被动方法与双目视觉（即立体视觉）相似
- (1) 传播时间 光学传播时间测距仪通常由发射一个校准光束发射器，一个扫描机构，一个检测在对象物上反射光的接受装置组成。通过光从发射器到对象物并返回的时间可以获得距离。

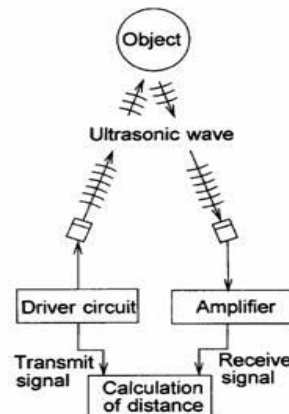
- **(2) 主动三角测量** 就是用透光器来代替双目视觉系统中一个眼睛，例如一平面光或聚光灯从一个方向投影在对象物上，同时一个摄像机从另外一个方向检测它的图像。
- **(3) 立体视觉** 被动立体视觉在人双目视觉能工作原则下的各种情况下也都能工作。尽管立体视觉有潜力，但其还没有在工业上广泛应用。
- **(4) 具有明显特征的立体视觉** 如果从两幅图像中很容易检测出明显特征，立体匹配是相当容易。大多数实际系统都在这种情况下工作。例如，在生产线上用立体视觉来定位悬挂在机器上的一个柔软管。两个摄像机从不同方向（成90度夹角）来检测管的中心。管中心的3-D位置能通过两个摄像机中心位置计算出来。由于可设置环境使管可从每个图像背景中分离出来，这个检测是相当容易的。

(二) 除机器视觉外的传感器 (外部传感器)

● 1、 距离传感器

● (1) 超声波传感器

- 超声波是耳朵不能听见的高频弹性波，其传播媒介有气体、液体、固体。超声波在测试技术上的应用实例有鱼群探测器、超声波探伤仪、超声波厚度仪、流速流量测定、距离测定和物理检测。
- 在机器人领域，超声波被用于测定机器人和被测物体间的距离。如在空气介质中的测量方法。其原理是，将超声波向对象物发射，通过测出从发射到对象物而又反射回来的往返时间实现测距。



● 1、 距离传感器

- (2) 激光测距传感器：
- 是利用激光对目标的距离进行准确测定的传感器。激光测距传感器在工作时向目标射出一束很细的激光，由光电元件接收目标反射的激光束，计时器测定激光束从发射到接收的时间，计算出从观测者到目标的距离。

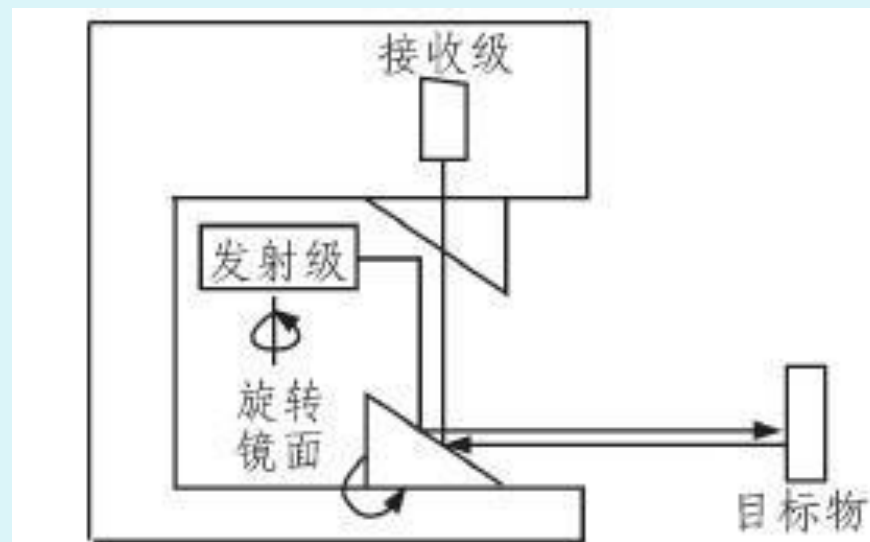


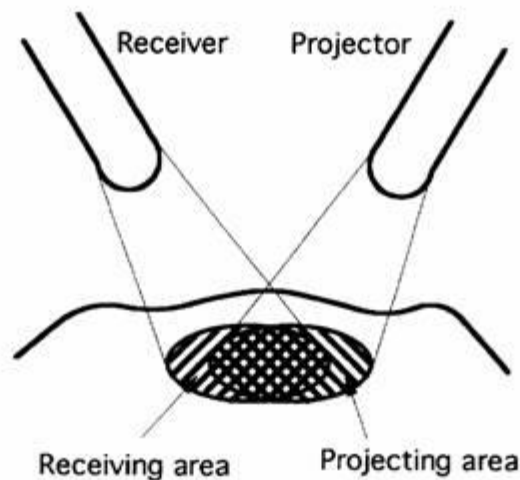
图 1 激光扫描测距传感器工作原理图

● 2、接近传感器

- 接近传感器是指用于近距离对象物的存在检测、冲突防止、形状检测以及修正视觉传感器的位置误差的传感器。这些传感器通常装在手抓等的有限空间处，所以要求小型、轻便。目前常用的接近传感器有以下几种。

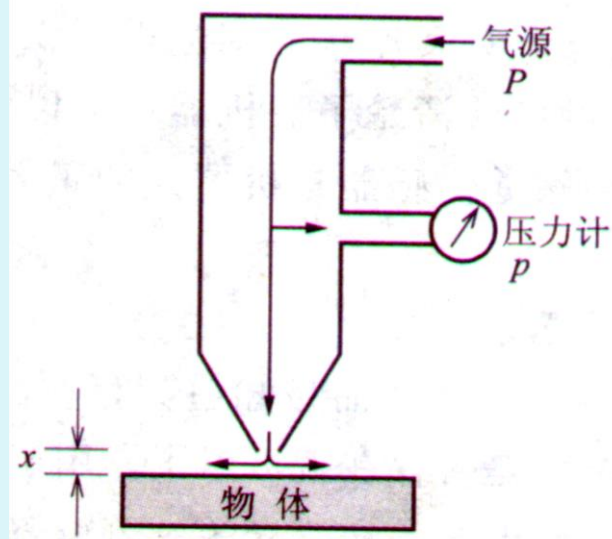
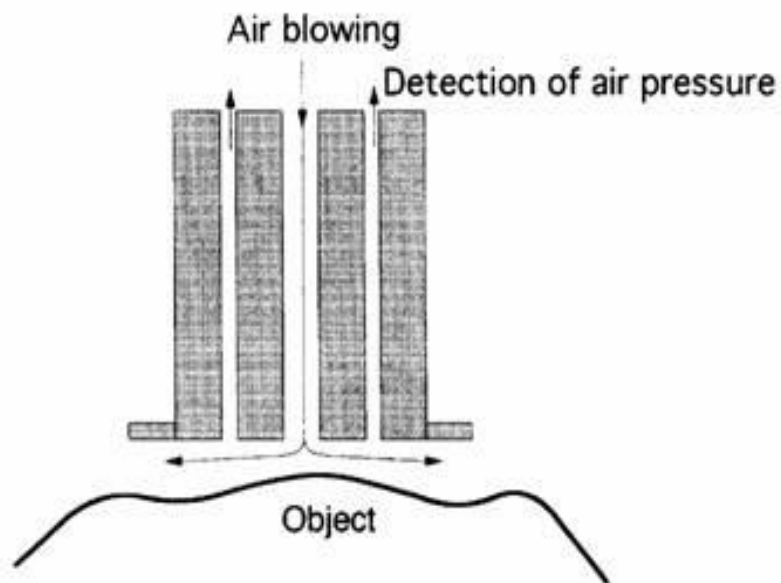
- (1) 光利用型传感器

当对象物的反射系数，光源方向和亮度为常量时，距离可以通过照明度来决定



● (2) 流体利用型传感器

- 将气体或流体喷射到对象物上，测其压力及流量的变化，从而检测出对象物的存在以及到对象物的距离。在喷射定压气流的空气喷嘴前方存在对象物时，喷嘴的背压随距离产生变化



● 3、触觉传感器

- 触觉传感器主要包括接触传感器、压觉传感器、滑觉传感器三大类。每一种类型都是基于与外部对象物的直接接触。
- (1) 接触传感器
- 当接触式传感器检测所接触的对象物时，传感器将会输出开关信号。接触传感器可以由微型开关组成。
- 微动开关：按下开关就能进入由信号简单机构

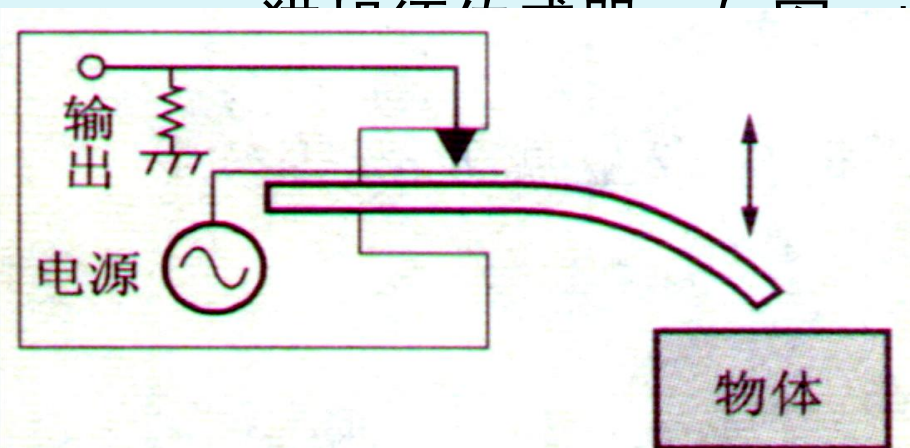


图3-5 (a) 机构

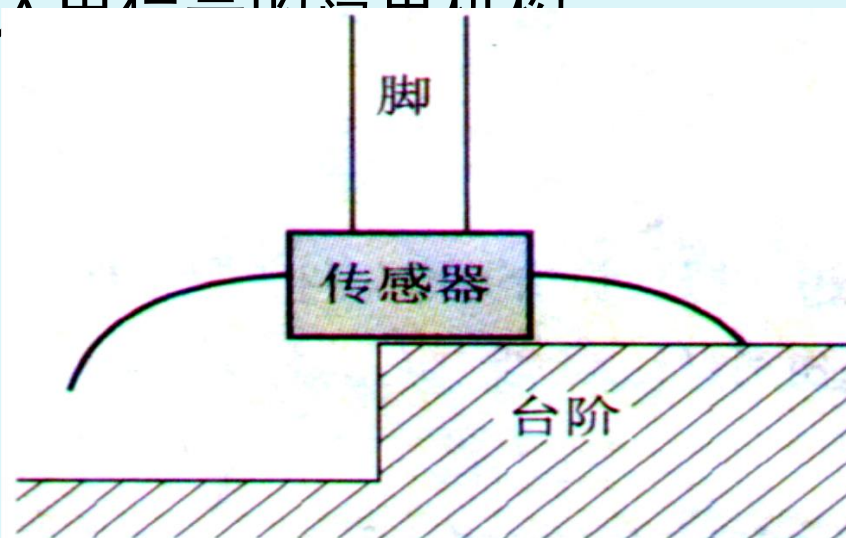
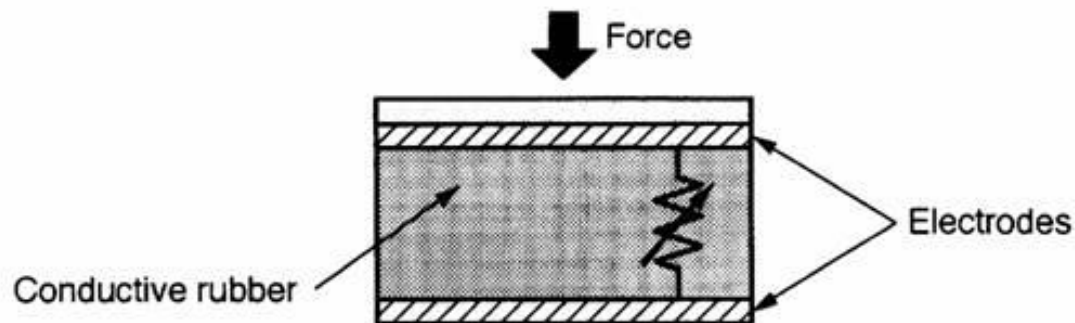


图3-5 (b) 使用例

● 3、触觉传感器

● (2) 压觉式传感器

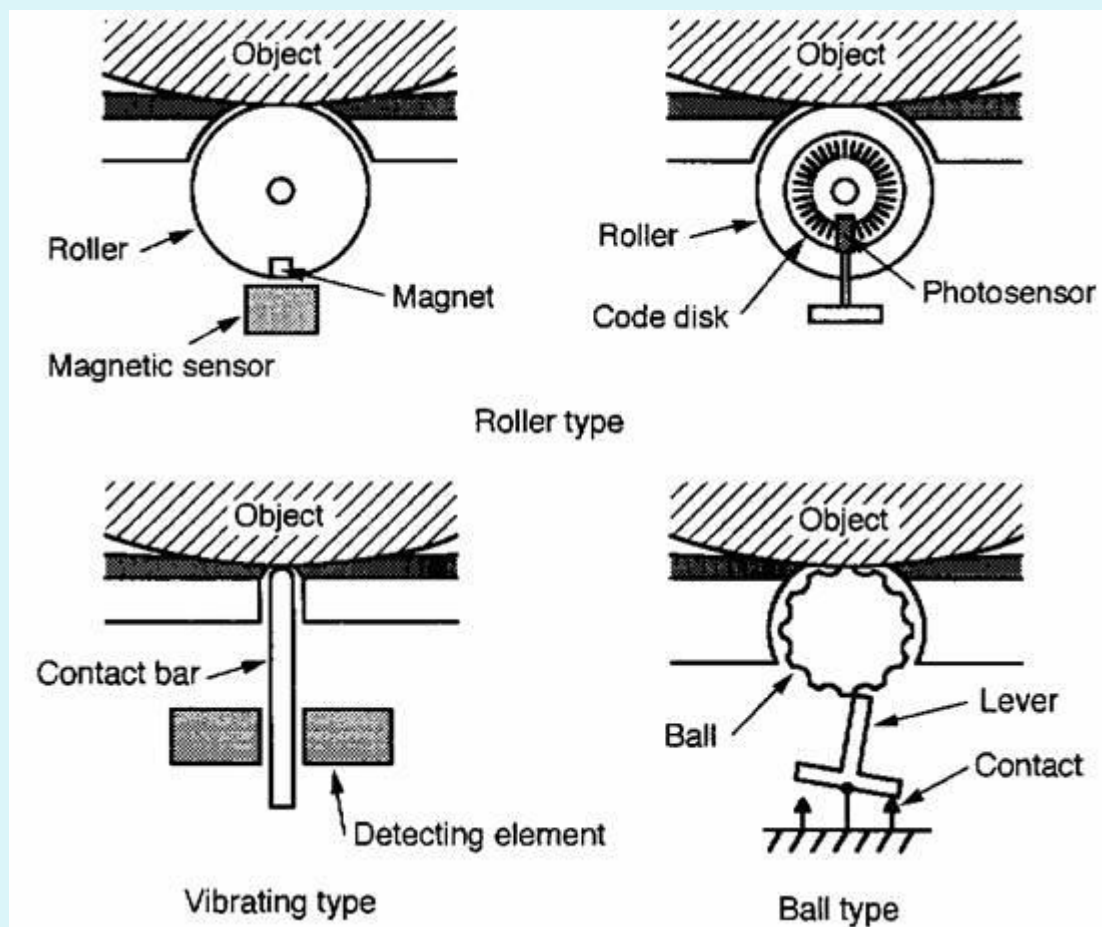
- 压觉式传感器从对象物检测到外力后输出的是模拟信号。图示为使用传导橡胶的压觉式传感器实例。因为当挤压时传导橡胶的阻抗会变小，所以外力可以通过测量得到的插在两电极间的传导橡胶的阻抗来计算。



（3）滑觉传感器

- 滑觉传感器检测对象物的滑行位移。

滚柱型传感器在一个方向上检测滑行位移。对象物滑行引起滚柱旋转，通过磁力或光学传感器检测到。振动型传感器检测的不是滑行方向，而是滑行的位移和速度。当对象物滑行时，接触棒沿着物外形而振动。通过如压电传感器，线圈来检测到振动并由此得到位移。球型传感器也可以在二维平面上检测对象物的滑行方向。



(二) 内部状态的感觉

1、位置传感器

典型的传感器是电位计。检测的是以电阻中心为基准位置的移动距离。

$$\chi = \frac{L(2e - E)}{E}$$

E : 输入电压

L : 最大移动距离触头

X : 向左端移动的距离

e : 电阻右侧的输出电压

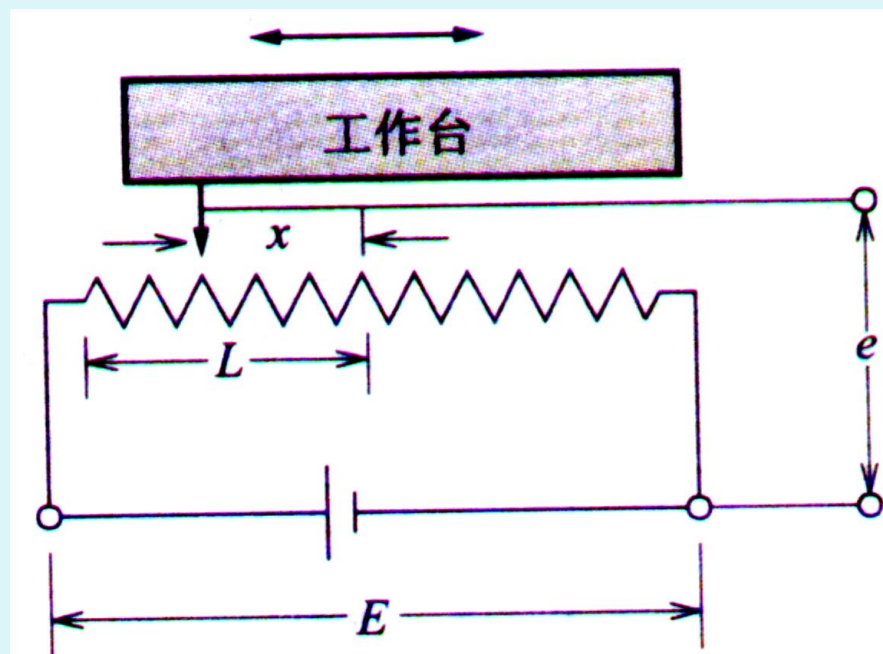
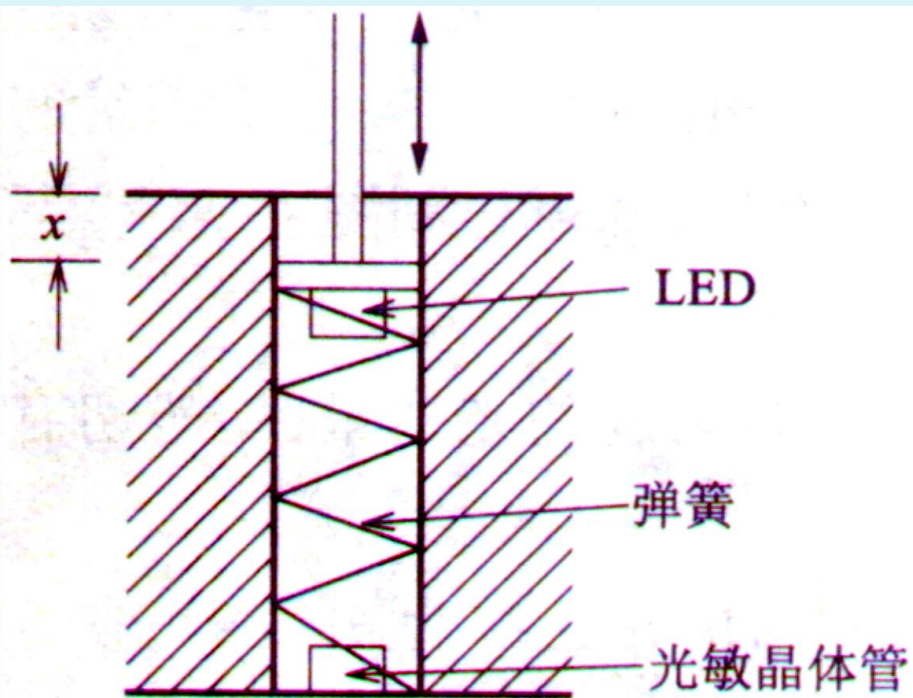


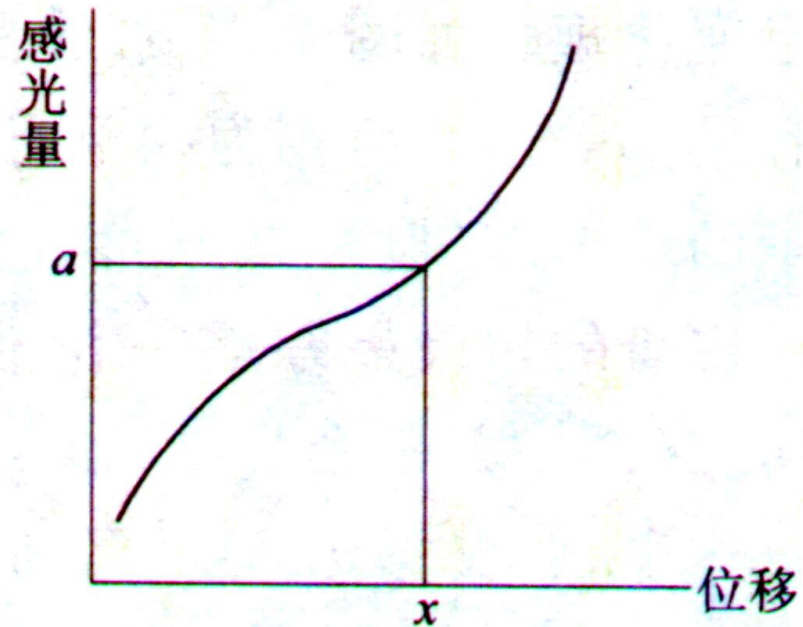
图3-1

位置传感器 1

- 另有光电传感器



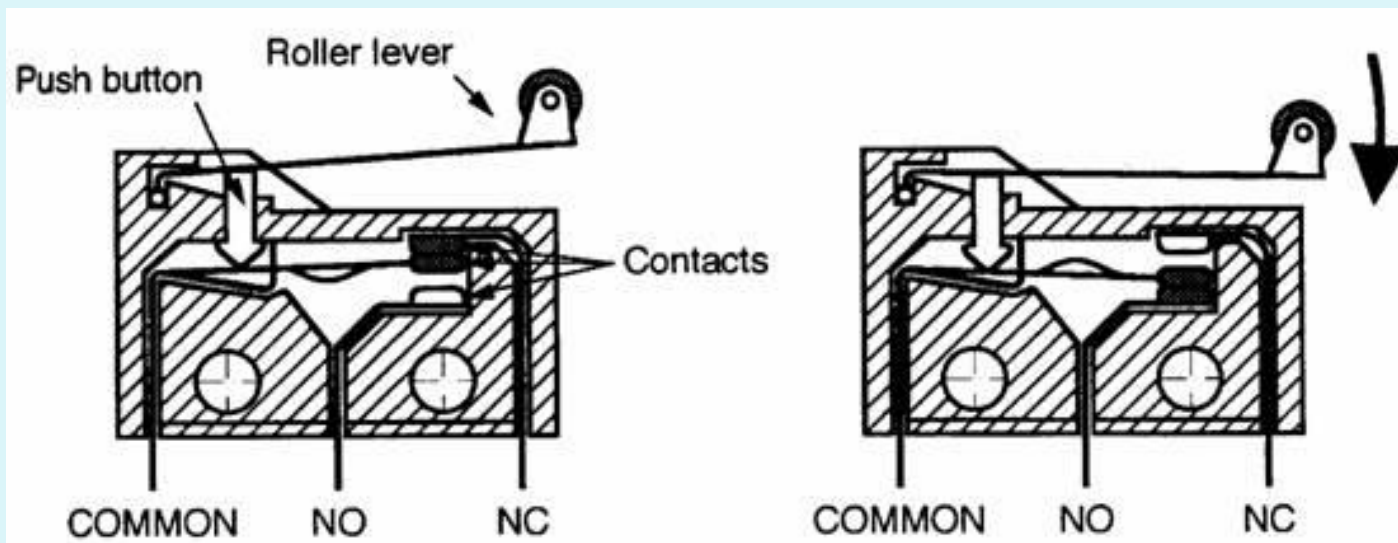
5.2 (a) 机构



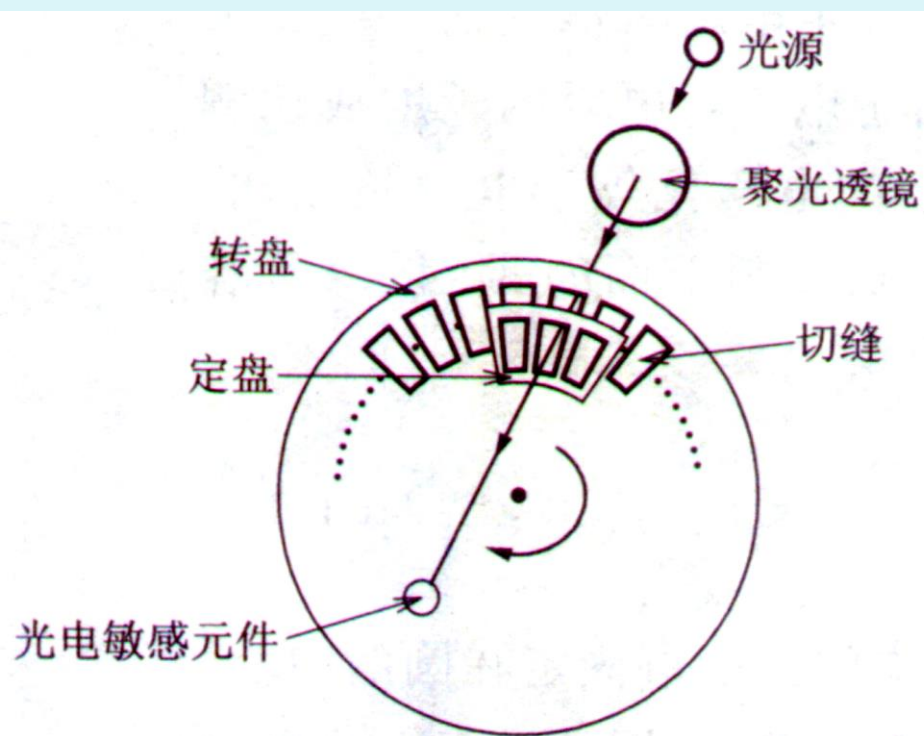
5.2 (b) 感光量曲线

- 微型开关

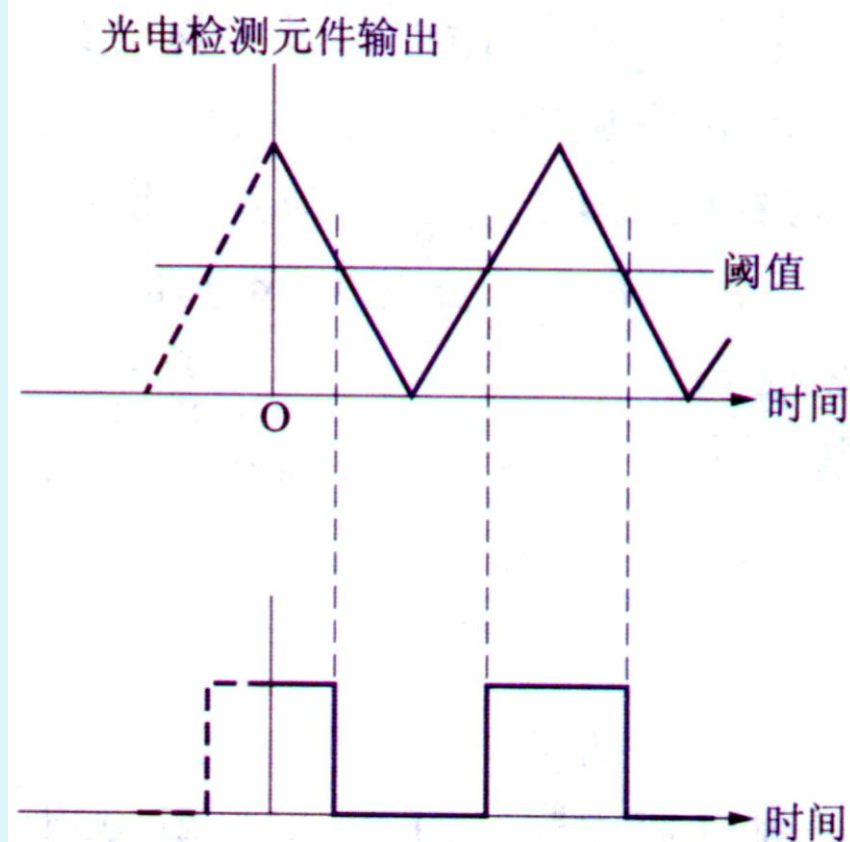
- 微型开关被广泛的应用于极限开关，极限开关是一种当按钮通过控制杆释放时打开或关闭电路的一种开关。



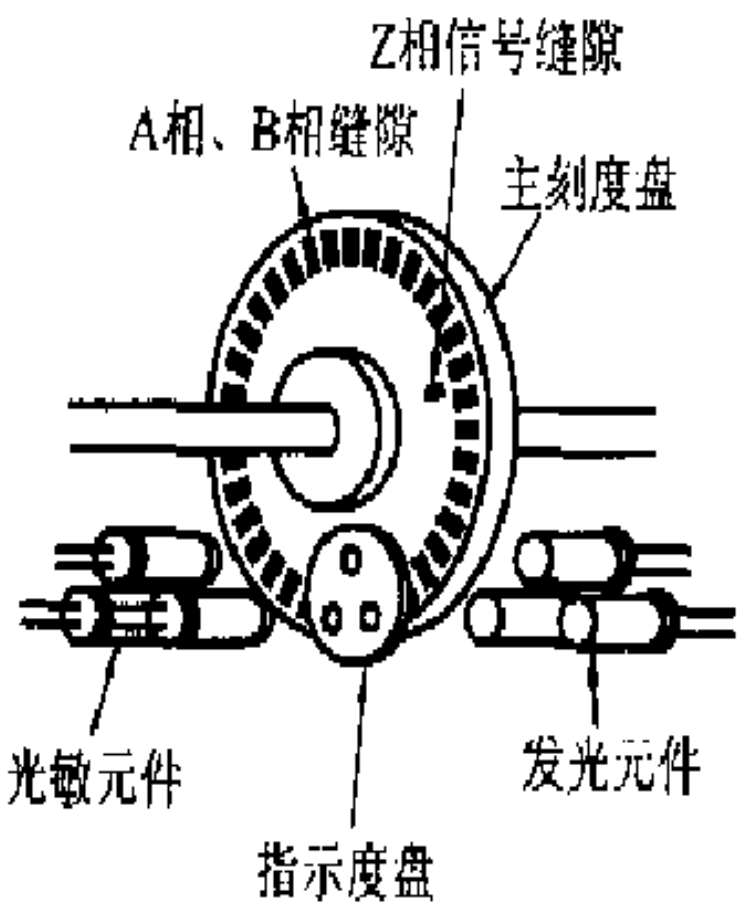
2、角度传感器： 回转式编码器



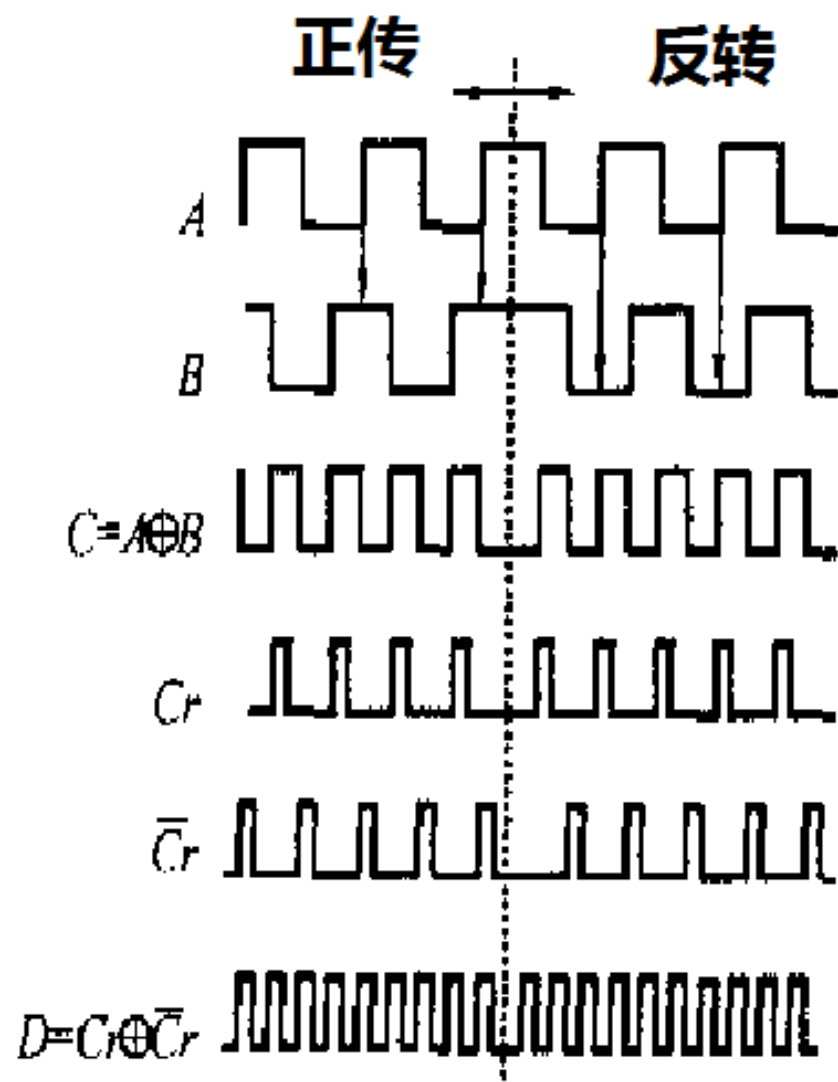
5.3 (a) 机构



5.3 (b) 输出波形



编码器的结构



编码器输出波

3、 速度、角速度传感器

进行速度与角速度的检测时，常采用位置与角度传感器。例如，对由电位仪测得的连续信号进行微分便可求得速度。递增式编码器的场合，经对输出脉冲进行 $F - V$ 变换（频率—电压转换）便可获取与速度成正比的电压。

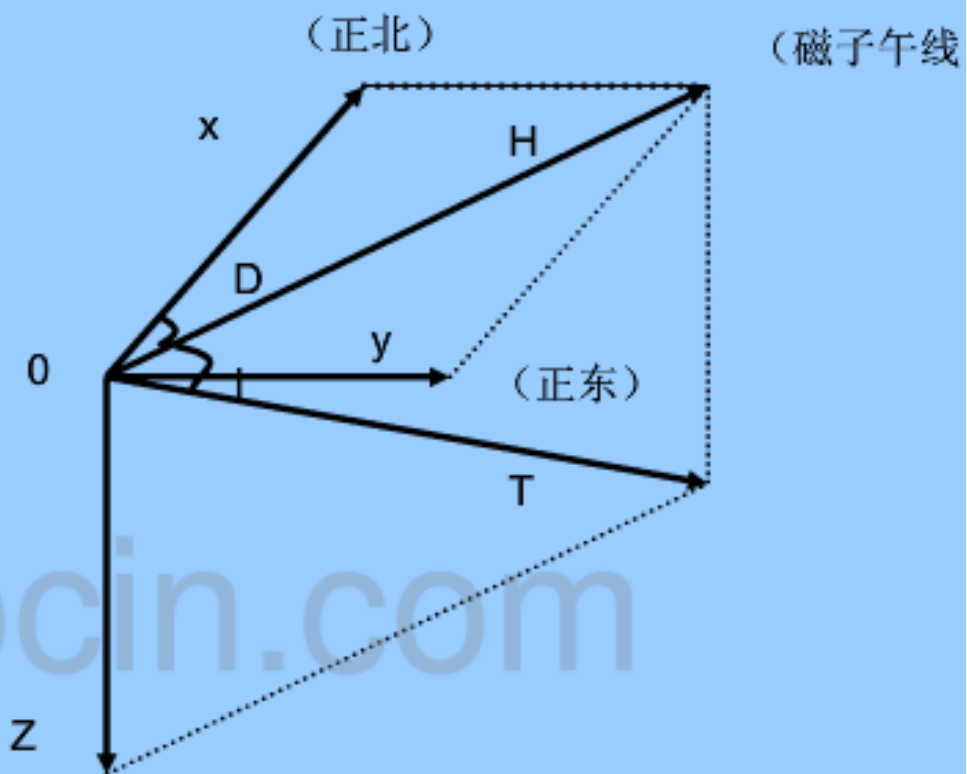
4、方位角测量

方位角传感器包括陀螺仪和地磁传感器

- (1) 地磁方位传感器

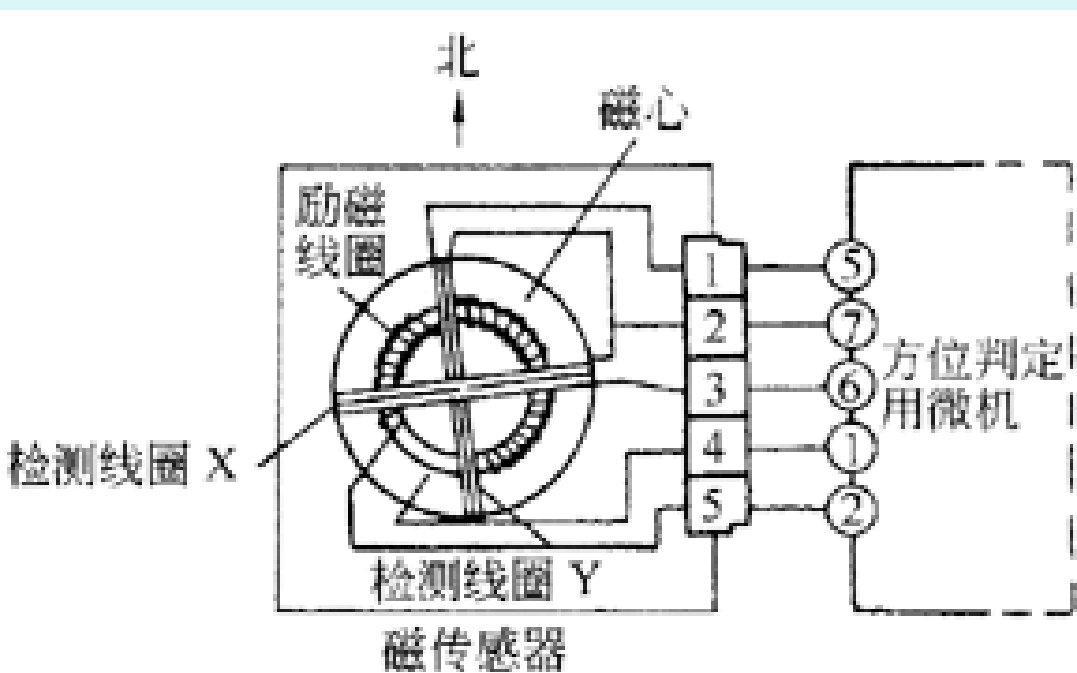
为了描述地磁场，将地面上任一点的地磁场总强度在一确定直角坐标系下分解开，其中每一描述该点磁场特征的量都称为一个地磁要素。

T为该点地磁场总强度。直角坐标轴**x**指向地理正北，**y**轴指向东，**z**轴垂直向下。**T**在三个坐标轴上的投影分别为北向分量**X**、东向分量**Y**和垂直分量**Z**；**T**在**xoy**水平面内的投影称为水平分量**H**，它指向磁北方向；**T**与**H**间的夹角称为磁斜角**I**，**T**与**X**间的夹角称为磁偏斜角**D**。

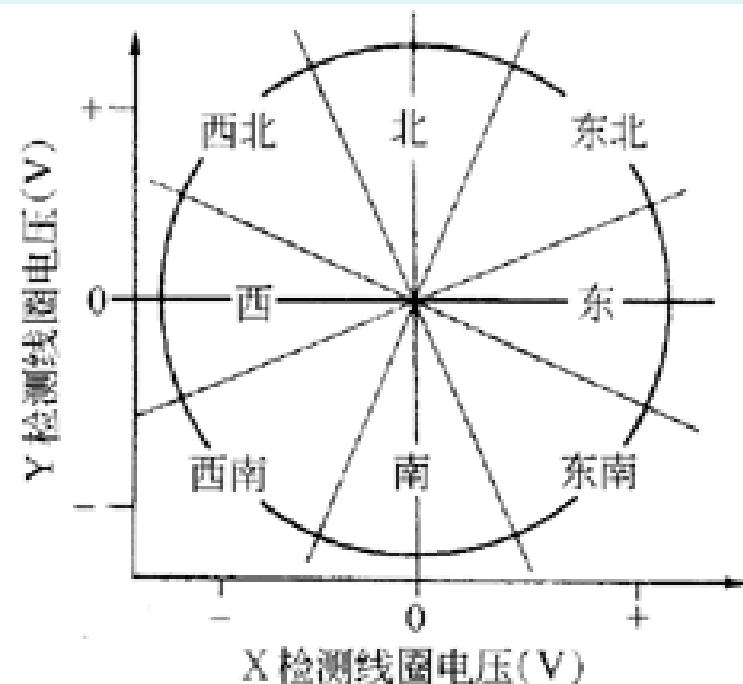


(1) 地磁方位传感器

- 磁通量闸门式方位传感器是利用地磁进行检测的传感器，励磁线圈在环状磁心上产生强度、方向周期变化的磁测定与磁场交链的检测线圈X、Y的输出电压，即可知道所示的方位了。



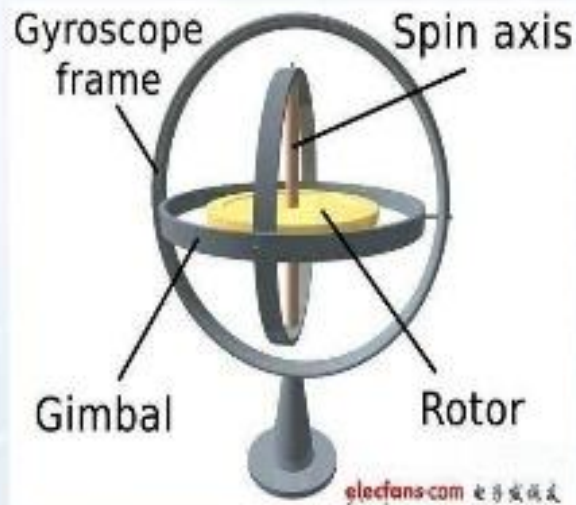
(a) 指示原理图



(b) 方位判断图

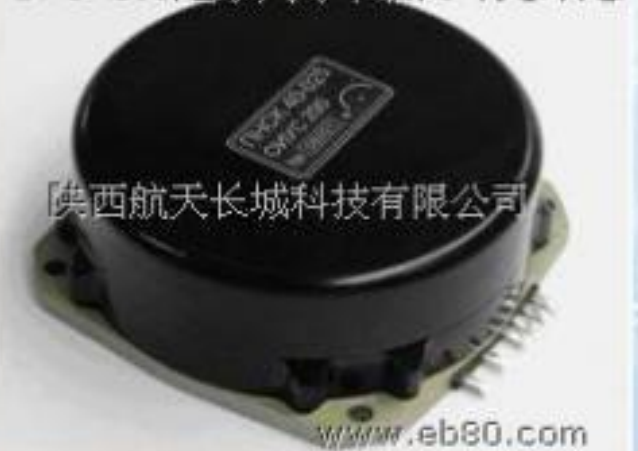
(2) 陀螺仪

- 陀螺仪（英文：gyroscope），是一种用来传感与维持方向的装置，基于角动量守恒的理论设计出来的。陀螺仪主要是由一个位于轴心且可旋转的轮子构成。陀螺仪一旦开始旋转，由于轮子的角动量，陀螺仪有抗拒方向改变的趋向。



机械陀螺

SPS-200超小尺寸单轴闭环光纤陀螺



光纤陀螺仪

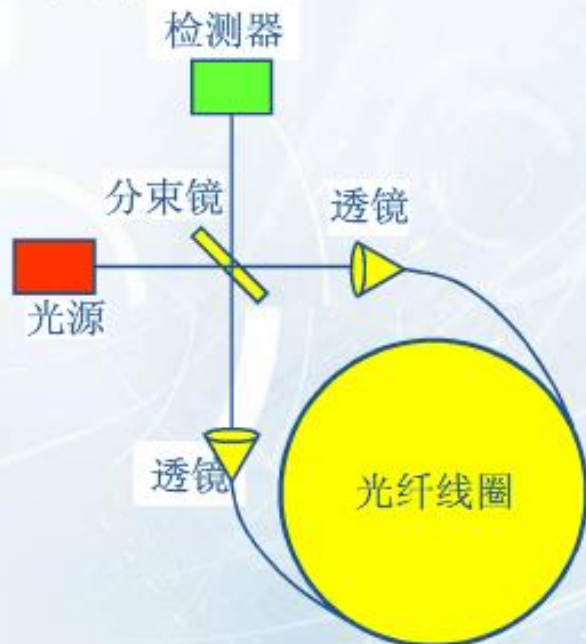


光纤陀螺

光纤陀螺仪

- 光纤陀螺仪是以光导纤维线圈为基础的敏感元件，由激光二极管发射出的光线朝两个方向沿光导纤维传播。光传播路径的变，决定了敏感元件的角位移。

❖ 各种类型的光纤陀螺, 基本原理都是利用 Sagnac 效应, 只是各自所采用的位相或频率解调方式不同, 或者对光纤陀螺的噪声补偿方法不同。



光纤陀螺结构图

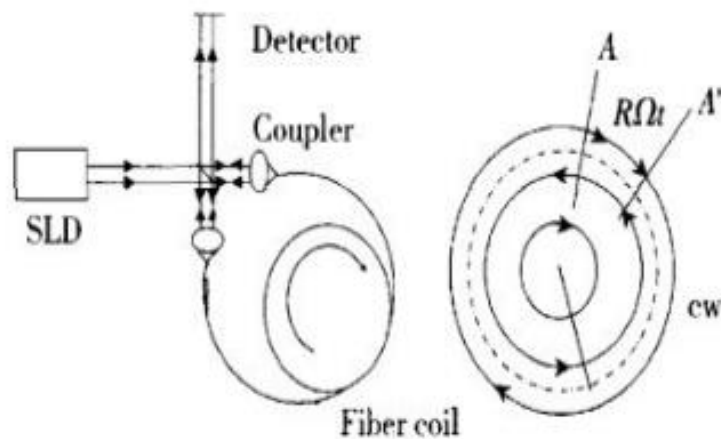
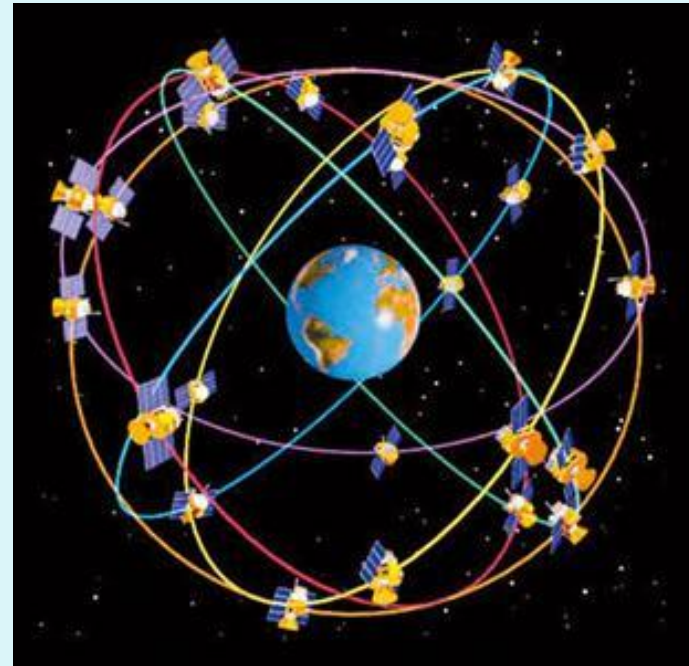


图 1 光纤陀螺的原理结构图

Fig. 1 Schematic diagram of sagnac FOG

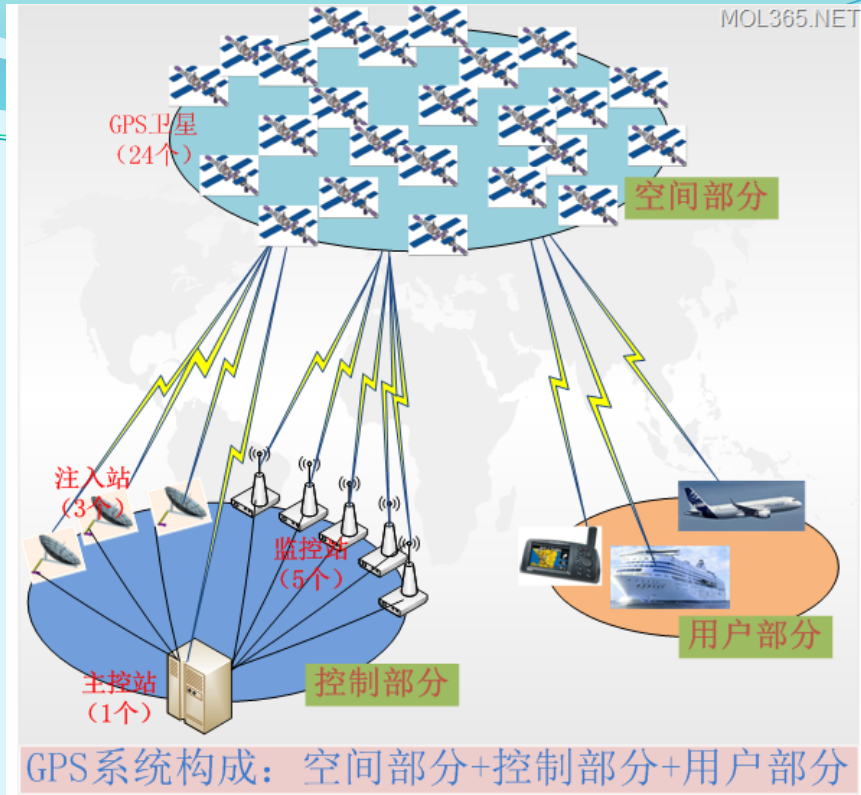
- 5、其他传感器
- 利用声波：语音识别传感器。分析振动声音探测机械故障的点传感器。
- 热传感器：点检传感器。
- 通过分析敲打的声音测定果品成熟程度的传感器。
- 根据近红外线的糖度吸收程度测定水果甜度的传感器。
- GPS：全球卫星定位系统



GPS: 全球卫星定位系统

- GPS包括三部分

- (1) 空间部分



GPS的空间部分是由24颗卫星组成(21颗工作卫星, 3颗备用卫星), 它位于距地表20200km的上空,均匀分布在6个轨道面上(每个轨道面4颗),轨道倾角为 55° 。卫星的分布使得在全球任何地方、任何时间都可观测到4颗以上的卫星,并能在卫星中预存的导航信息。GPS的卫星因为大气摩擦等问题,随着时间的推移,导航精度会逐渐降低。

GPS: 全球卫星定位系统

- (2) 地面控制系统

地面控制系统由监测站(Monitor Station)、主控制站(Master Monitor Station)、地面天线(Ground Antenna)所组成,主控制站位于美国科罗拉多州春田市(Colorado Spring)。地面控制站负责收集由卫星传回之讯息,并计算卫星星历、相对距离,大气校正等数据。

GPS: 全球卫星定位系统

- (3) 用户设备部分

用户设备部分即GPS 信号接收机。其主要功能是能够捕获到按一定卫星截止角所选择的待测卫星，并跟踪这些卫星的运行。当接收机捕获到跟踪的卫星信号后，就可测量出接收天线至卫星的伪距离和距离的变化率，解调出卫星轨道参数等数据。根据这些数据，接收机中的微处理计算机就可按定位解算方法进行定位计算，计算出用户所在地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。

GPS定位原理

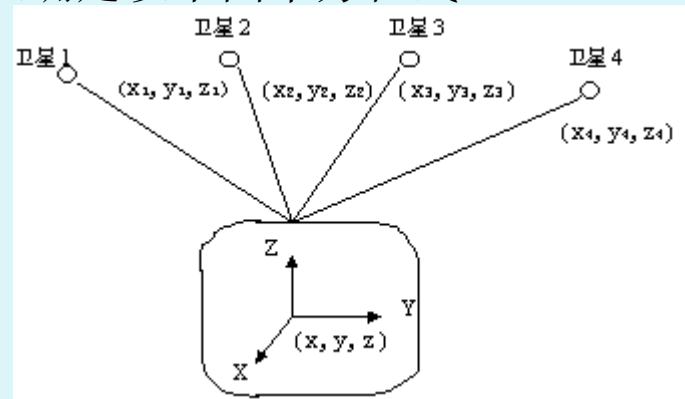
- t时刻在地面待测点上安置GPS接收机，可以测定GPS信号到达接收机的时间 Δt ，再加上接收机所接收到的卫星星历等其它数据可以确定以下四个方程式：

$$[(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_1}-\tau_{t_0})=d_1$$

$$[(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_2}-\tau_{t_0})=d_2$$

$$[(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_3}-\tau_{t_0})=d_3$$

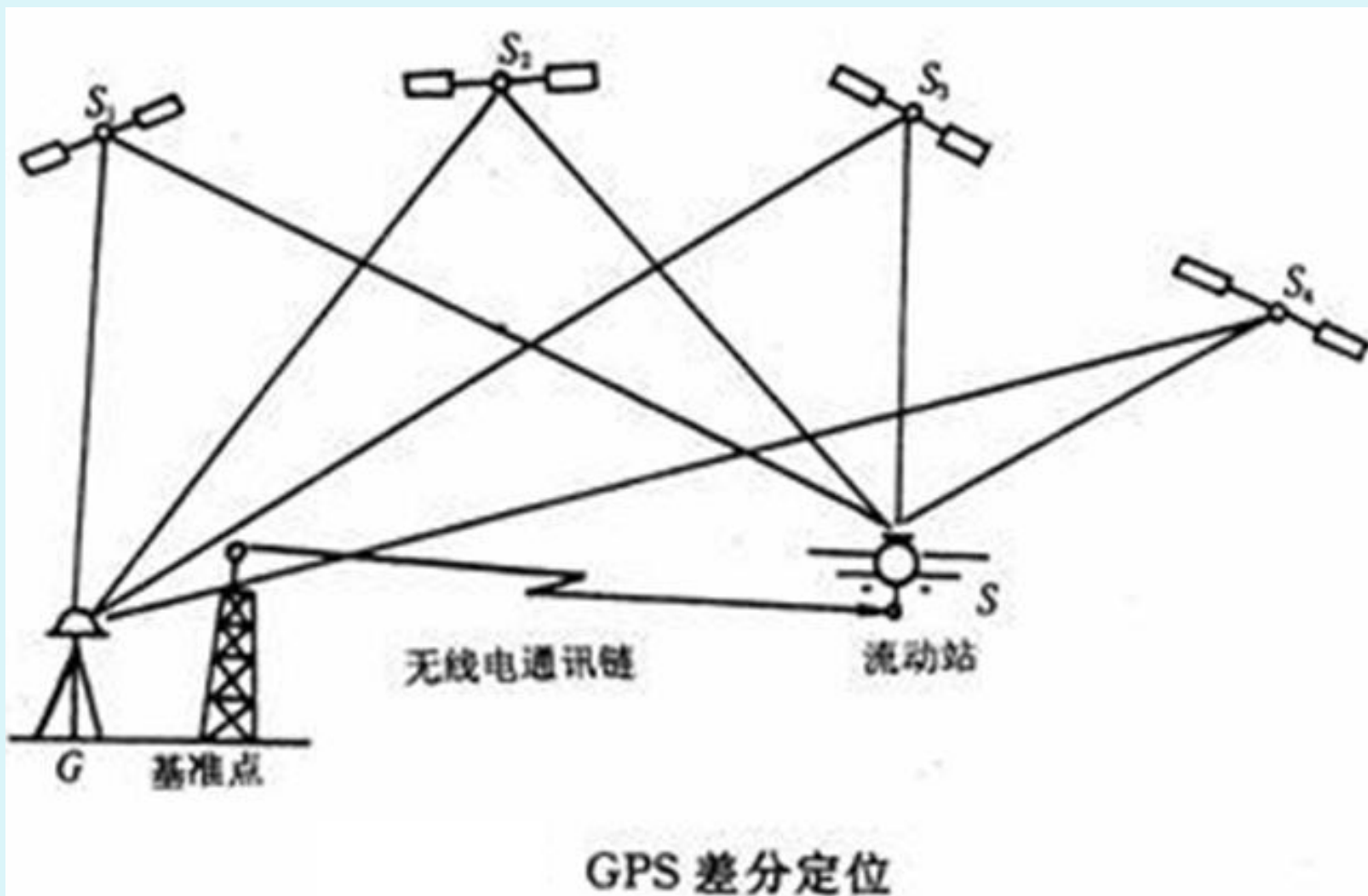
$$[(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_4}-\tau_{t_0})=d_4$$



- d_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为卫星1、卫星2、卫星3、卫星4到接收机之间的距离。
- c 为GPS信号的传播速度（即光速）。
- x, y, z 为待测点坐标的空间直角坐标。
- x_i, y_i, z_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为卫星1、卫星2、卫星3、卫星4在t时刻的空间直角坐标，可由卫星导航电文求得。
- τ_{t_i} ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为卫星1、卫星2、卫星3、卫星4的卫星钟的钟差，由卫星星历提供。
- τ_{t_0} 为接收机的钟差。
- 由以上四个方程即可解算出待测点的坐标 x, y, z 和接收机的钟差 τ_{t_0} 。

差分GPS (DGPS)

- 差分定位，或称相对定位。就是通过增加一个参考GPS接收器来提高定位精度。



第四章 机器人运动学

- 机器人运动学主要有以下两个基本问题：
- (1) 对一给定的机器人，已知杆件几何参数和关节变量，求末端执行器相对于给定坐标系的位置和姿态。
给定坐标系为固定在大地上的笛卡尔坐标系，作为机器人的总体坐标系，也称为世界坐标系；常称做运动学正问题
- (2) 已知机器人杆件的几何参数，给定末端执行器相对于总体坐标系的位置和姿态，确定关节变量的大小。
常称为运动学逆问题

一、机器人技术数学基础

Mathematic Preparation for Robotics

- 4. 1 位置和姿态的表示
- 4. 2 坐标变换
- 4. 3 齐次坐标变换
- 4. 4 物体的变换及逆变换
- 4. 5 通用旋转变换

4.1 位置和姿态的表示

1. 位置描述

在直角坐标系A中, 空间任意一点p的位置 (Position) 可用3x1列向量 (位置矢量) 表示:

$${}^A P = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T$$

2. 方位描述

空间物体B的方位 (Orientation) 可由某个固接于此物体的坐标系 {B} 的三个单位主矢量 $[x_B, y_B, z_B]$ 相对于参考坐标系A的方向余弦组成的3x3矩阵描述。

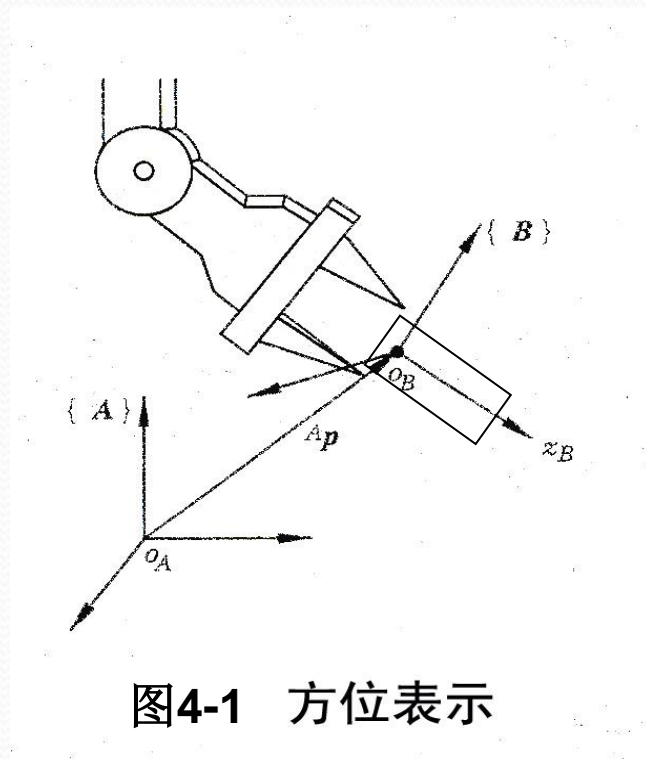


图4-1 方位表示

4.1 位置和姿态的表示

$${}^A_B \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

上述矩阵称为旋转矩阵, 它是正交的。即

$${}^A_B \mathbf{R}^{-1} = {}^A_B \mathbf{R}^T \quad \left| {}^A_B \mathbf{R} \right| = 1$$

若坐标系B可由坐标系A, 通过绕A的某一坐标轴获得, 则绕x, y, z三轴的旋转矩阵分别为

$$\mathbf{R}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.1 位置和姿态的表示

这些旋转变换可以通过右图推导

$${}^A x_p = {}^B x_p \cos \theta - {}^B y_p \sin \theta$$

$${}^A y_p = {}^B x_p \sin \theta + {}^B y_p \cos \theta$$

$${}^A z_p = {}^B z_p$$

$$\begin{bmatrix} {}^A x_p \\ {}^A y_p \\ {}^A z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B x_p \\ {}^B y_p \\ {}^B z_p \end{bmatrix}$$

这是绕Z轴的旋转. 其它两轴只要把坐标次序调换可得上页结果.

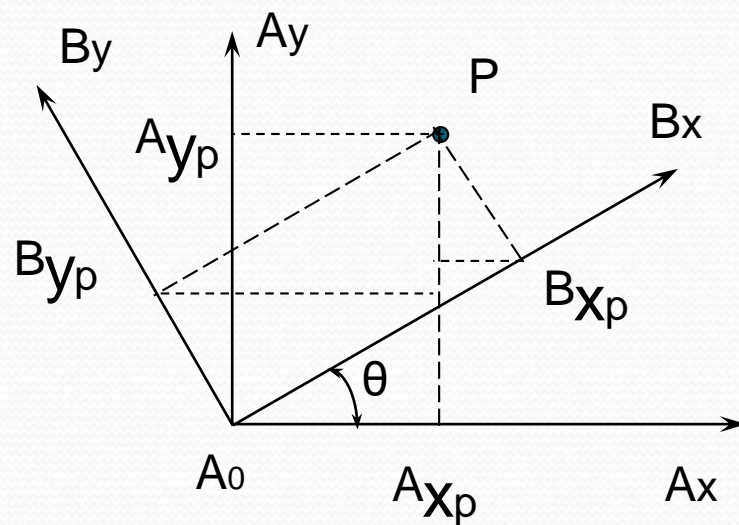


图4-2 旋转变换

4.1 位置和姿态的表示

旋转矩阵的几何意义：

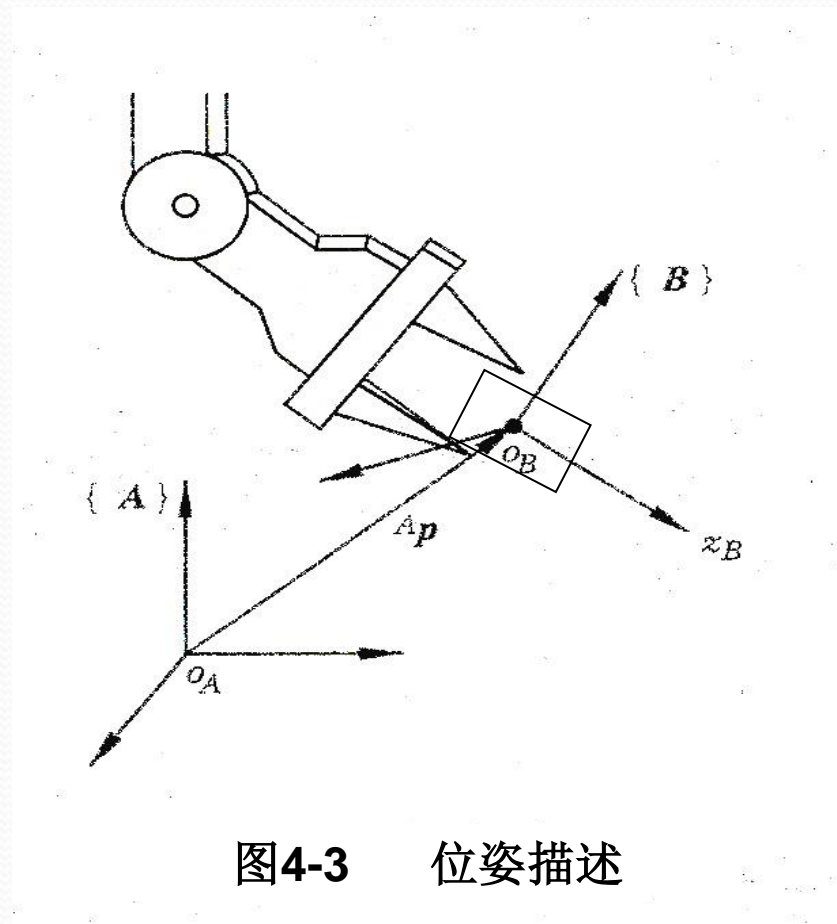
- 1) ${}^A_B\mathbf{R}$ 可以表示固定于刚体上的坐标系 {B} 对参考坐标系的姿态矩阵.
- 2) ${}^A_B\mathbf{R}$ 可作为坐标变换矩阵. 它使得坐标系 {B} 中的点的坐标 ${}^B p$ 变换成 {A} 中点的坐标 ${}^A p$.
- 3) ${}^A_B\mathbf{R}$ 可作为算子, 将 {B} 中的矢量或物体变换到 {A} 中。

4.1 位置和姿态的表示

3. 位姿描述

刚体位姿(即位置和姿态),
用刚体的方位矩阵和方位参考
坐标的原点位置矢量表示, 即

$$\{\mathbf{B}\} = \left\{ {}^A_B \mathbf{R} \quad {}^A \mathbf{p}_{B_0} \right\}$$



4.2 坐标变换

1. 平移坐标变换

坐标系 {A} 和 {B} 具有相同的方位, 但原点不重合. 则点P在两个坐标系中的位置矢量

满足下式:

$${}^A\mathbf{P} = {}^B\mathbf{P} + {}^A\mathbf{P}_{B0}$$

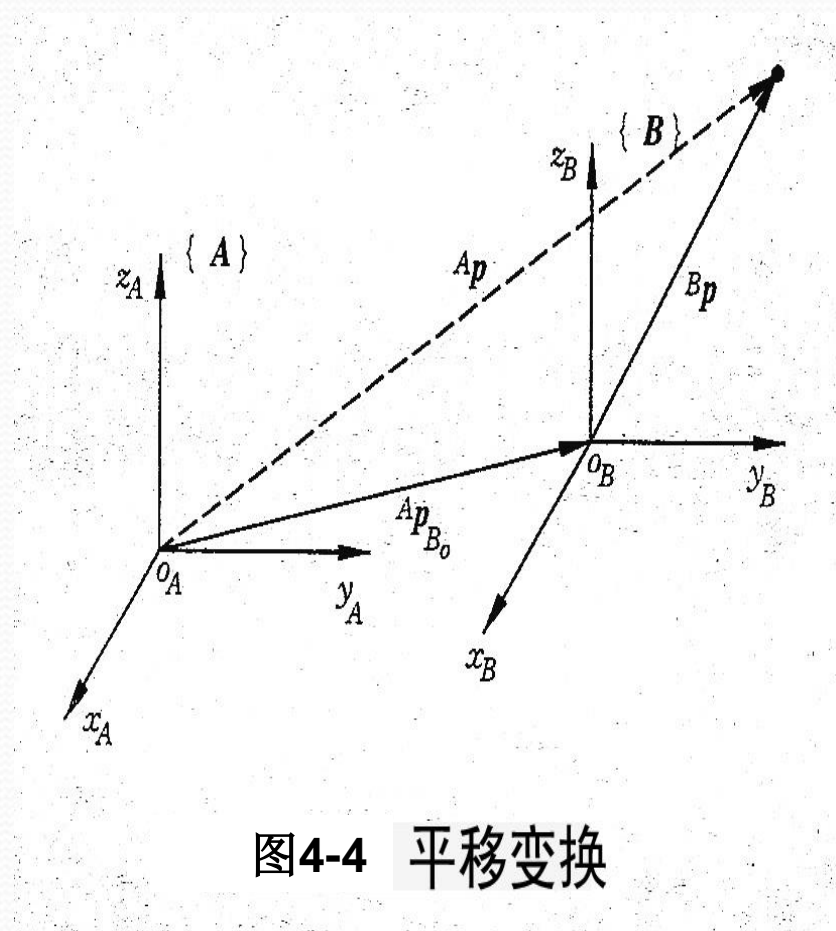


图4-4 平移变换

4.2 坐标变换

2. 旋转变换

坐标系 {A} 和 {B} 有相同的原点但方位不同, 则点P的在两个坐标系中的位置矢量有如下关系:

$${}^A \mathbf{P} = {}^A \mathbf{R} \cdot {}^B \mathbf{P}$$

$${}^B \mathbf{R} = {}^A \mathbf{R}^{-1} = {}^A \mathbf{R}^T$$

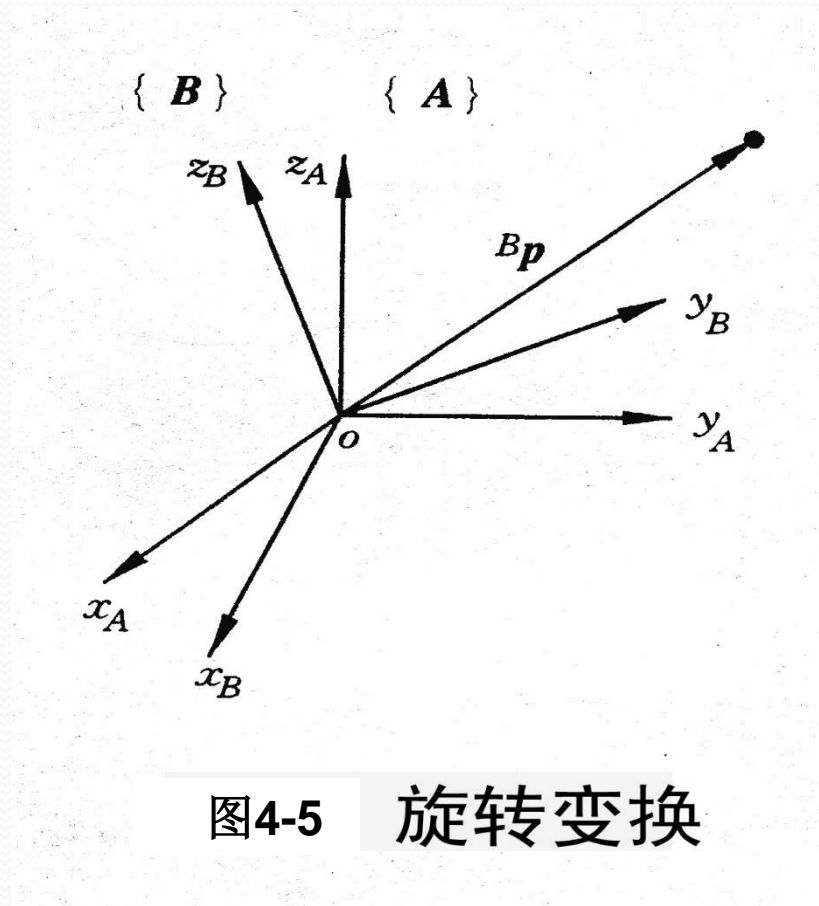


图4-5 旋转变换

4.2 坐标变换

3. 复合变换

一般情况原点既不重合, 方位也不同. 这时有:

$${}^A\mathbf{P} = {}^A\mathbf{R}_B \cdot {}^B\mathbf{P} + {}^A\mathbf{P}_{B0}$$

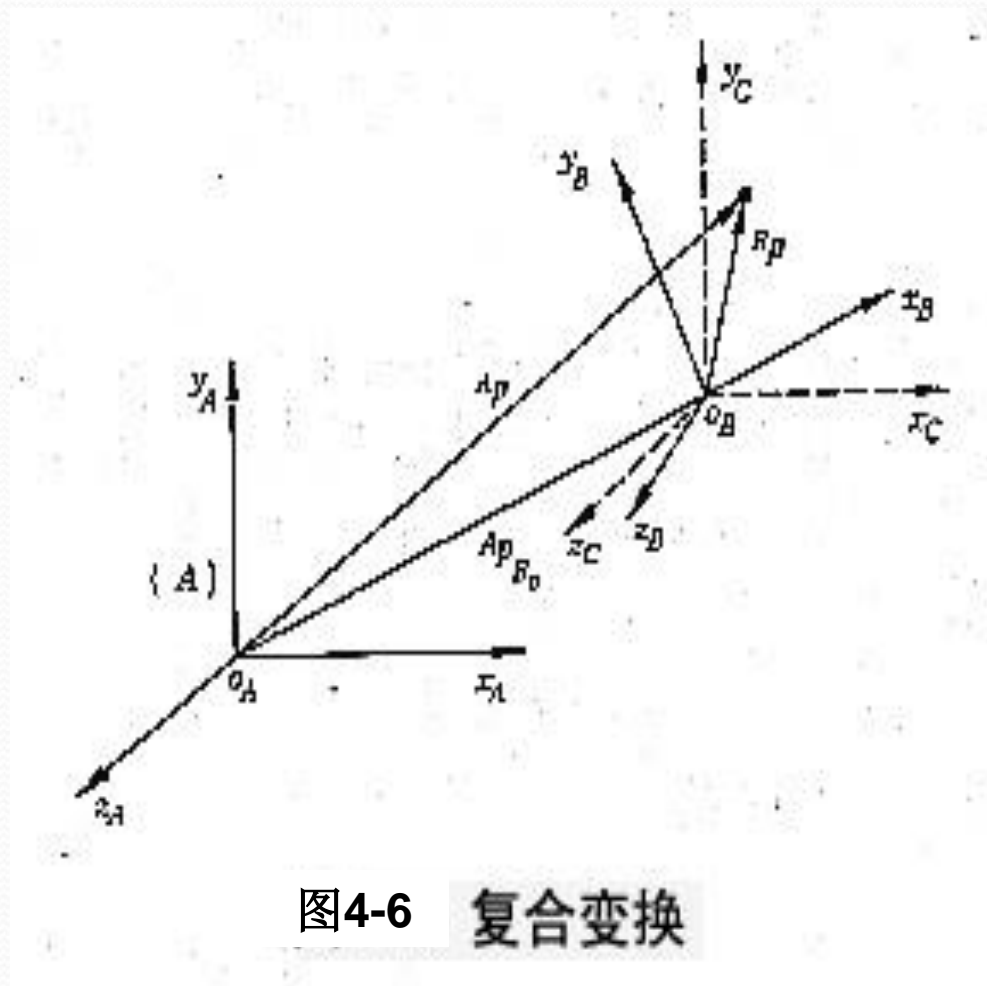


图4-6 复合变换

4.2 坐标变换

例4-1 已知坐标系 {B} 的初始位姿与 {A} 重合, 首先 {B} 相对于 {A} 的 Z_A 轴转 30° , 再沿 {A} 的 X_A 轴移动12单位, 并沿 {A} 的 Y_A 轴移动6单位. 求位置矢量 ${}^A\mathbf{p}_{B0}$ 和旋转矩阵 ${}_B^A\mathbf{R}$. 设点 p 在 {B} 坐标系中的位置为 ${}^B\mathbf{p} = [3, 7, 0]$, 求它在坐标系 {A} 中的位置.

$${}_B^A\mathbf{R} = R(z, 30^\circ) = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^A\mathbf{p}_{B0} = \begin{bmatrix} 12 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^A\mathbf{p} = {}_B^A\mathbf{R} {}^B\mathbf{p} + {}^A\mathbf{p}_{B0} = \begin{bmatrix} -0.902 \\ 7.562 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 12 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.098 \\ 13.562 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.3 齐次坐标变换

1. 齐次变换

${}^A\mathbf{P} = {}^A_B\mathbf{R} \cdot {}^B\mathbf{P} + {}^A\mathbf{P}_{B0}$ 式可以写为:

$$\begin{bmatrix} {}^A\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B\mathbf{R} & {}^A\mathbf{P}_{B0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

P点在{A}和{B}中的位置矢量分别增广为:

$${}^A\mathbf{P} = \begin{bmatrix} {}^Ax & {}^Ay & {}^Az & 1 \end{bmatrix}^T, \quad {}^B\mathbf{P} = \begin{bmatrix} {}^Bx & {}^By & {}^Bz & 1 \end{bmatrix}^T$$

而齐次变换公式和变换矩阵变为:

$${}^A\mathbf{P} = {}^A_B\mathbf{T} {}^B\mathbf{P}, \quad {}^A_B\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^A_B\mathbf{R} & {}^A\mathbf{P}_{B0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2-15, 16)$$

4.3 齐次坐标变换

2. 平移齐次坐标变换

{A} 分别沿 {B} 的X、Y、Z坐标轴平移a、b、c距离的平移齐次变换矩阵写为：

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

用非零常数乘以变换矩阵的每个元素，不改变特性。

例4-2：求矢量 $2i+3j+2k$ 被矢量 $4i-3j+7k$ 平移得到的新矢量。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 0 \\ 9 \\ 1 \end{bmatrix}$$

4.3 齐次坐标变换

3. 旋转齐次坐标变换

$$\mathbf{R}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将上式增广为齐次式：

$$\mathbf{R}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.3 齐次坐标变换

引入齐次变换后，连续的变换可以变成矩阵的连乘形式。计算简化。

例4-3 : $U=7i+3j+2k$, 绕Z轴转90度后, 再绕Y轴转90度。

例4-4: 在上述基础上再平移(4, -3, 7), 求 U_2 。

$$R(z,90) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 \\ 7 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$R(y,90) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 \\ 7 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 7 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$Trans(4,-3,7) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 7 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 4 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$T = Trans(4,-3,7)Rot(y,90)Rot(z,90)$$

$$U_2 = TU$$

Robotics 数学基础

$$T = \text{Trans}(4, -3, 7) \text{Rot}(y, 90) \text{Rot}(z, 90)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.3 齐次坐标变换

由矩阵乘法没有交换性，可知变换次序对结果影响很大。

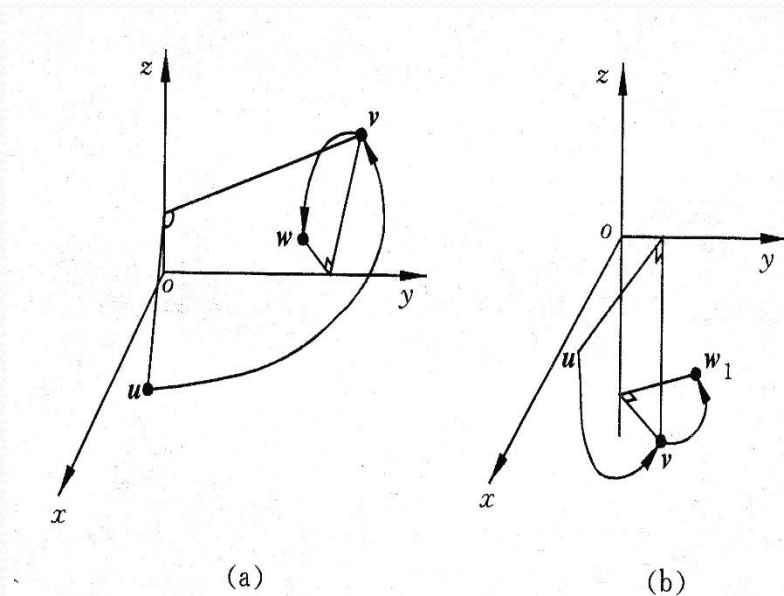


图4-7 旋转次序对结果的影响

(a) $\text{Rot}(y, 90) \text{Rot}(z, 90)$; (b) $\text{Rot}(z, 90) \text{Rot}(y, 90)$

4.4 物体的变换及 逆变换

1. 物体位置描述

物体可以由固定于其自身坐标系上的若干特征点描述。**物体的变换**也可通过这些特征点的变换获得。

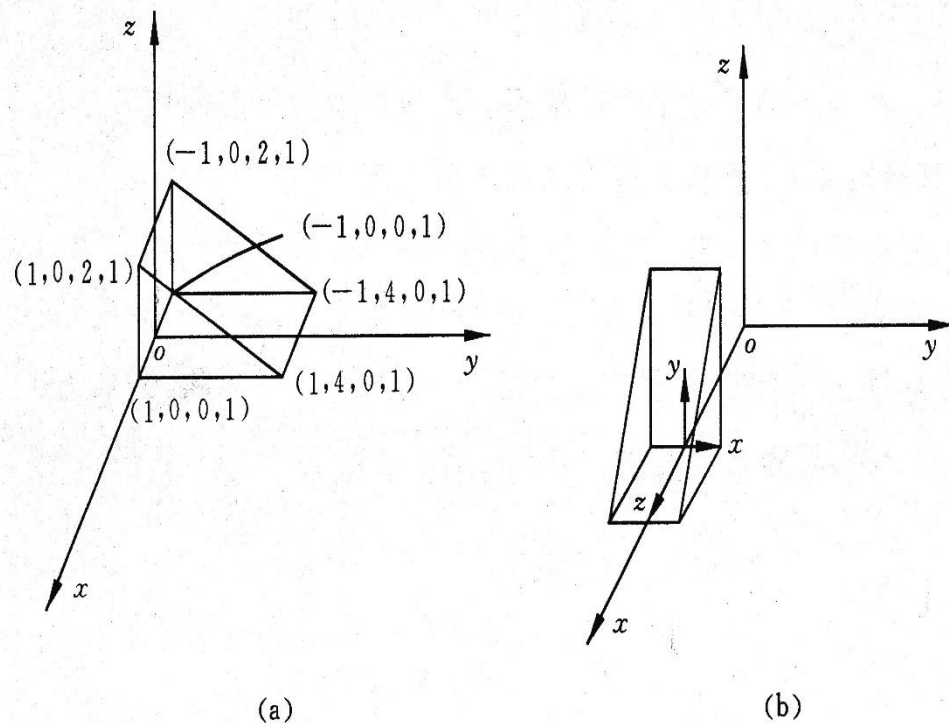


图4-8 对楔形物体的变换

4.4 物体的变换及逆变换

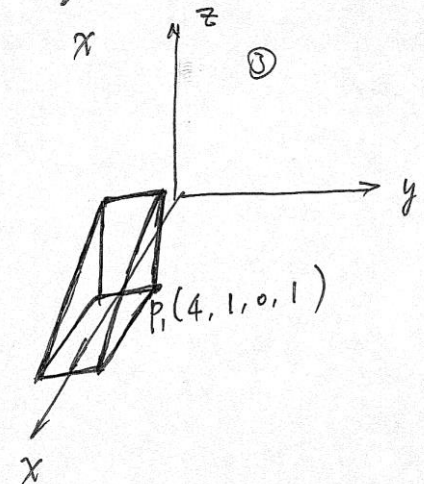
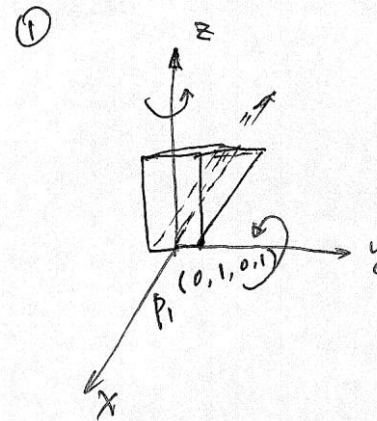
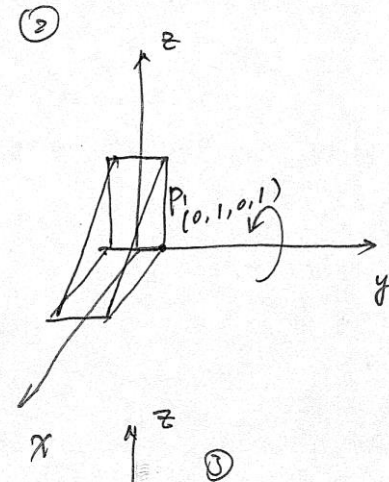
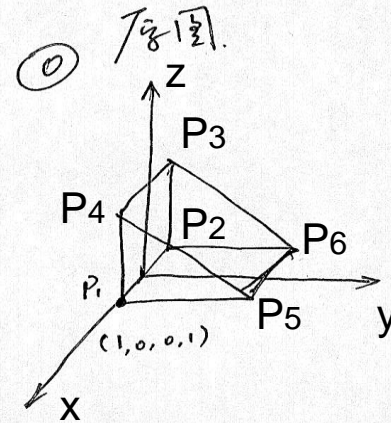
1. 物体位置描述

$$\mathbf{T} = \text{Trans}(4,0,0)\text{Rot}(y,90)\text{Rot}(z,90)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 4 & 4 & 6 & 6 & 4 & 4 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



4.4 物体的变换及逆变换

2. 齐次坐标的复合变换

{B} 相对于 {A} : ${}^A_B\mathbf{T}$;

{C} 相对于 {B} : ${}^B_C\mathbf{T}$;

则 {C} 相对于 {A} : ${}^A_C\mathbf{T} = {}^A_B\mathbf{T} {}^B_C\mathbf{T}$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} {}^A_B\mathbf{R} & {}^A\mathbf{p}_{B0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B_C\mathbf{R} & {}^B\mathbf{p}_{C0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^A_B\mathbf{R} {}^B_C\mathbf{R} & {}^A_B\mathbf{R} {}^B\mathbf{p}_{C0} + {}^A\mathbf{p}_{B0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4.4 物体的变换及逆变换

3. 齐次坐标的逆变换

{B} 相对于 {A} : ${}^A_B\mathbf{T}$;

{A} 相对于 {B} : ${}^B_A\mathbf{T}$;

两者互为逆矩阵. 求逆的办法:

1. 直接求 ${}^A_B\mathbf{T}^{-1}$

2. 简化方法

$${}^B_A\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^B_A\mathbf{R} & {}^B\mathbf{p}_{A0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B\mathbf{R}^T & -{}^A_B\mathbf{R}^T {}^A\mathbf{p}_{B0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^A_B\mathbf{T}^{-1}$$

$${}^B({}^A\mathbf{p}_{B0}) = {}^B_A\mathbf{R} {}^A\mathbf{p}_{B0} + {}^B\mathbf{p}_{A0} = \mathbf{0}$$

4.4 物体的变换及逆变换

3. 齐次坐标的逆变换

一般, 若

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -\mathbf{p} \cdot \mathbf{n} \\ o_x & o_y & o_z & -\mathbf{p} \cdot \mathbf{o} \\ a_x & a_y & a_z & -\mathbf{p} \cdot \mathbf{a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p} = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T, \mathbf{n} = [n_x \quad n_y \quad n_z]^T, \mathbf{o} = [o_x \quad o_y \quad o_z]^T, \mathbf{a} = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T$$

4.4 物体的变换 及逆变换

3. 变换方程初步

{B} : 基坐标系

{T} : 工具坐标系

{S} : 工作台坐标系

{G} : 目标坐标系

或工件坐标系

满足方程

$${}^B_T\mathbf{T} = {}^B_S\mathbf{T} {}^S_G\mathbf{T} {}^G_T\mathbf{T}$$

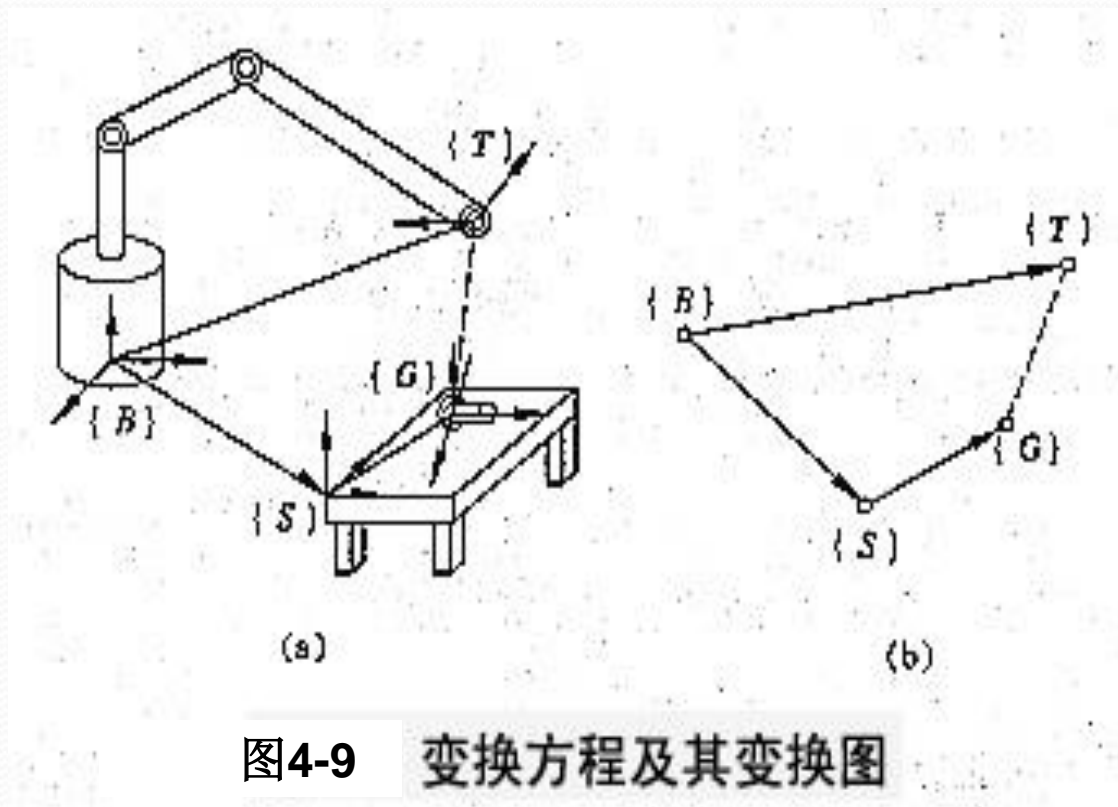


图4-9

变换方程及其变换图

4.5 通用旋转变换

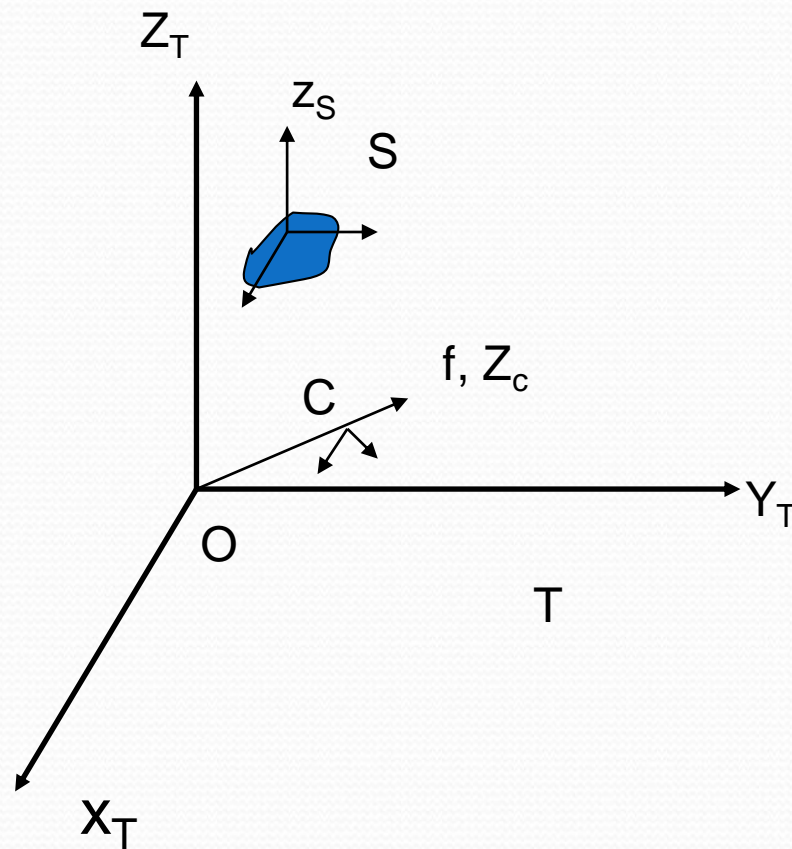
1. 通用旋转变换公式

求：绕从原点出发的 f 旋转 θ 角时的旋转矩阵. $Rot(f, \theta)$

{S} : 物体上固接的坐标系

{T} : 参考坐标系

{C} : Z轴与 f 重合的辅助坐标系



4.5 通用旋转变换

在 {S} 上取一点p, 其坐标为向量 $[P]$, 它绕 {T} 中直线f旋转 θ 角。

1) 将 {S} 上p点坐标变换到 {T} 中, 其坐标为 ${}^T_S \mathbf{T}[P]$

2) 直接计算绕f旋转的坐标为, $Rot(f, \theta) {}^T_S \mathbf{T}[P]$

目前上式在 {T} 无法直接求。采取如下步骤:

3) 建立辅助坐标系 {C}, 使其Z轴与f重合。这样问题变为绕 Z_C 旋转。将 {S} 中的点p变换到 {C} 中, 变换为: ${}^C_T \mathbf{T}^T {}^T_S \mathbf{T}[P]$

4) 在 {C} 中绕Z轴旋转有: $R(z, \theta) {}^C_T \mathbf{T}^T {}^T_S \mathbf{T}[P]$

5) 将 {C} 中坐标变换回 {T} 中有, ${}^T_C \mathbf{T} R(z, \theta) {}^C_T \mathbf{T}^T {}^T_S \mathbf{T}[P]$

4.5 通用旋转变换

步骤2) 和5) 中的结果应该相同,

即:
$${}^T_C TR(z, \theta) {}^C_T \mathbf{T}_S^T \mathbf{T}[P] = Rot(f, \theta) {}^T_S \mathbf{T}[P]$$

$$Rot(f, \theta) = {}^T_C TR(z, \theta) {}^C_T \mathbf{T} = {}^T_C TR(z, \theta) {}^T_C \mathbf{T}^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & 0 \\ o_x & o_y & o_z & 0 \\ a_x & a_y & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于 {C} 的Z轴与f重合, 所以

$$a_x = f_x \quad a_y = f_y \quad a_z = f_z$$

根据坐标轴的正交性, $\mathbf{a} = \mathbf{n} \times \mathbf{o}$, 有

$$a_x = n_y o_z - o_y n_z = f_x$$

$$a_y = n_z o_x - o_z n_x = f_y$$

$$a_z = n_x o_y - o_x n_y = f_z$$

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1$$

令 $\text{vers}(\theta) = 1 - \cos\theta$, 则

$$\text{Rot}(f, \theta) = \begin{bmatrix} f_x f_x \text{vers} \theta + c\theta & f_y f_x \text{vers} \theta - f_z s\theta & f_z f_x \text{vers} \theta + f_y s\theta & 0 \\ f_x f_y \text{vers} \theta + f_z s\theta & f_y f_y \text{vers} \theta + c\theta & f_z f_y \text{vers} \theta - f_x s\theta & 0 \\ f_x f_z \text{vers} \theta - f_y s\theta & f_y f_z \text{vers} \theta + f_x s\theta & f_z f_z \text{vers} \theta + c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

当f为x轴时, $f_x=1$, $f_y=f_z=0$;

当f为y轴时, $f_y=1$, $f_x=f_z=0$;

当f为z轴时, $f_z=1$, $f_x=f_y=0$.

4.5 通用旋转变换

2. 等效转角与转轴

给出任一旋转变换, 能够由上式求得进行等效旋转 θ 角的转轴. 已知旋转变换 R , 令 $R = \text{Rot}(f, \theta)$, 即有

$$R = \text{Rot}(f, \theta) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & 0 \\ n_y & o_y & a_y & 0 \\ n_z & o_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} f_x f_x \text{vers} \theta + c\theta & f_y f_x \text{vers} \theta - f_z s\theta & f_z f_x \text{vers} \theta + f_y s\theta & 0 \\ f_x f_y \text{vers} \theta + f_z s\theta & f_y f_y \text{vers} \theta + c\theta & f_z f_y \text{vers} \theta - f_x s\theta & 0 \\ f_x f_z \text{vers} \theta - f_y s\theta & f_y f_z \text{vers} \theta + f_x s\theta & f_z f_z \text{vers} \theta + c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Robotics 数学基础

- 将上式对角线元素相加, 并简化得

$$n_x + o_y + a_z = (f_x^2 + f_y^2 + f_z^2) \text{vers} \theta + 3c\theta = 1 + 2c\theta$$

$$c\theta = \cos \theta = \frac{1}{2} (n_x + o_y + a_x - 1)$$

非对角元素成对相减, 有

$$o_z - a_y = 2f_x s\theta$$

$$a_x - n_z = 2f_y s\theta$$

$$n_y - o_x = 2f_z s\theta$$

4.5 通用旋转变换

平方后有

$$s\theta = \pm \frac{1}{2} \sqrt{(o_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - o_x)^2}$$

设

$$0 \leq \theta \leq 180^\circ$$

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{(o_z - a_y)^2 + (a_x - n_z)^2 + (n_y - o_x)^2}}{n_x + o_y + a_z - 1}$$

$$f_x = (o_z - a_y) / 2s\theta$$

$$f_y = (a_x - n_z) / 2s\theta$$

$$f_z = (n_y - o_x) / 2s\theta$$

4.5 通用旋转变换

例4-5 一坐标系 {B} 与参考系重合, 现将其绕通过原点的轴 $f = [0.707 \quad 0.707 \quad 0]^T$ 转 30° , 求转动后的 {B}.

以 $f_x = f_y = 0.707 \quad f_z = 0.0 \quad \theta = 30.0^\circ$ 代入算式, 有

$$Rot(f, 30^\circ) = \begin{bmatrix} 0.933 & 0.067 & 0.354 & 0 \\ 0.067 & 0.933 & -0.354 & 0 \\ -0.354 & 0.354 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.5 通用旋转变换

一般情况, 若 f 不通过原点, 而过 q 点 (q_x, q_y, q_z) , 则齐次变换矩阵为:

$$Rot(f, \theta) = \begin{bmatrix} f_x f_x vers \theta + c \theta & f_y f_x vers \theta - f_z s \theta & f_z f_x vers \theta + f_y s \theta & A \\ f_x f_y vers \theta + f_z s \theta & f_y f_y vers \theta + c \theta & f_z f_y vers \theta - f_x s \theta & B \\ f_x f_z vers \theta - f_y s \theta & f_y f_z vers \theta + f_x s \theta & f_z f_z vers \theta + c \theta & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中,

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_x f_x vers \theta + c \theta & f_y f_x vers \theta - f_z s \theta & f_z f_x vers \theta + f_y s \theta \\ f_x f_y vers \theta + f_z s \theta & f_y f_y vers \theta + c \theta & f_z f_y vers \theta - f_x s \theta \\ f_x f_z vers \theta - f_y s \theta & f_y f_z vers \theta + f_x s \theta & f_z f_z vers \theta + c \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix}$$

4.5 通用旋转变换

例4-6 一坐标系 {B} 与参考系重合, 现将其绕通过 $q=[1, 2, 3]^T$ 的轴 $f=[0.707 \ 0.707 \ 0]^T$ 转 30° , 求转动后的 {B}.

以 $f_x = f_y = 0.707 \quad f_z = 0.0 \quad \theta = 30.0^\circ$ 代入算式, 有

$$q_x = 1 \quad q_y = 2 \quad q_z = 3$$

$$Rot(f, 30^\circ) = \begin{bmatrix} 0.933 & 0.067 & 0.354 & -1.13 \\ 0.067 & 0.933 & -0.354 & 1.13 \\ -0.354 & 0.354 & 0.866 & 0.04 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matlab使用与矩阵计算

Matlab是美国Mathworks公司推出的数值计算软件. 在数值计算及科学研究中, 是其它语言无法相比的. 其主要特点有:

1. 语言简洁紧凑, 使用方便灵活, 库函数极其丰富.
2. 具有非常多的矩阵函数, 矩阵计算异常方便.
3. 具有多种功能的工具包.
4. 具有与FORTRAN、C等同样多的运算符和结构控制指令的同时, 语法限制却不严格, 使程序设计很自由.
5. 图形功能强大, 数据可视化好.
6. 原程序和库函数代码公开.

但. 程序执行效率较低.

本节主要介绍其矩阵计算在机器人分析中的应用.

二、机器人运动学

Kinematics of Robotics

4.6 机器人运动方程的表示

(姿态和方向角\位置和坐标\连杆变换矩阵)

4.7 机械手运动方程的求解

(欧拉变换解/滚仰偏变换解/球面变换解)

4.6 机器人运动方程的表示

4.6.0 A矩阵和T矩阵

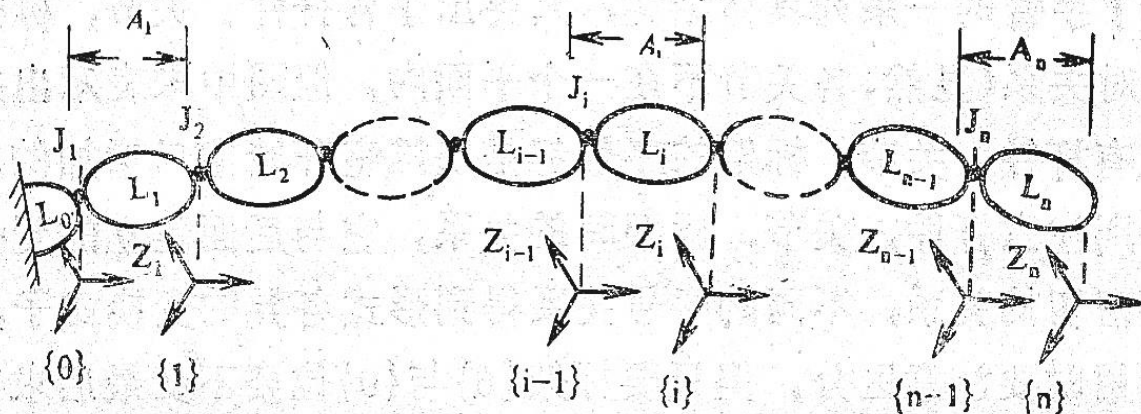
机械手可以看成由一系列关节连接起来的连杆组构成.
用**A矩阵**描述连杆坐标系间相对平移和旋转的齐次变换.

A_1 表示第一连杆对基坐标的位姿

A_2 表示第二连杆对第一连杆位姿

则第二连杆对基坐标的位姿为

$$T_2 = A_1 A_2$$



$$T_6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6$$

4.6 机器人运动方程的表示

4.6.1 运动姿态和方向角

1. 运动方向

接近矢量 \mathbf{a} : 夹持器进入物体的方向; Z轴

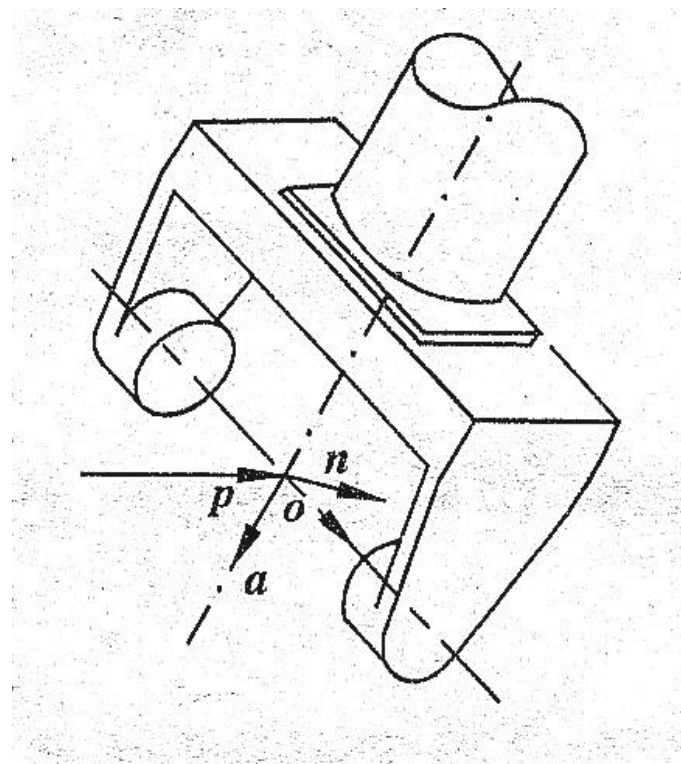
方向矢量 \mathbf{o} : 指尖互相指向; Y轴

法线矢量 \mathbf{n} : 指尖互相指向; X轴

$$\mathbf{n} = \mathbf{o} \times \mathbf{a}$$

$$\mathbf{o} \cdot \mathbf{o} = 1 \quad \mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = 1 \quad \mathbf{o} \cdot \mathbf{a} = 1$$

$$T = T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

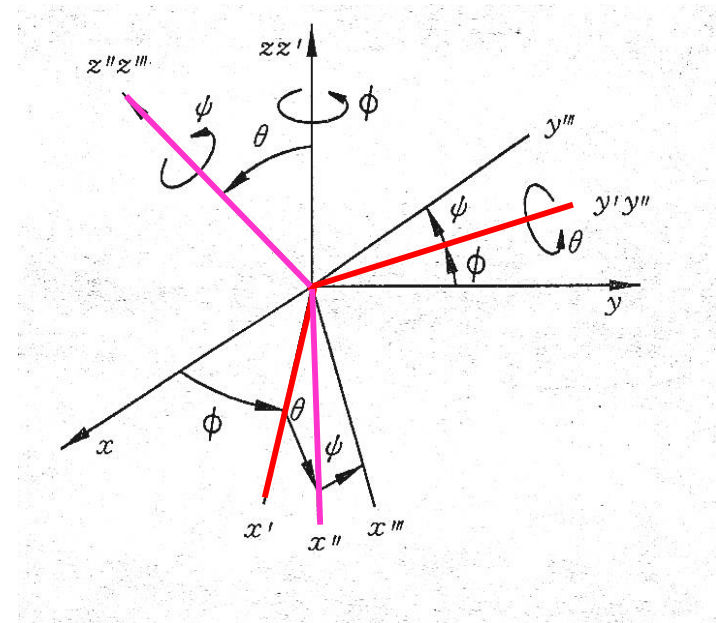


4.6 机器人运动方程的表示

4.6.1 运动姿态和方向角

2. 用旋转系列表示运动姿态

欧拉角：绕Z轴转 ϕ ，再绕**新**Y轴转 θ ，
绕**最新**Z轴转 ψ 。



$$Euler(\phi, \theta, \psi) = Rot(z, \phi) Rot(y, \theta) Rot(z, \psi)$$

$$\begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

注意：坐标变换是右乘。即后面的变换乘在右边。（绕新轴转，连乘）

4.6 机器人运动方程的表示

4.6.1 运动姿态和方向角

3. 用滚\仰\偏转表示运动姿态

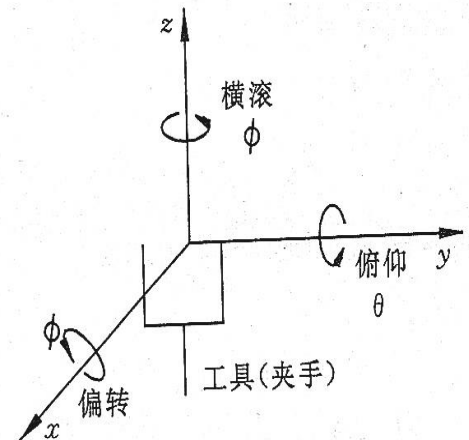
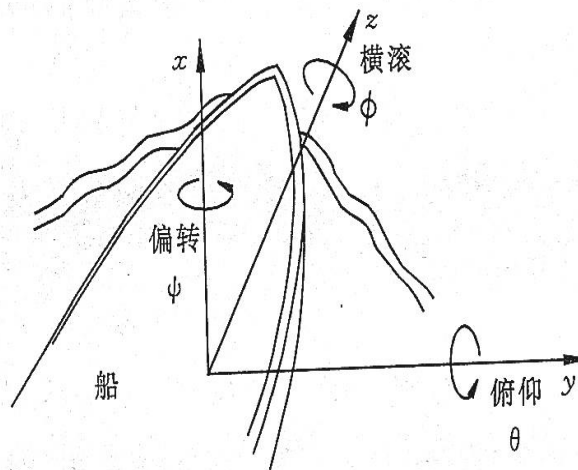
横滚: 绕Z轴转 ϕ , $RPY(\phi, \theta, \psi) = Rot(z, \phi)Rot(y, \theta)Rot(x, \psi)$

俯仰: 绕Y轴转 θ , $\left[\begin{array}{cccc} c\phi & -s\phi & 0 & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi & 0 \\ 0 & s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$

偏转: 绕X轴转 ψ .

注意: 左乘.

$$= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi & 0 \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & 0 \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.2 运动位置和坐标

表示物体的位置：笛卡尔坐标、柱面坐标、球面坐标

1. 用柱面坐标表示末端运动位置

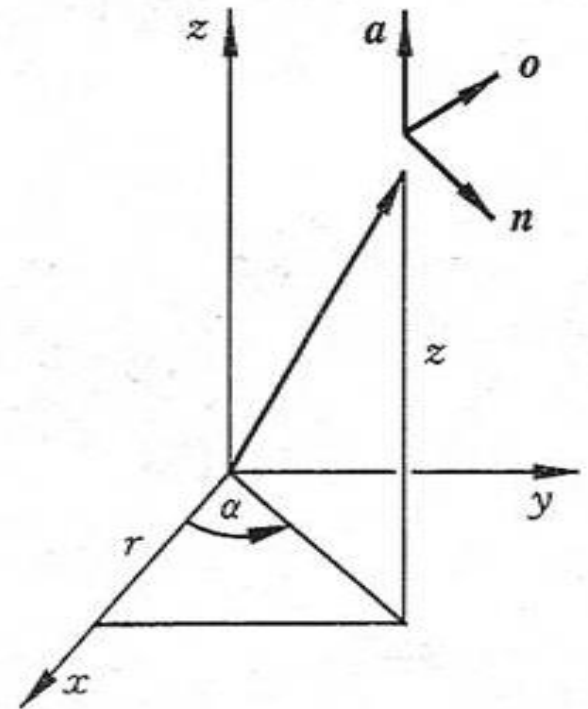
沿X平移 r ，绕Z轴转 α ，沿Z轴平移 z 。

$$Cyl(z, \alpha, r) = Trans(0, 0, z) Rot(z, \alpha) Trans(r, 0, 0)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & rc\alpha \\ s\alpha & c\alpha & 0 & rs\alpha \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3-7) (绕原坐



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.2 运动位置和坐标

1. 用柱面坐标表示末端运动位置

由于上述绕Z轴的旋转, 使末端执行器的姿态出现变化, 若要执行器姿态不变, 则需将其绕执行器Z轴反向旋转.

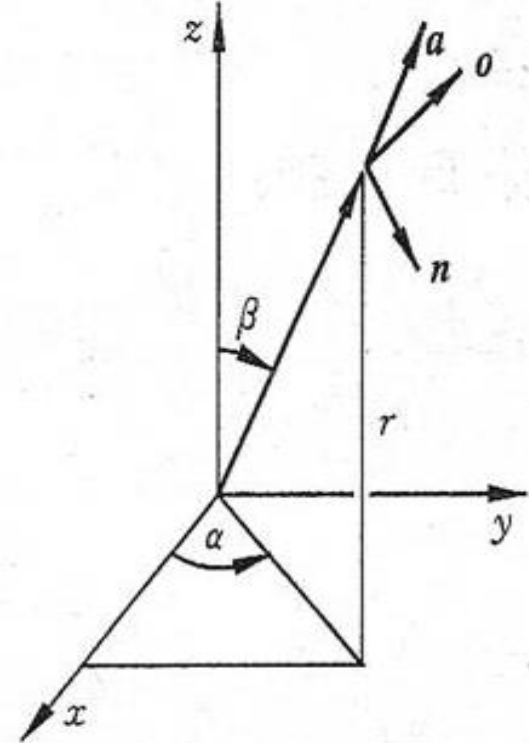
$$\begin{aligned}
 Cyl(z, \alpha, r) &= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & rc\alpha \\ s\alpha & c\alpha & 0 & rs\alpha \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(-\alpha) & -s(-\alpha) & 0 & 0 \\ s(-\alpha) & c(-\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & rc\alpha \\ 0 & 1 & 0 & rs\alpha \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)
 \end{aligned}$$

4.6 机器人运动方程的表示

4.6.2 运动位置和坐标

2. 用球面坐标表示末端运动位置

沿Z平移 r , 绕Y轴转 β , 绕Z轴转 α .



$$Sph(\alpha, \beta, r) = Rot(z, \alpha) Rot(y, \beta) Trans(0, 0, r)$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & -s\alpha & c\alpha s\beta & rc\alpha s\beta \\ s\alpha c\beta & c\alpha & s\alpha s\beta & rs\alpha s\beta \\ -s\beta & 0 & c\beta & rc\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

4.6 机器人运动方程的表示

4.6.2 运动位置和坐标

2. 用球面坐标表示末端运动位置

由于上述两个旋转, 使执行器姿态发生变化. 为保持姿态, 执行器要绕其自身Y和Z轴反向旋转.

$$Sph(\alpha, \beta, r) = Rot(z, \alpha)Rot(y, \beta)Trans(0,0,r)Rot(y_A, -\beta)Rot(z_A, -\alpha)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & rc\alpha s\beta \\ 0 & 1 & 0 & rs\alpha s\beta \\ 0 & 0 & 1 & rc\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

4.6.3 连杆变换矩阵

1. 广义连杆 (D-H坐标) 由Denavit和Hartenberg提出

全为转动关节:

Z_i 坐标轴;

X_i 坐标轴;

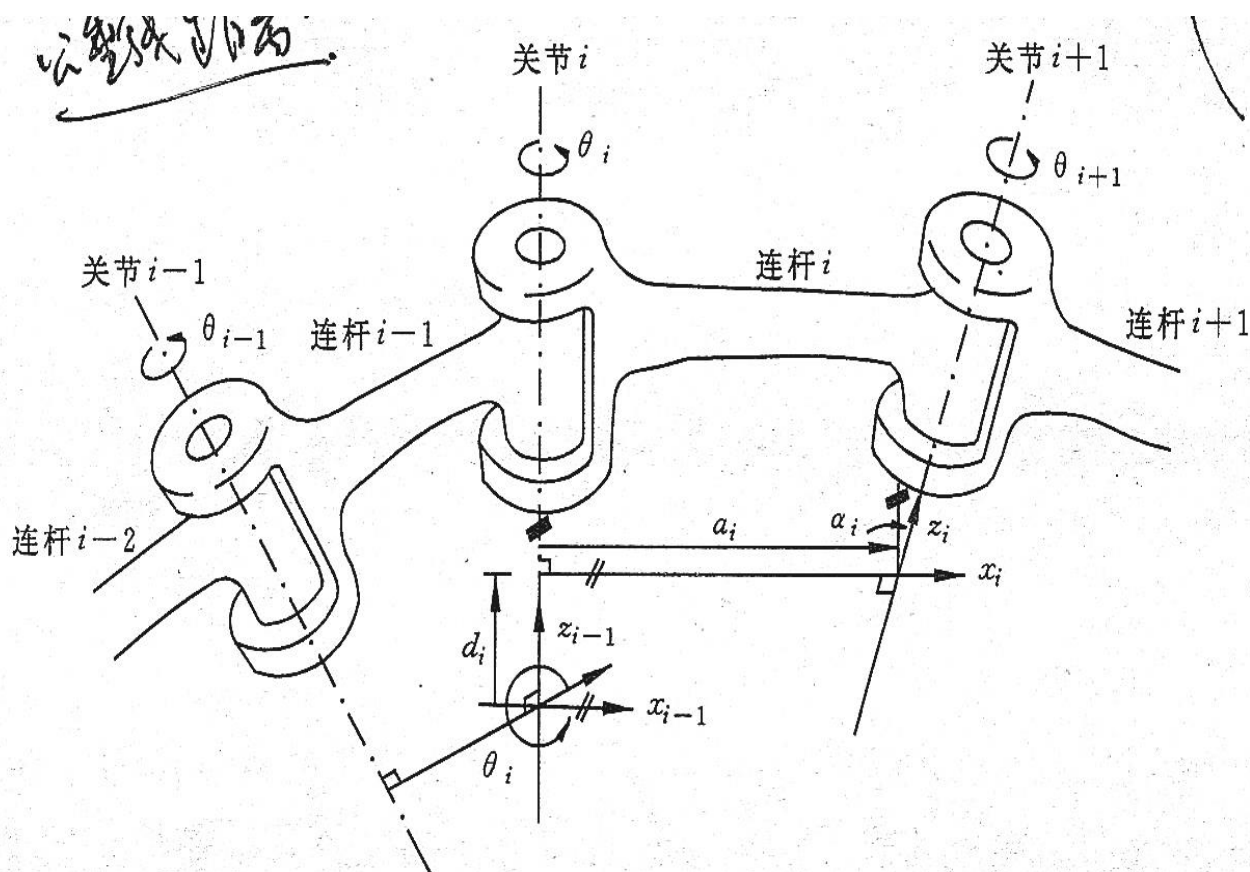
Y_i 坐标轴;

连杆长度 a_i ;

连杆扭角 α_i ;

两连杆距离 d_i ;

两杆夹角 θ_i



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.3 连杆变换矩阵

1. 广义连杆

全为转动关节:

Z_i 坐标轴: 沿着 $i+1$ 关节的运动轴;

X_i 坐标轴: 沿着 Z_i 和 Z_{i-1} 的公法线, 指向离开 Z_{i-1} 轴的方向;

Y_i 坐标轴: 按右手直角坐标系法则制定;

连杆长度 a_i : Z_i 和 Z_{i-1} 两轴心线的公法线长度;

连杆扭角 α_i : Z_i 和 Z_{i-1} 两轴心线的夹角;

两连杆距离 d_i : 相邻两杆三轴心线的两条公法线间的距离;

两杆夹角 θ_i : X_i 和 X_{i-1} 两坐标轴的夹角;



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.3 连杆变换矩阵

1. 广义连杆 (D-H坐标)

含移动关节:

Z_i 坐标轴;

X_i 坐标轴;

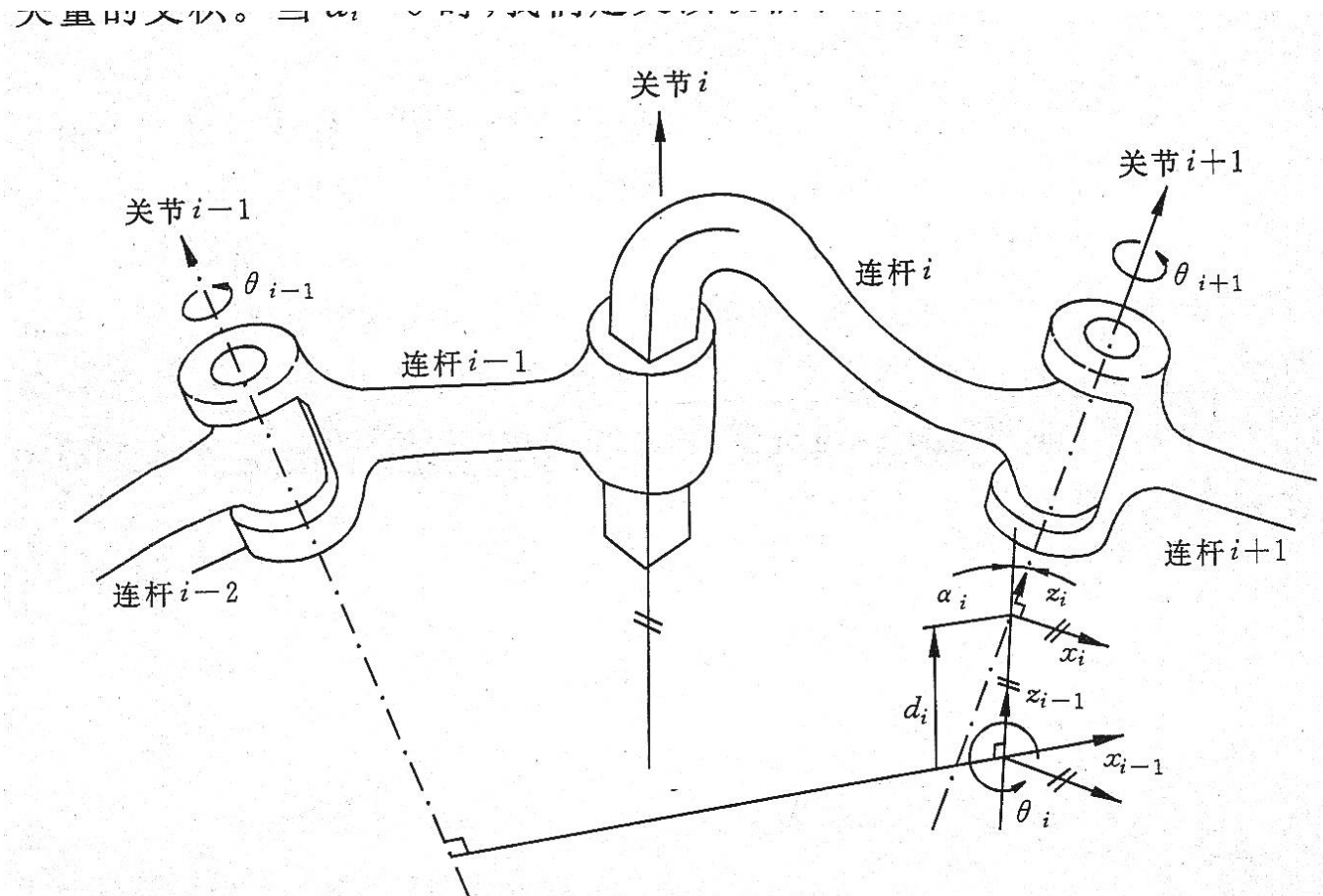
Y_i 坐标轴;

连杆长度 $a_i=0$;

连杆扭角 α_i ;

两连杆距离 d_i ;

两杆夹角 θ_i ;



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.3 连杆变换矩阵

1. 广义连杆

含移动关节:

Z_i 坐标轴: 沿着 $i+1$ 关节的运动轴;

X_i 坐标轴: 沿着 Z_i 和 Z_{i-1} 的公法线, 指向离开 Z_{i-1} 轴的方向;

Y_i 坐标轴: 按右手直角坐标系法则制定;

连杆长度 a_i : Z_i 和 Z_{i-1} 两轴心线的公法线长度;

连杆扭角 α_i : Z_i 和 Z_{i-1} 两轴心线的夹角;

两连杆距离 d_i : 相邻两杆三轴心线的两条公法线间的距离;

两杆夹角 θ_i : X_i 和 X_{i-1} 两坐标轴的夹角;



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.3 连杆变换矩阵

2. 广义变换矩阵

建立D-H坐标系后, 可通过两个旋转、两个平移建立相邻连杆 $i-1$ 和 i 间的相对关系。

- 1。绕 Z_{i-1} 轴转 θ_i 角, 使 X_{i-1} 转到与 X_i 同一平面内;
 - 2。沿 Z_{i-1} 轴平移 d_i , 把 X_{i-1} 移到与 X_i 同一直线上;
 - 3。沿 i 轴平移 a_{i-1} , 把连杆 $i-1$ 的坐标系移到使其原点与连杆 i 的坐标系原点重合的位置;
 - 4。绕 X_{i-1} 轴转 α_{i-1} 角, 使 Z_{i-1} 转到与 Z_i 同一直线上;
- 这四个齐次变换叫 A_i 矩阵:

4.6 机器人运动方程的表示

4.6.3 连杆变换矩阵

2. 广义变换矩阵

对旋转关节: $A_i = Rot(z, \theta_i) Trans(0, 0, d_i) Trans(a_i, 0, 0) Rot(x, \alpha_i)$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_{i-1} & s\theta_i s\alpha_{i-1} & a_{i-1} c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -c\theta_i s\alpha_{i-1} & a_{i-1} s\theta_i \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

对棱柱关节: $A_i = Rot(z, \theta_i) Trans(0, 0, d_i) Trans(a_i, 0, 0) Rot(x, \alpha_i)$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_{i-1} & s\theta_i s\alpha_{i-1} & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -c\theta_i s\alpha_{i-1} & 1 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$



4.6 机器人运动方程的表示

4.6.3 连杆变换矩阵

3. 用A矩阵表示T矩阵

$${}^{i-1}T_6 = A_i A_{i+1} \cdots A_6$$

T_6 : 机械手末端对其基座

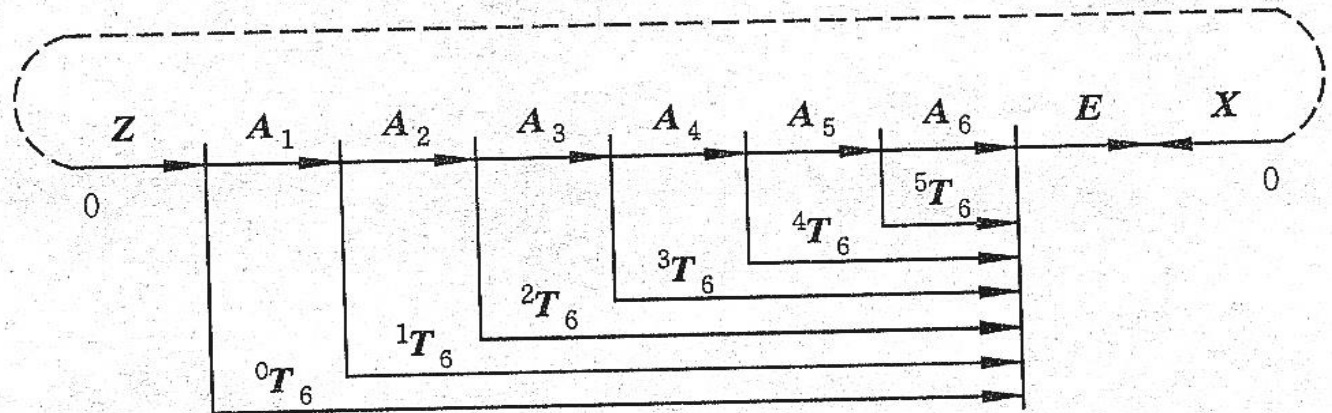
Z: 机械手基座对参考坐标系

E: 端部工具对机械手末端

X: 端部工具对参考坐标系

$$X = ZT_6E$$

$$T_6 = Z^{-1}XE^{-1}$$



4.7 机械手运动方程的求解

- 1) 问题: 已知手部位姿, 求各关节位置
- 2) 意义: 是机械手控制的关键
- 3) 没有一种算法可以通用, 需要几何设置引导

本节介绍上节的几种特殊变换下的求解算法.

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.1 欧拉变换解

1. 基本隐式方程的解

$$T = Euler(\phi, \theta, \psi) = Rot(z, \phi)Rot(y, \theta)Rot(z, \psi)$$

若上式中T矩阵的各元素已知，即

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi & -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta & 0 \\ s\phi c\theta c\psi + s\phi s\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta & 0 \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3-24)

对应项相等，有

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.1 欧拉变换解

$$n_x = c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi$$

$$n_y = s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi$$

$$n_z = -s\theta c\psi$$

$$o_x = -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi$$

$$o_y = -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi$$

$$o_z = s\theta s\psi$$

$$a_x = c\phi s\theta$$

$$a_y = s\phi s\theta$$

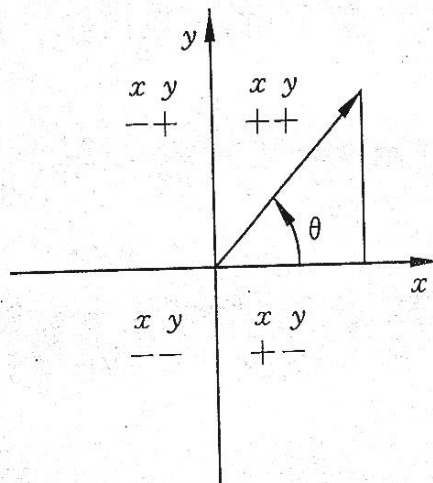
$$a_z = c\theta$$

(3-25/33)

$$\theta = \arccos(a_z)$$

$$\phi = \arccos(a_x / s\theta)$$

$$\psi = \arccos(-n_z / s\theta)$$



arccos: 符号不定;
特殊点不准确;
0或180时, 后
两式没定义。

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.1 欧拉变换解

2. 用显式方程求各角度

$$Rot(z, \phi)^{-1} T = Rot(y, \theta) Rot(z, \psi) \quad (3-37)$$

$$Rot(y, \theta)^{-1} Rot(z, \phi)^{-1} T = Rot(z, \psi)$$

$$\begin{bmatrix} c\phi & s\phi & 0 & 0 \\ -s\phi & c\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\theta s\psi & s\theta & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 & 0 \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.1 欧拉变换解

$$\begin{bmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(o) & f_{11}(a) & f_{11}(p) \\ f_{12}(n) & f_{12}(o) & f_{12}(a) & f_{12}(p) \\ f_{13}(n) & f_{13}(o) & f_{13}(a) & f_{13}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\theta s\psi & s\theta & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 & 0 \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中

(3-40)

$$f_{11}(u) = c\phi u_x + s\phi u_y$$

$$f_{12}(u) = -s\phi u_x + c\phi u_y$$

$$f_{13}(u) = u_z$$

$$u = n, o, a, p$$

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.1 欧拉变换解

由 $f_{12}(a) = 0$ 有: $-s\phi a_x + c\phi a_y = 0$ 即

$$\phi = a \tan(a_y / a_x) \quad \phi = a \tan(-a_y / -a_x) \quad (3-42/43)$$

这样, 由 $s\theta = f_{11}(a) \quad c\theta = f_{13}(a)$, 得

$$\theta = a \tan\left(\frac{c\phi a_x + s\phi a_y}{a_z}\right) \quad (3-44)$$

再由 $s\psi = f_{12}(n) \quad c\psi = f_{12}(o)$, 得

$$\psi = a \tan\left(\frac{-s\phi n_x + c\phi n_y}{-s\phi o_x + c\phi o_y}\right) \quad (3-45)$$

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.2 滚、仰、偏变换解

由

$$Rot(z, \phi)^{-1}T = Rot(y, \theta)Rot(x, \psi)$$

$$\begin{bmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(o) & f_{11}(a) & f_{11}(p) \\ f_{12}(n) & f_{12}(o) & f_{12}(a) & f_{12}(p) \\ f_{13}(n) & f_{13}(o) & f_{13}(a) & f_{13}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta s\psi & s\theta c\psi & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi & 0 \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3-47)

f定义同前。

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.2 滚、仰、偏变换解

由 $f_{12}(n) = -s\phi n_x + c\phi n_y = 0$ 得

$$\phi = a \tan\left(\frac{n_y}{n_x}\right) \quad (3-48)$$

这样，由 $f_{11}(n) = c\phi n_x + s\phi n_y = c\theta$ $f_{13}(n) = n_z = -s\theta$
可得：

$$\theta = a \tan\left(\frac{-n_z}{c\phi n_x + s\phi n_y}\right) \quad (3-50)$$

再由 $f_{12}(o) = -s\phi o_x + c\phi o_y = c\psi$ $f_{12}(a) = -s\phi a_x + c\phi a_y = -s\psi$
得

$$\psi = a \tan\left(\frac{s\phi a_x - c\phi a_y}{-s\phi o_x + c\phi o_y}\right) \quad (3-51)$$

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.3 球面变换解

$$Rot(z, \alpha)^{-1}T = Rot(y, \beta)Trans(0,0,r)$$

$$\begin{bmatrix} c\alpha & s\alpha & 0 & 0 \\ -s\alpha & c\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta & rs\beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta & rc\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

右列相等：

$$\begin{bmatrix} c\alpha p_x + s\alpha p_y \\ -s\alpha p_x + c\alpha p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rs\beta \\ 0 \\ rc\beta \\ 1 \end{bmatrix}$$

(3-53)

4.7 机械手运动方程的求解

4.7.3 球面变换解

由第二行有：

$$-s\alpha p_x + c\alpha p_y = 0 \quad \alpha = a \tan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (3-54)$$

$$c\alpha p_x + s\alpha p_y = rs\beta \quad p_z = rc\beta \quad \beta = a \tan\left(\frac{c\alpha p_x + s\alpha p_y}{p_z}\right) \quad (3-56)$$

用 $Rot(y, \beta)^{-1} Rot(z, \alpha)^{-1} T = Trans(0, 0, r)$ 的右列相等，
可得：

$$r = s\beta(c\alpha p_x + s\alpha p_y) + c\beta p_z \quad (3-57)$$

第五章 农业机器人事例

一、车辆自动化

- 在我们的日常生活中，有各种各样的移动体。如：飞机、宇宙飞船、海中或地中作业的机器人等空间移动体；



3维



● 自行车、汽车、轮船、
土木建设车辆、农作业
用车辆、搬运车辆等平
面移动体；

2维



- 还有象电车、火车这样具有轨道运行的移动体。



1维

(一) 自动引导行走车

1、定义：

自动引导行走车（日语叫**自律行走車****輛**，英语叫Automated Guided Vehicle 简称AGV）一般是指车辆在无人操纵的情况下，车辆自身根据作业要求选择最佳行走路径而完成移动行走作业的具有智能的行走车辆。

(一) 自动引导行走车

2、其性能可以分为：

1) 自动引导的直线前进

只是作业的直线行进部分不用人来操纵。

2) 管理移动机械动作，移动到目的地（追踪）

由一台或几台车辆，在保持某一位置关系条件下自动追踪由人力操纵的车辆。



- 3) 可以生成从任意的现在地点到任意的目标地点的行走路径。



- 以往行走车以**使人或物体移动为目的**，进而发展为**以移动来进行作业、服务为主要目的**的行走（如挖掘、破坏、除雪、清扫、耕耘、向导、修理等等）。
- 按照作业领域，它们大体可以分为**室内用和室外用**两种。前者如工厂车间内的搬运，楼内的清扫等，后者如草坪修整、除雪、向导、警备等。

(二) 行走车进行自动化的目的

大致有以下几方面：

1、行走车自身的自动化

如车体自身的姿势控制，速度控制，振动控制等。

主要是提高车体自身的移动功能，作业、服务功能所进行的自动化技术。

(二) 行走车进行自动化的目的

2、行走车自身的移动、搬送、引导、指令等的自动化

行走车一般以移动来进行搬运、引导作业，为使其移动目的更加容易实现及作业更加正确而进行的自动化技术。如：沿着所给的路径进行引导作业；判断周围的状况、环境，尽可能自动地移动、监视、指示、防御等等。

(二) 行走车进行自动化的目的

3、多辆行走车同时作业所需要的自动化技术

可以分为：相互碰撞的回避；

相互配合作业

（协调控制）；

构成群体及群管理、

最优运行等等。



(三) 自动引导行走车的基本构成要素

自动引导行走车

感觉认识功能

内部传感器
外部传感器
导航技术
障碍物识别

意志决定
判断功能

控制器
数据库
作业软件
自己诊断

情报传递信
号变换功能

显示器
键盘
I/O等接口
配线、配管

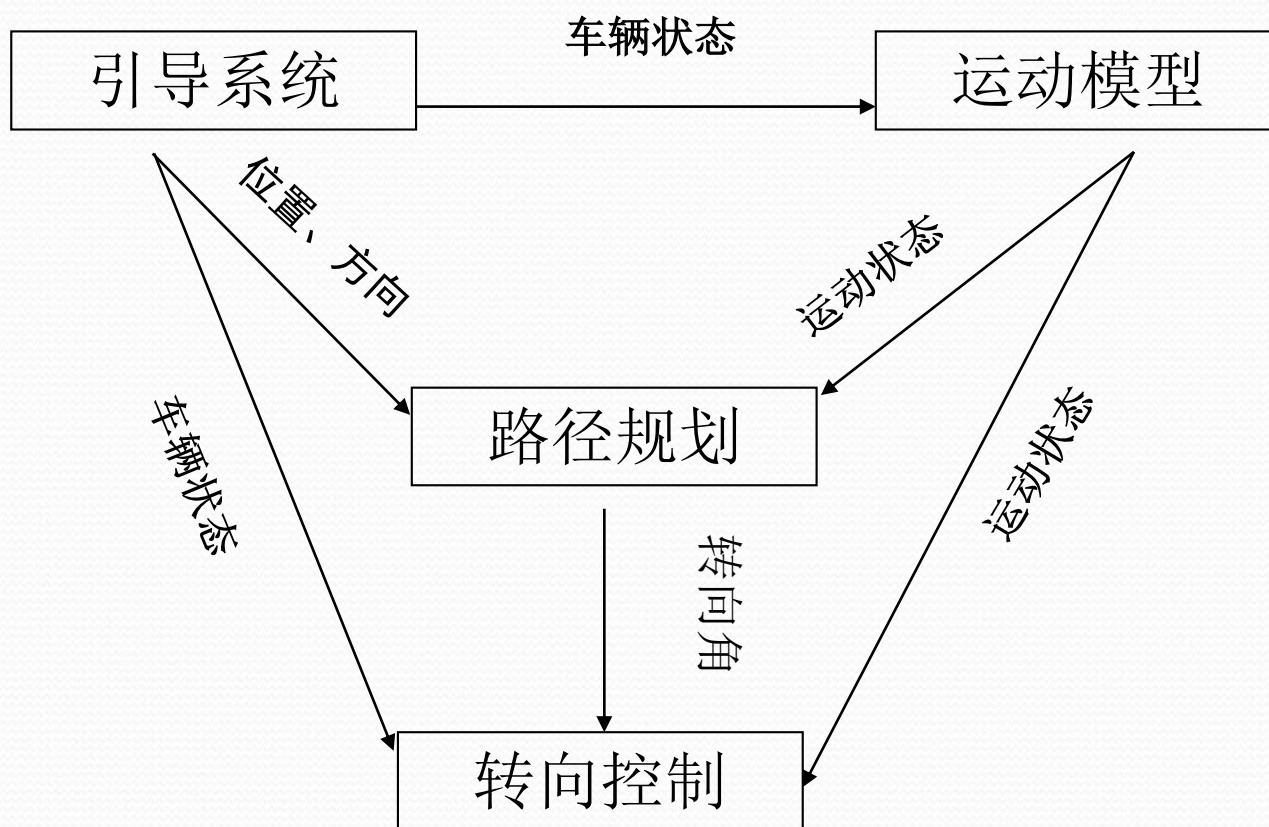
运动功能
作业功能

制动器
行走部分
作业部分

能量供
给功能

动力源
动力传递
能量变换

- 自动引导系统主要包括引导系统、车辆运动模型、路径规划和转向控制4个部分。



1) 引导系统

主要由测量车辆位置、方向以及提供车辆当前状态的传感器组成。

2) 运动模型

体现运动状态、包括运动学等模型

3) 路径规划

行走路径（固定径路、半固定径路、自由径路）

4) 转向控制

根据运动模型和路径规划及车辆状态控制转向系统。

（四）涉及的技术

车辆的自动化所需的共同技术主要是：检测技术、控制引导技术、通信技术、系统技术等。

1、检测技术（感觉认识功能）

主要是位置方位情报的检测和环境情报的检测。

行走车的位置情报及角速度的实时、高精度检测是行走车自动化的基本、必要条件。

另外，行走车的移动过程中，对周围的状况的检测（周围状况是指固定和移动两种情况）及对象物的形状认识、集中度、混杂度的认识等。目前，低价格、高可靠性且具有相当精度的高速检测方法还没有实现，但可以预测，随着现代技术的发展，数年后将会出现新的检测方法。

1) 位置方位检测的主要目的是：

- 位置基准的设定；
- 路线指示、指令、引导的继续；
- 碰撞的避免和相对位置的保持；
- 固定位置的保持等。

2) 主要装置

由测量车辆位置、方向以及提供车辆当前状态的传感器组成。

- 有些传感器提供绝对位置信息，有些提供车辆和引导线相对位置信息。
- 典型的位置传感器有机械触觉、机器视觉、激光器和GPS接收器等；
- 典型的方向传感器有机器视觉、GPS及GDS地磁方向传感器等。

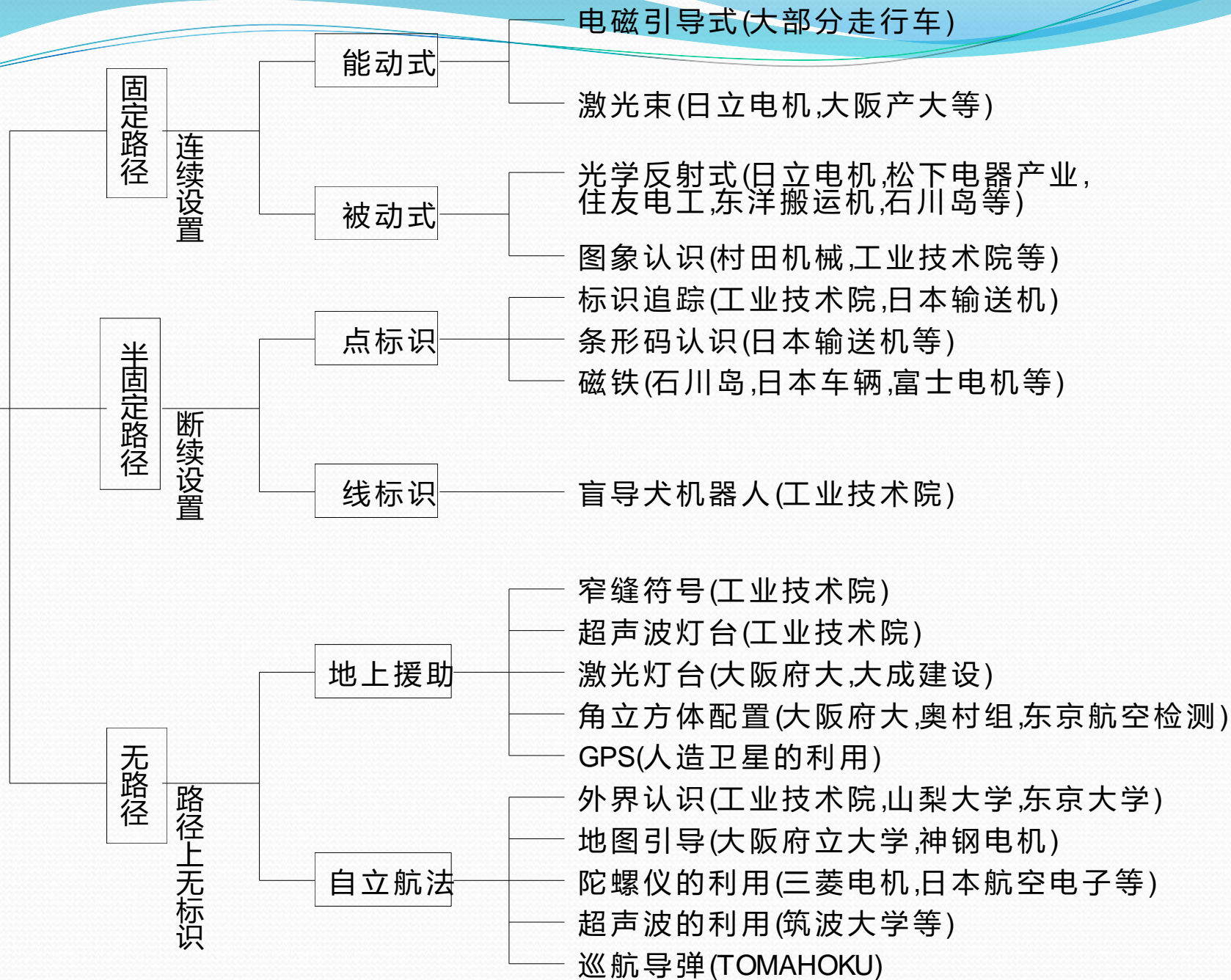
2、控制引导技术

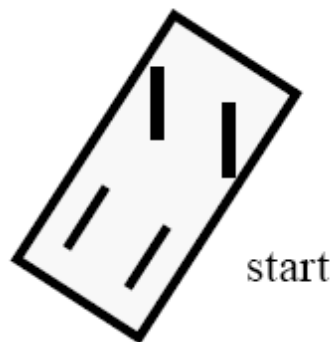
移动体的智能化的最大目的就是自动引导技术。其引导方式可以从最简单的固定路径方式到自立无路径引导方式。

跨及许多方面。

无人车、汽车、作业车等2维平面移动以及空间移动的引导方式，到目前为止，研究、开发、提案、实用化的方法。

引导方式

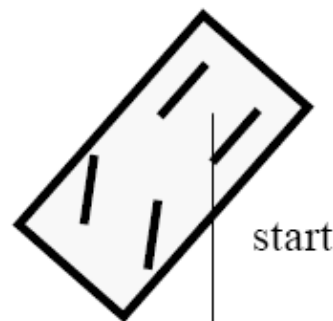




goal

点到点

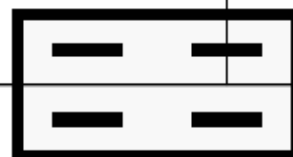
固定路径



start

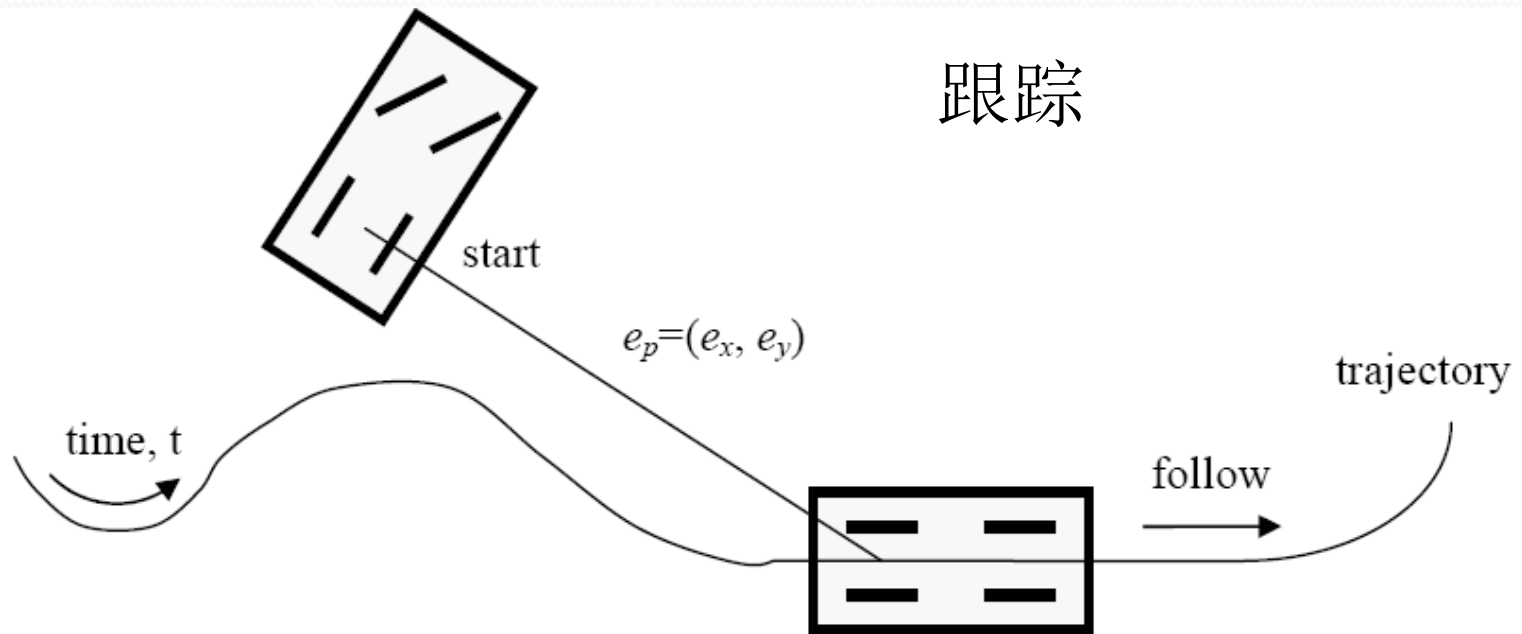
s

follow



path

跟踪



3 通信技术

- 对于移动体通信有如下的要求：
 - a.有线通信不合适；
 - b.可实现与个别的移动体通信；
 - c.仪器的互换性；
 - d.高S/N比；
 - e.保密性（防偷听）。

作为通信媒体可以使用电磁、电波、光等。

4 系统技术

- 随着智能移动机器人及各种自动化移动体的普及，相互之间任意移动、配合作业就会产生许多问题，如：碰撞的回避；由混乱引起的拥挤与停滞。为了解决这些问题就需要系统技术。

二、农用车辆的自动引导行走的研究

- 农用车辆的自动引导行走的研究是以拖拉机为中心而进行的。
- 以前的研究几乎都是沿着作业后的痕迹或事先规定好的路径而进行的。而没有开发车辆自身进行作业路径确定的研究。
- 最近，提出了几个引进尖端技术的新的农业生产系统。这些系统要求进行具有高性能的作业部和自动行走性能的行走部件的开发研究。

● 另外，农民的高龄化及青年劳力的不足，且农产品的价格提高。在这种状况下，要求农业机械作业具有：

- 1) 为了提高农产品的质量、增产的更高精度化；
- 2) 对应于适时作业、扩大规模的高效率化和节能化；
- 3) 创造一个避免倾斜地作业，农药喷洒等危险作业，从机械的振动、噪声、粉尘等恶劣环境中解放出来的舒适的作业环境。进而要求拖拉机及康拜因等现行机械的自动化，开发出自动引导行走的农用车辆。

1、农业领域的自动引导行走

- 农业领域内，研究无人驾驶的例子非常多，但都没有实用化。这是因为农业同其它领域相比，具有经济方面、技术方面上比较困难的特殊性。
- 在农业上无人作业的尝试，大体可以分为拖拉机等车辆上加上自动操纵装置及台架式的设施化的农场所进行的自动作业两个方面。

- 由机械式传感器所进行的康拜因的方向自动控制已经实现了实用化。这是由棒状传感器检测出稻株，靠离合器闸的接通与断开，实现操向。
- 京都大学也进行了用机械式传感器检测出犁耕的壁面，来控制拖拉机的行走方向。利用这种方法在进行6次30 m直线耕耘的作业中，都不存在累计误差。第5次实验的误差为 $+9, -7$ cm。

- 光学式传感器的使用，如英国NIAE，在拖拉机前轴上方0.5m的高度处，安装一个20 w的钨灯作为光源，以1KHz的频率断续地向下投光，从地面反射回来的反射光，使用两个受光器来根据未耕地与耕地的高低差所产生的结像位置的偏离来识别，从而实现自动行走。

- 电磁引导式的例子可以例举出日本『生物系特定产业技术研究推进机构』(简称：生研机构)所开发的蔬菜，果树用少量农药喷撒机。通过检测出埋在地下的通有交流电而产生磁场的电缆来引导车辆的行走，进行喷撒作业。目标喷撒量每1000 m²为10L，喷撒幅4.5 m，喷撒速度0.5 m/sec。由实验测试可知其具有实用性。

- 1994年3月16日生研机构所举行的1993年度农业机械研究报告会上发表了关于「自动引导行走系统的开发」的研究成果。该报告指出：此项研究采用地磁方位传感器来检测车辆的行走方位，控制车辆保持所给与的目标方位而进行自动引导行走的方法。确立了行走速度 0.5 m/s 的条件下，行走方位的控制精度为 0.3° 左右， 100 m 的直线行走产生 0.5 m 的偏离的实验结果。

- 美国的密西根大学开发了草坪修整机器人。该机上装有可检测出已修整和未修整的草坪边界线的行走距离传感器。最初的一周为示范行程,之后进行无人行走割草作业。另外,久保田铁工开发了在车辆的前部装有摄像机,利用图象处理判断已割和未割领域,而进行行走的车辆。

采用GPS定位的自动耕耘机器人



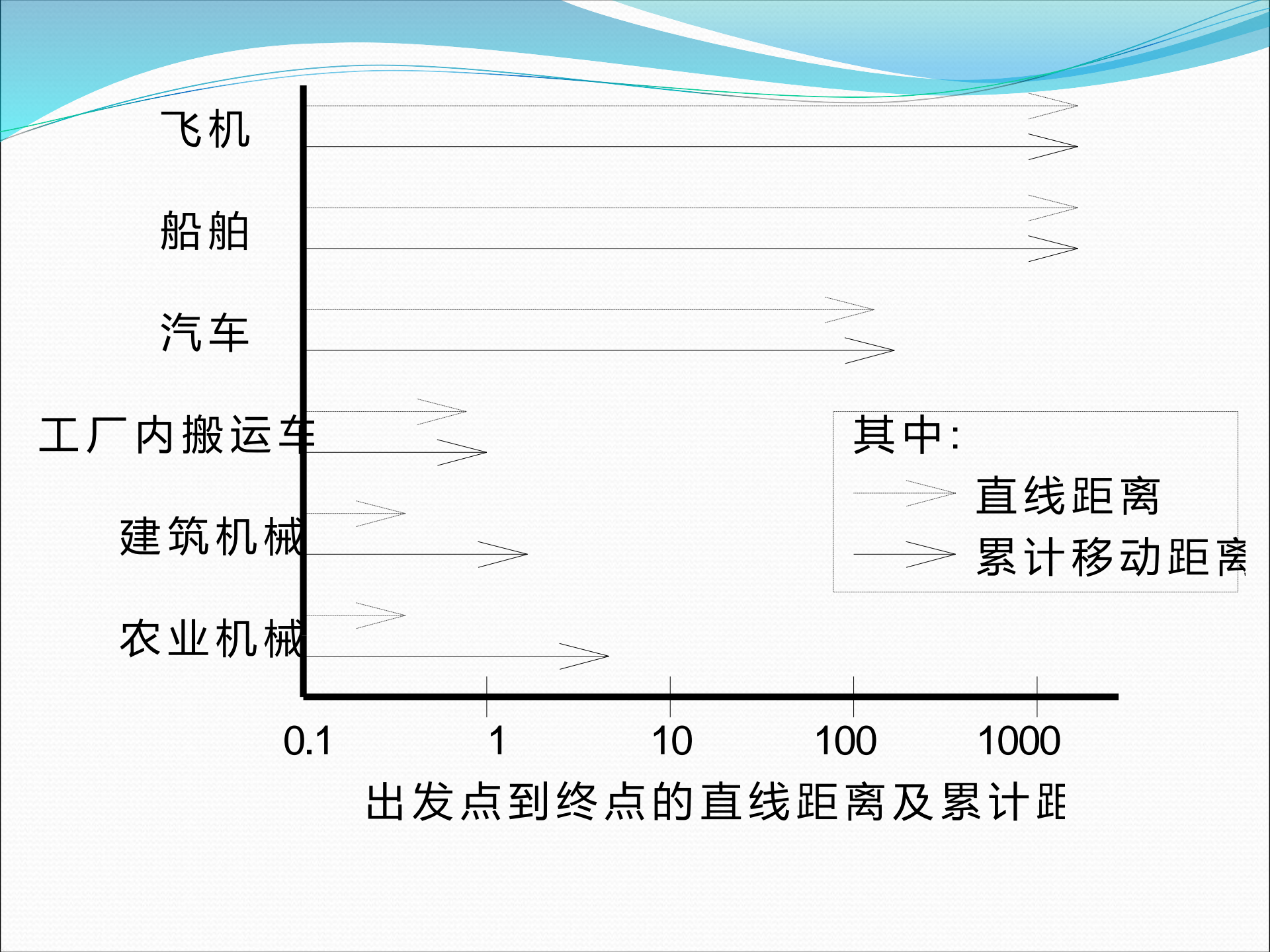


2、农用自动引导行走车的特殊性

- 农用自动引导行走车的自动行走与其它领域相比，具有其特殊性，受固有条件所约束。以下将其与飞机、船舶、汽车、工厂内无人搬运车、建筑机械等相比较，看其特殊性。

(1) 使用范围、距离

- 农业领域内的作业范围, 没有航空、船舶那样长, 而又比工厂内搬运车长。其它领域是以传递人员及物体为目的, 而农业及一部分建设领域不仅仅是单纯的移动, 而是一边作业一边移动。
- 例如: 100×100 m 的农田, 从出发点到终点的距离大约为 140 m, 如果作业幅宽为 2 m, 累计行走距离为 5 km。农业领域不是连接出发点和终点的最短距离, 而是具有以狭窄的范围, 较长的距离来遍及整个田地表面的特点。



(2) 精度

事例	发表的精度和条件	误差
惯性航法 (飞机)	每1小时(约1000km) 为3km	3/1,000
导弹(军事)	射程1800km,以50%的概率命中半径为36m的圆内	2/100,000
船舶	距标识1500海里的点为1/4海里	1/6,000
全世界测位卫星系统	与距离无关,精度30m	
汽车用惯性航法装置	相对于行走距离为1%	1/100
激光导向器 (隧道挖掘机)	在速度10cm/min,使用范围50m以下时,位置误差为±2cm	1/2,500
插秧机的一般行走	100×100m的水田(对角距离约140m),作业幅2m,5km移动,误差为5cm	1/100,000 或 5/14,000

如水稻插秧机要求其相对和绝对误差都在±5 cm左右。其它领域具有实用价值及已开发出的产品的精度如表所示。由此可见,农业领域内的自动引导行走出乎意料,要求较高的精度。

(3) 使用环境

在使用环境方面，农业领域与土木、建设领域一样，也受到气候的影响。其行走路也不是平坦的，且有时在倾斜地上作业。也必须考虑左右、前后摇晃的问题。这一点与工厂内的搬运车相比是相当艰苦的环境。目前，工厂内搬运车及建设领域上在倾斜地及凹凸不平的道路上的自动引导行走机器人也还没有实用化。但是，与汽车等交通工具相比，一般不必考虑步行者及其它车辆。

(4) 价格

飞机、船舶等的自动引导航法装置一般需要数十十万元以上。工厂内搬运、建设机械对于此研究也可以进行大量的投资。但是，农业是以个人的经营为主体，即使考虑到家庭成员的省力化，但同时也要考虑经费的削减或收入的增加之间的关系。因此，农业领域上自动引导行走如果不是低价格，那么，就不会普及。

(5) 操纵、作业者

航空、船舶领域的操纵者都是经过专门训练的专业人员；工厂内搬运车及建筑领域也都是专业人员担当。但是，在农业领域，大多数的农民都不是机械、电子的专家。因此，农业用自动引导行走机械要求具有无论谁都可处理的高可靠性，操作简单的优点。

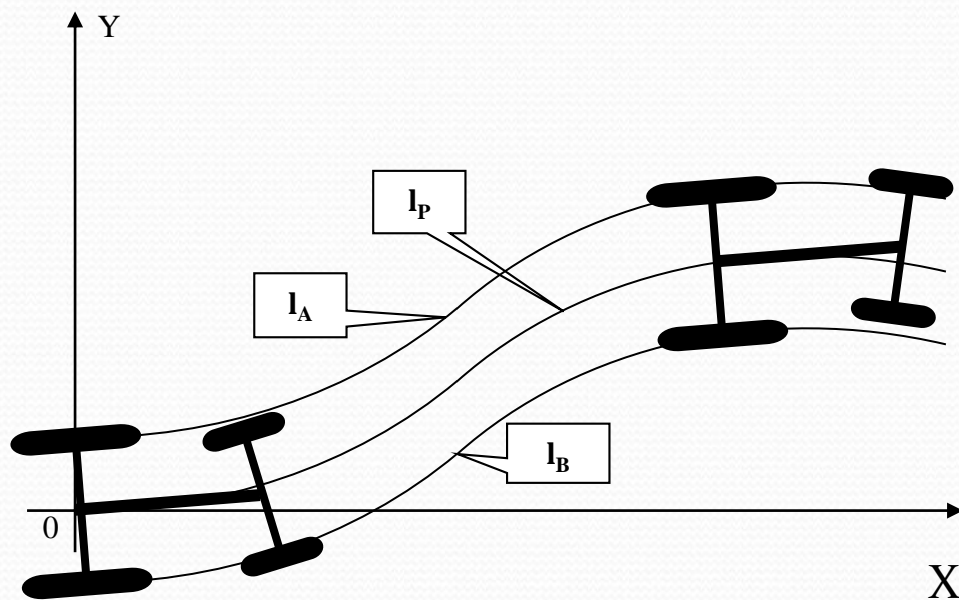
由此可见，在农业领域，对精度、价格等的要求是非常严厉的，其它领域的研究是不能简单移植的。为了实现高通用性的自由路径的自动引导行走，需要进行如下技术的开发：

- 适合于自动引导行走的足或操舵法的开发。
- 高精度且低价格的自己位置检测方法的开发。
- 适合于自动引导行走的作业法的确定的软件的开发。
- 障碍物回避机构、故障警报机构等的危险防止装置的开发。

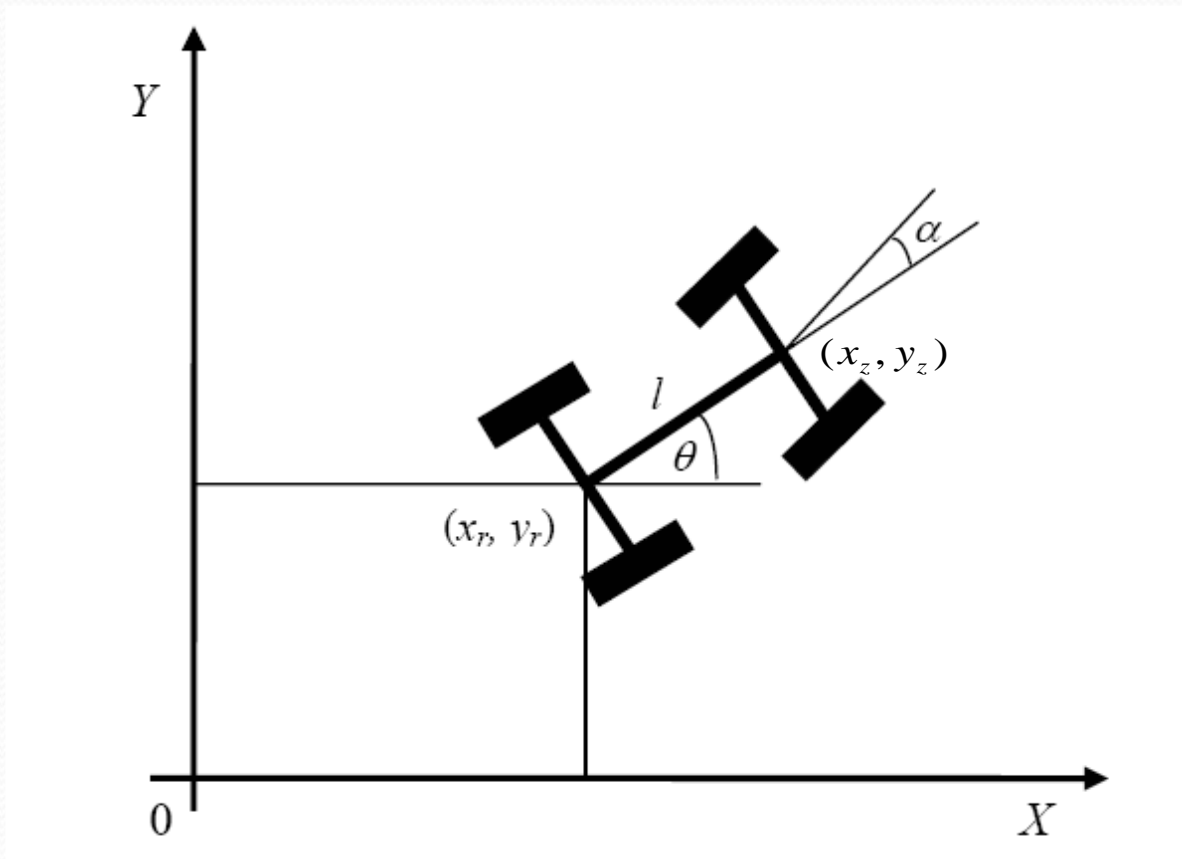
特别是自己位置认识技术是自动引导行走的基础，其有效的方法的开发，是目前所急待解决的问题。

3、行走模型建立

- 两轮驱动的四轮行走机器人的运动模型



- 车辆型机器人的运动学模型



$$\dot{x}_r \sin \theta - \dot{y}_r \cos \theta = 0$$

$$\dot{x}_z \sin(\alpha + \theta) - \dot{y}_z \cos(\alpha + \theta) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \frac{\tan \alpha}{l} \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2$$

v_1

车辆行驶速度

v_2

车辆转向速度

$$y_t = \frac{ax_t^2}{x_f^2} + \frac{bx_t^3}{x_f^3} + \frac{cx_t^4}{x_f^4} + \frac{dx_t^5}{x_f^5}$$

- A.初期条件: $x_t = 0$ $y_t = 0$ $\phi = 0$ $\delta = \delta_i$
- B.最終条件: $x_t = x_f$ $y_t = y_f$ $\phi = \phi_f$ $\delta = 0$

$$\theta = \phi$$

$$a = \frac{x_f^2 \tan \delta_i}{2l}$$

$$b = 10y_f - 4x_f \tan \phi_f - \frac{3x_f^2 \tan \delta_i}{2l}$$

$$c = -15y_f + 7x_f \tan \phi_f + \frac{3x_f^2 \tan \delta_i}{2l}$$

$$d = 6y_f - 3x_f \tan \phi_f - \frac{x_f^2 \tan \delta_i}{2l}$$

$$\frac{dy_t}{dx_t} = \tan \phi$$

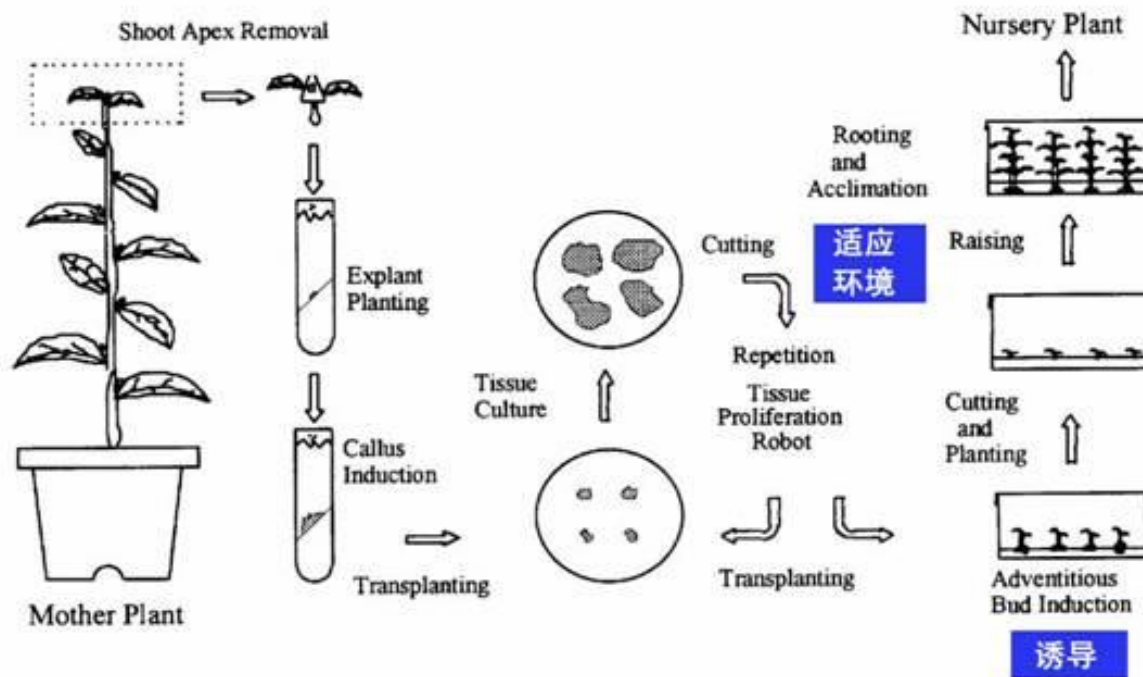
$$\frac{d^2 y_t}{dx_t^2} = \frac{\tan \delta}{l \cos^3 \phi}$$

$$\frac{d^2 y_t}{dx_t^2} = \frac{2a}{x_f^2} + \frac{6bx_t}{x_f^3} + \frac{12cx_t^2}{x_f^4} + \frac{20dx_t^3}{x_f^5}$$

$$\tan \delta = l \cos^3 \phi \left(\frac{2a}{x_f^2} + \frac{6bx_t}{x_f^3} + \frac{12cx_t^2}{x_f^4} + \frac{20dx_t^3}{x_f^5} \right)$$

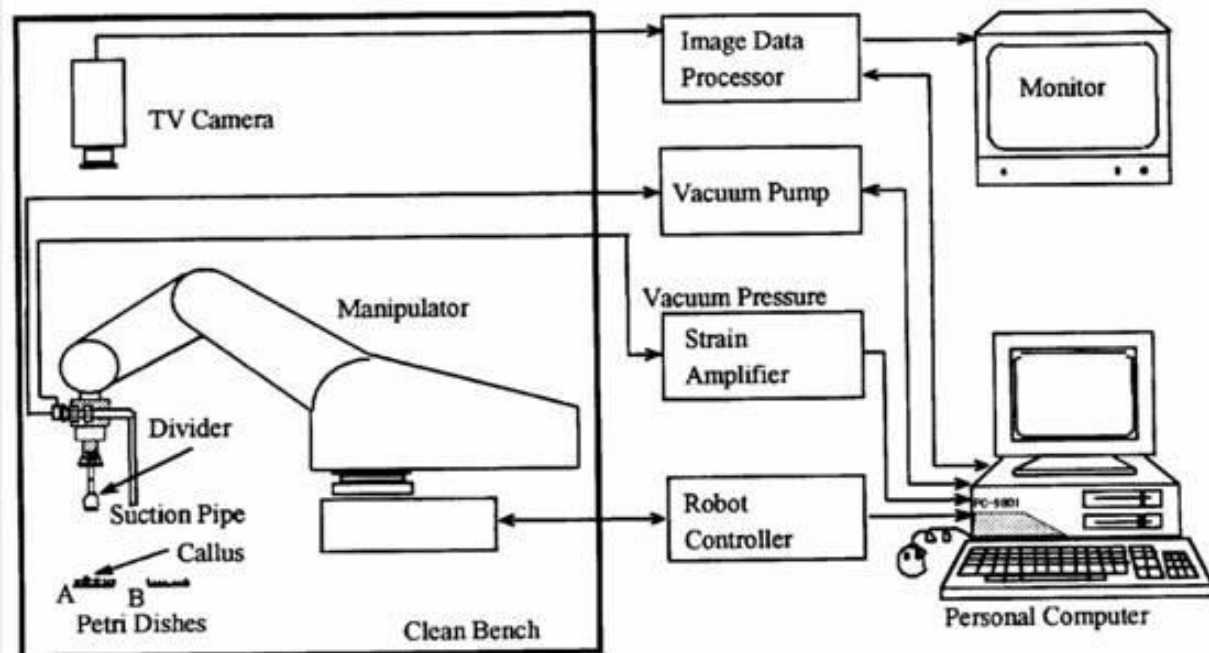
三、可控环境下机器人

- 1、微繁殖机器人
- 生物技术操作的重要特征是它可以在无菌环境下对小而且极脆弱的组织进行温和操作。通常这种操作是手工完成的，因此需要特殊的技能。但是人工的介入是引起污染的主要原因，防止污染对生物技术操作成功与否是至关重要的。
- 在组织培养方法中，将茎顶作为移植体来繁殖克隆植物的方法称为茎顶培养。在茎顶培养中，从母体切下的移植体被移植到琼脂培养基上，诱导产生一个胼胝(pianzhi)体或者芽。



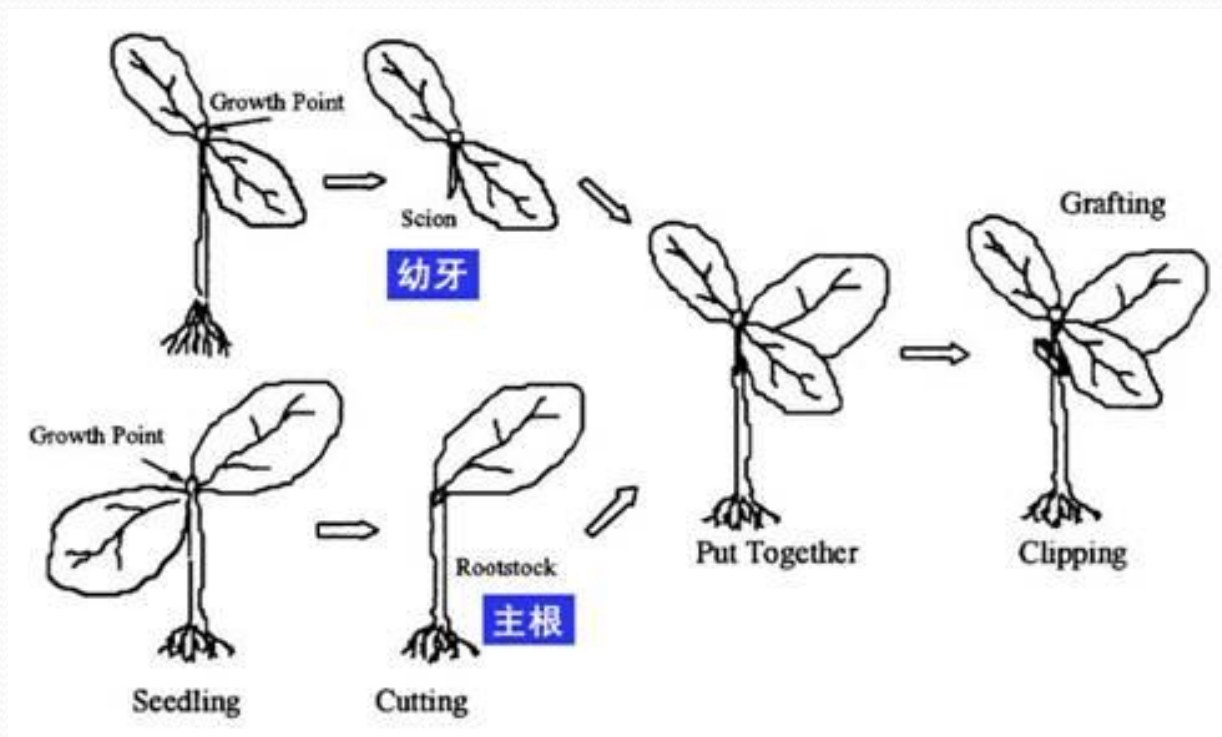
通过机器人进行组织分芽繁殖 (Okamoto et al., 1992)

植物组织移植机器人原理图
(Okamoto et al., 1992)



2、嫁接机器人

- 嫁接是把一种秧苗的根身部和另一种秧苗的子叶部结合成一根秧苗的方法。根身部称为砧木，子叶部称为接穗。可实现切断、合位和接苗三个环节。



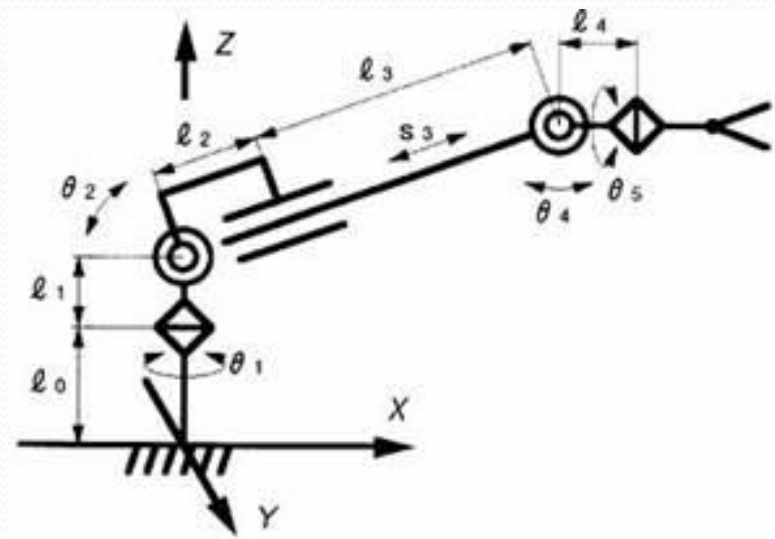
- 4、移植机器人

- 机器人移植工作单元的装置包含了所有必要机械装置和电气电子硬件和软件。



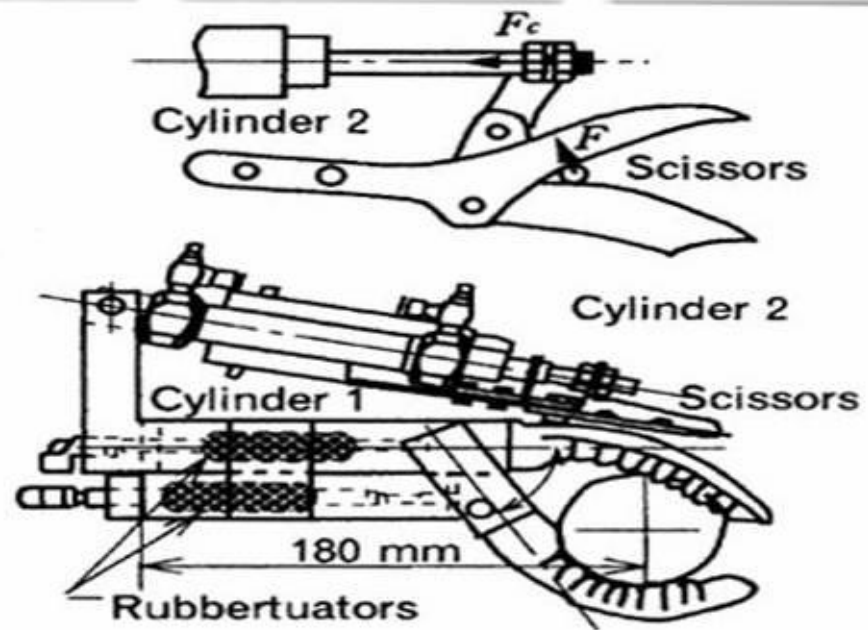
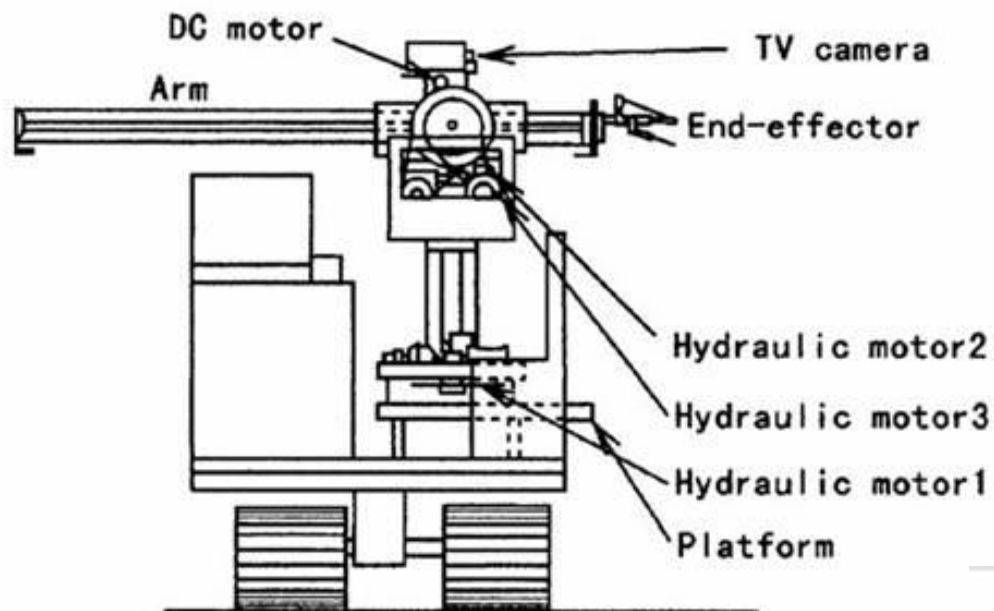
四、野外环境下机器人

- 1、收获机器人
- (1) 日本的葡萄收获机器人
- 日本Okayama大学研制的一个应用于训练系统的假设机器人能沿主藤行进的5个自由度的极坐标机械手（Kondo,1995）。



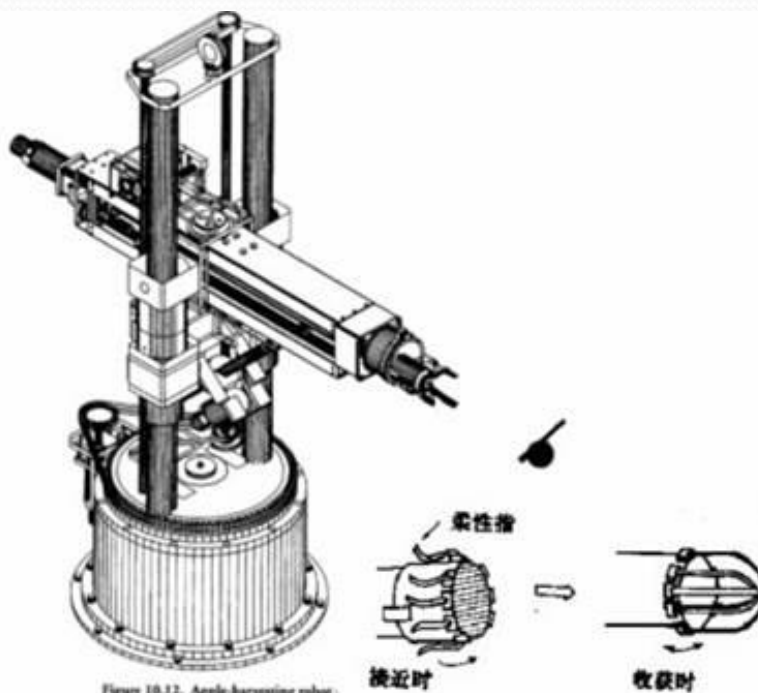
Waist	: $\theta_1 = -130 \sim 130^\circ$	$l_0 = 800\text{mm}$
Shoulder	: $\theta_2 = -40 \sim 30^\circ$	$l_1 = 0\text{mm}$
Arm	: $s_3 = 0 \sim 1000\text{mm}$	$l_2 = 0\text{mm}$
Wrist 1	: $\theta_4 = -70 \sim 70^\circ$	$l_3 = 630\text{mm}$
Wrist 2	: $\theta_5 = -90 \sim 90^\circ$	$l_4 = 0\text{mm}$

(2) 日本的柑桔-甜橙收获机器人



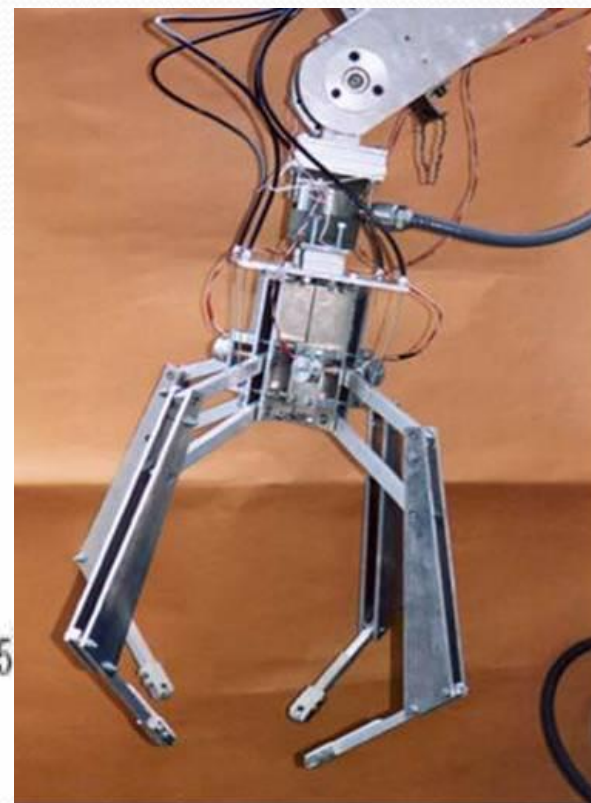
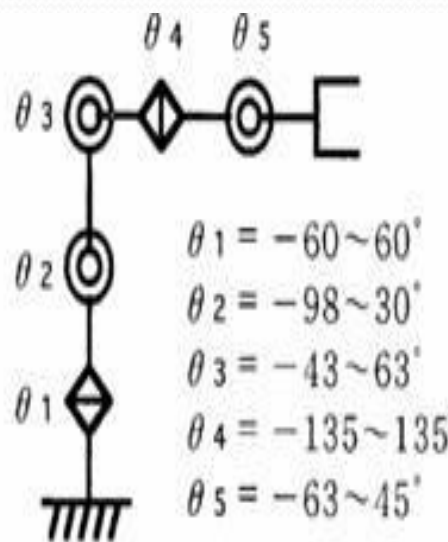
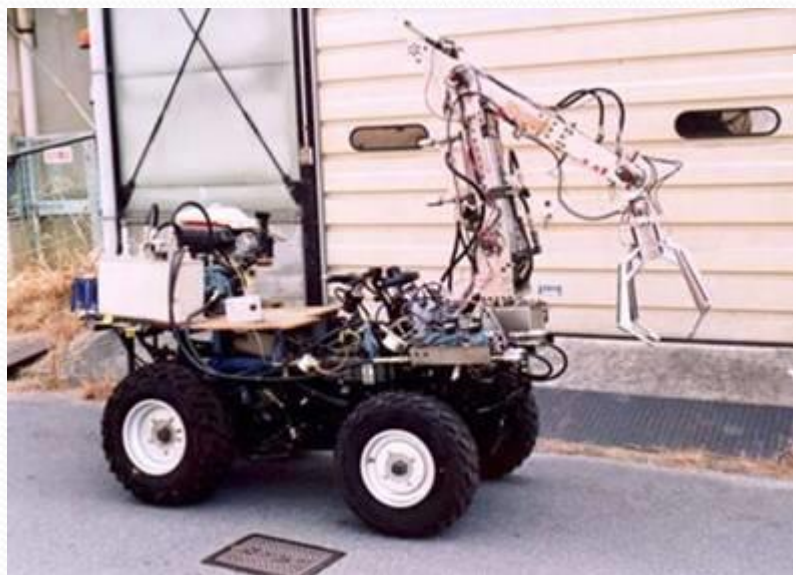
• (3) 韩国的苹果收获机器人

- 1994年，韩国kyungpook国立大学的Jang做了一项关于苹果收获机器人的研究。实验中使用一个极坐标型的机械手，它的工作距离范围可达3 m左右（图10.12 和图 10.13）。手臂通过四个驱动装置来实现移动：旋转器实现左右转向，直线模块实现直线移动，螺杆实现上下移动，倾斜调节器实现上下转向，这些都由伺服电机驱动。



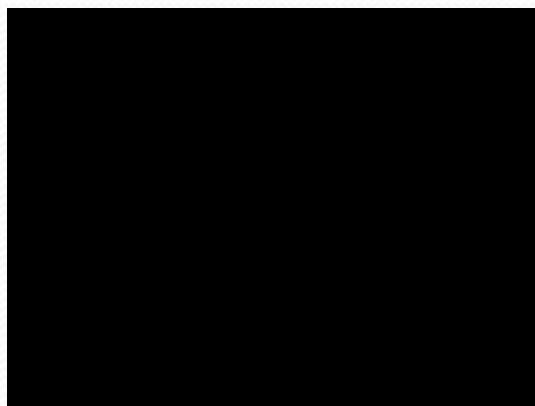
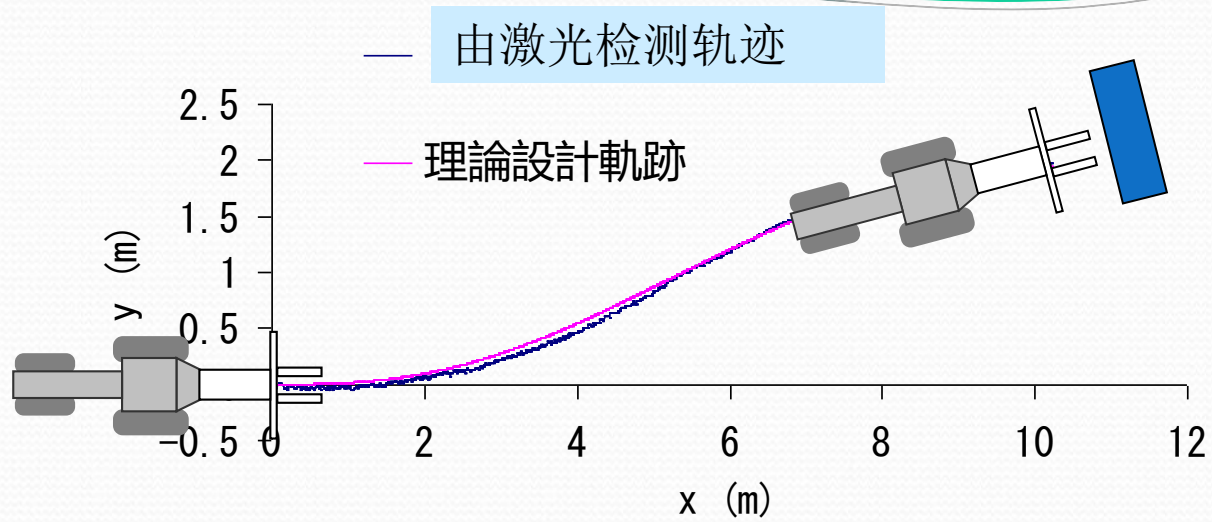
● (4) 西瓜收获机器人

- 为了解决采摘西瓜的问题，日本Kyoto大学制作了5一自由度水压机器人。这个机器人由以下结构组成：操作器，末端执行器，可视传感器和移动装置。



(5) 农业重量物装卸机器人









第六章

机器人的总体和机械结构设计

一、概述

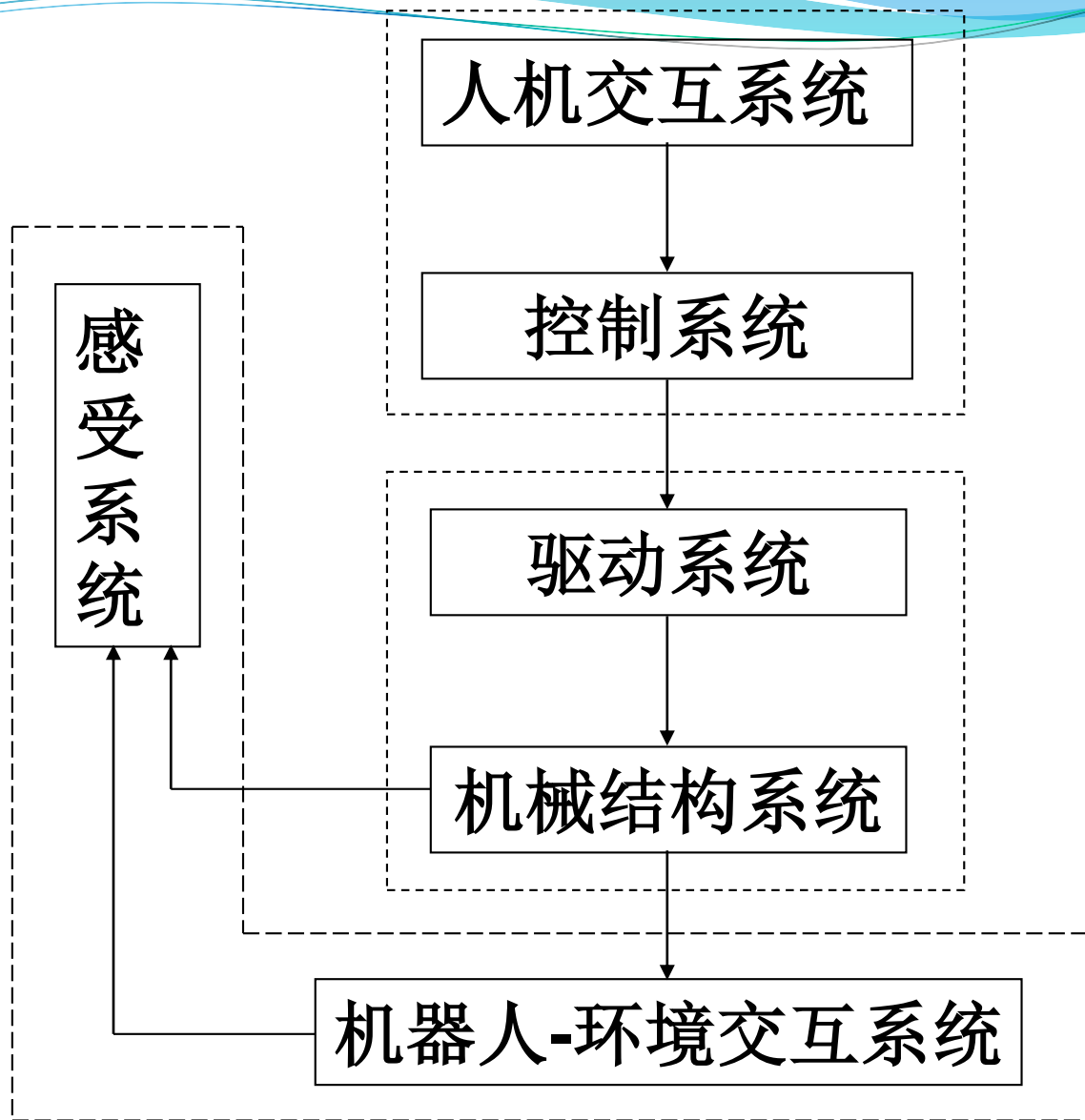
- 机器人设计包括：
 - 机械结构设计
 - 检测传感系统设计
 - 控制系统设计等
- 是机械、电子、检测、控制和计算机技术的综合应用。
- 为了明确机器人的设计任务和过程，我们有必要先对机器人的组成和技术参数进行介绍。

二、机器人的基本组成及技术参数

- 机器人的种类很多，不同结构和用途的机器人其组成当然也不完全一样，以工业机器人为例，介绍其组成和技术参数。

1、机器人的基本组成

- 机器人由：机械部分、传感部分、控制部分三大部分组成。这三大部分可分成驱动系统、机械结构系统、感受系统、机器人—环境交互系统、人机交互系统、控制系统六个子系统。



1) 驱动系统

要使机器人运行起来，需给各个关节即每个运动自由度安置传动装置，这就是驱动系统。

2) 机械结构系统

由机身、手臂、末端操作器三大件组成。每一大件都有若干自由度，构成一个多自由度的机械系统。若机身具备行走机构便构成行走机器人。若机身不具备行走及腰转机构，则构成单机机器人臂。手臂一般由上臂、下臂和手腕组成。末端操作器是直接装在手腕上的一个重要部件，它可以是两手指或多手指的手爪，也可以是喷漆枪、焊枪等作业工具。

3) 感受系统

它由内部传感器模块和外部传感器模块组成，获取内部和外部环境状态中有意义的信息。智能传感器的使用提高了机器人的机动性、适应性和智能化的水准。人类的感受系统对感知外部世界信息是极其灵巧的、然而，对于一些特殊的信息，传感器比人类的感受系统更有效。

4) 机器人——环境交互系统

机器人——环境交互系统是实现机器人与外部环境中的设备相互联系和协调的系统。机器人与外部设备集成为一个功能单元，如加工制造单元、焊接单元、装配单元等。当然，也可以是多台机器人、多台机床或设备、多个零件存储装置等集成为一个去执行复杂任务的功能单元。

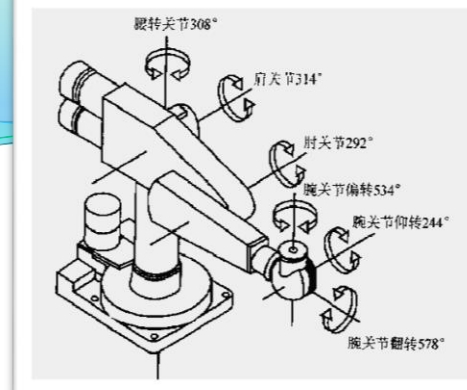
5) 人——机交互系统

是人与机器人进行联系和参与机器人控制的装置。例如，计算机的标准终端、指令控制台、信息显示板、危险情号报警器等。归纳起来为两大类：指令给定装置和信息显示装置。

6) 控制系统

控制系统的任务是根据机器人的作业指令程序以及从传感器反馈回来的信号，支配机器人的执行机构去完成规定的运动和功能。如果机器人不具备信息反馈特征，则为开环控制系统；具备信息反馈特征，则为闭环控制系统。根据控制原理可分为程序控制系统，适应性控制系统和人工智能控制系统。根据控制运动的形式可分为点位控制和连续轨迹控制。

2、机器人的技术参数



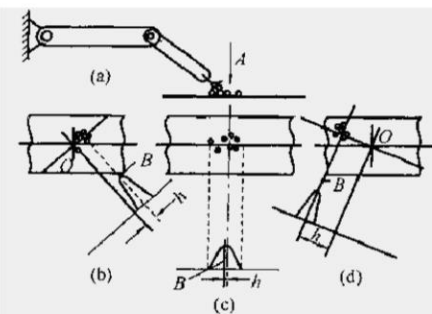
- 技术参数是机器人制造商在产品供货时所提供的技术数据。不同的机器人其技术参数不一样，而且各厂商所提供的技术参数项目和用户的要求也不完全一样。但是，工业机器人的主要技术参数一般都应有：自由度、定位精度和重复定位精度、工作范围、最大工作速度、承载能力等。

1) 自由度

- 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(末端操作器)的开合自由度。在三维空间中描述一个物体的位置和姿态(简称位姿)需要六个自由度。但是，机器人的自由度是根据其用途而设计的，可能少于六个自由度，也可能多于六个自由度。
- 大多数机器人从总体上看是个开链机构，但其中可能包含有局部闭环结构。闭环机构可提高刚性，但限制了关节的活动范围，因而会使工作空间减小。

2) 定位精度和重复定位精度

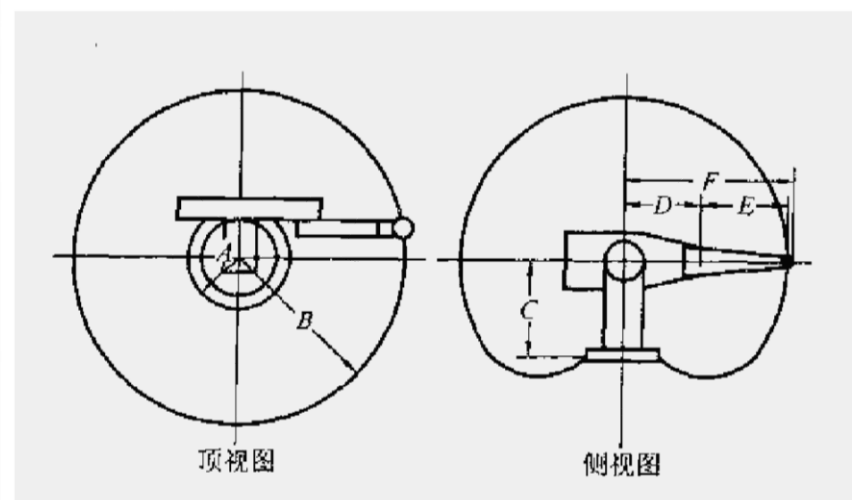
- 机器人精度是指定位精度和重复定位精度。定位精度是指机器人手部实际到达位置与目标位置之间的差异。重复定位精度是指机器人重复定位其手部于同一目标位置的能力，可以用标准偏差这个统计量来表示。它是衡量一系列误差值的密集度，即重复度



(a) 重复定位精度的测定;
(b) 合理定位精度, 良好重复定位精度;
(c) 良好定位精度, 很差重复定位精度;
(d) 很差定位精度, 良好重复定位精度

3) 工作范围

- 工作范围是指机器人手臂末端或手腕中心所能到达的所有点的集合，也叫做工作区域。因为末端操作器的形状和尺寸是多种多样的，为了真实反映机器人的特征参数，所以是指不安装末端操作器时的工作区域。工作范围的形状和大小是十分重要的。机器人在执行某一作业时，可能会因为存在手部不能到达的作业死区而不能完成任务。



4) 最大工作速度

- 通常指机器人手臂末端的最大速度。提高速度可提高工作效率，因此提高机器人的加速减速能力，保证机器人加速减速过程的平稳性是非常重要的。

5) 承载能力

- 承载能力是指机器人在工作范围内的任何位姿上所能承受的最大质量。机器人的载荷不仅取决于负载的质量，而且还与机器人运行的速度和加速度的大小和方向有关。为了安全起见，承载能力是指高速运行时的承载能力。通常，承载能力不仅要考虑负载，而且还要考虑机器人末端操作器的质量。

三、机器人总体设计

- 机器人总体设计的主要内容有：
 - ◆ 确定基本参数
 - ◆ 选择运动方式
 - ◆ 手臂配置形式
 - ◆ 位置检测
 - ◆ 驱动和控制方式等。
- 在结构设计的同时，对各部件的强度、刚度做必要的验算。机器人总体设计步骤分以下几个部分。

三、机器人总体设计

1、系统分析

- 机器人是实现**生产过程自动化**、提高劳动生产率的一种有力工具。

需要对各种机械化、自动化装置进行综合的技术和经济分析，确定使用机器人是否合适。确定使用机器人，设计人员一般要先做如下工作：

- (1) 根据机器人的使用场合，明确采用机器人的目的和任务。
- (2) 分析机器人所在系统的工作环境，包括机器人与已有设备的兼容性。

1、系统分析

(3) 认真分析系统的工作要求，确定机器人的基本功能和方案。

如机器人的自由度数、信息的存储容量、计算机功能、动作速度、定位精度、抓取重量、容许的空间结构尺寸以及温度、振动等环境条件的适用性等。进一步通过对被抓取、搬运物体的重量、形状、尺寸及生产批量等情况，来确定手部形式及抓取工件的部位和握力。

(4) 进行必要的调查研究，搜集国内外的有关技术资料，进行综合分析，找出借鉴处和需要注意的问题。

三、机器人总体设计

2、 技术设计

1) 机器人基本参数的确定

- 在系统分析的基础上，具体确定：
 - 臂力
 - 工作节拍
 - 工作范围
 - 运动速度
 - 定位精度
- 等基本参数。

(1) 臂力的确定

目前使用的机器人与机械手的臂力范围较大。对专用机械手来说，臂力主要根据被抓取物体的重量来定，其安全系数一般可在1.5—3.0范围内选取。对于工业机器人来说，臂力要根据被抓取、搬运物体的重量变化范围来定。


(2) 工作范围的确定

机器人或机械手的工作范围根据工艺要求和操作运动的轨迹来确定。一个操作运动的轨迹往往是几个动作合成的。在确定工作范围时，可将运动轨迹分解成单个动作，由单个动作的行程确定机器人或机械手的最大行程。为便于调整，可适当加大行程数值。各个动作的最大行程确定之后，机器人或机械手的工作范围也就定下来了。

(3) 确定运动速度

机器人各动作的最大行程确定之后，可根据生产需要的**工作节拍**分配每个动作的时间，进而确定各动作的运动速度。

如一个机器人要完成某一工件的上料过程，需完成夹紧工件，手臂升降、伸缩、回转等一系列动作，这些动作应该在工作节拍所规定的时间内完成，至于各动作的时间究竟应如何分配，则取决于很多因素，不是一般的计算所能确定的。要根据各种因素反复考虑，并试作各动作的分配方案，进行比较平衡后，才能确定。节拍较短时，更需仔细考虑。



机器人或机械手的总动作时间应小于或等于工作节拍。如果两个动作同时进行，要按时间较长的计算。一旦确定了最大行程和动作时间，其运动速度也就确定下来了。

应如何分配**各动作时间**？

分配各动作时间应考虑以下要求：

- ① 给定的运动时间应大于电气、液(气)压元件的执行时间。
- ② 在工作节拍短、动作多的情况下，常使几个动作同时进行，以保证动作的同步。

③ 伸缩运动的速度要大于回转运动的速度

因为回转运动的惯性一般大于伸缩运动的惯性。机器人或机械手升降、回转及伸缩运动的时间分配要根据实际情况进行分配——如果工作节拍短，上述运动所分配的时间就短，运动速度就一定要提高。但速度不能太高，否则会给设计、制造带来困难。在满足工作节拍要求的条件下，应尽量选取较低的运动速度。机器人或机械手的运动速度与臂力、行程、驱动方式、缓冲方式、定位方式都有很大关系，应根据具体情况加以确定。

(4) 定位精度的确定

机器人或机械手的定位精度是根据使用要求确定的，而机器人或机械手本身所能达到的定位精度，取决于定位方式、运动速度、控制方式、臂部刚度、驱动方式、缓冲方法等因素。

工艺过程的不同，对机器人或机械手重复定位精度的要求也不同。不同工艺过程所要求的定位精度一般如下：

金属切削机床上下料	$\pm(0.05\sim1.00)(\text{mm})$
冲床上下料	$\pm1(\text{mm})$
点焊	$\pm1(\text{mm})$
模锻	$\pm(0.1\sim2.0)(\text{mm})$
喷涂	$\pm3(\text{mm})$
装配、测量	$\pm(0.01\sim0.50)(\text{mm})$

2) 机器人运动形式的选择

- 根据主要的运动参数选择运动形式是结构设计的基础。常见机器人的运动形式有五种：直角坐标型、圆柱坐标型、极坐标型、关节型和并联型。同一种运动形式为适应不同生产工艺的需要，可采用不同的结构。具体选用哪种形式，必须根据工艺要求、工作现场、位置以及搬运前后工件中心线方向的变化等情况，分析比较、择优选取。
- 为了满足特定工艺要求，专用的机械手一般只要求有二个或三个自由度，而通用机器人必须具有四至六个自由度，才能满足不同产品的不同工艺要求。所选择的运动形式，在满足需要的情况下，应以使自由度最少、结构最简单为准。

3) 拟定检测传感系统框图

- 选择合适的传感器，以便结构设计时考虑安装位置。

4) 确定控制系统总体方案，绘制框图

5) 机械结构设计

- 确定驱动方式，选择运动部件和设计具体结构，绘制机器人总装图及主要部件零件图。

3、仿真分析

(1) 运动学计算：

分析是否能达到要求的速度、加速度、位置。

(2) 动力学计算：

关节驱动力大小，分析驱动装置是否满足要求。

(3) 运动的动态仿真：

每一位姿用三维图形连续显示出来，实现机器人的运动仿真。

(4) 性能分析:

建立机器人数学模型，对机器人动态性能进行仿真计算。

(5) 方案和参数修改:

运用仿真分析的结果对所设计的方案、结构、尺寸和参数进行修改，加以完善。

四、 机器人机械系统设计

- 机器人机械系统设计是机器人设计的重要部分。其它系统的设计尽管有各自的独立性，但都必须与机械系统相匹配，相辅相成，构成一个完整的机器人系统。
- 在确定机器人运动形式的基础上，机器人机械系统设计还包括：
 - 确定机器人驱动方式
 - 关节驱动方式
 - 材料选择
 - 平衡系统设计
 - 零部件设计

1、机器人驱动方式

- 机器人驱动方式有电动、液压和气动三种。
- 一台机器人可以只用一种驱动方式，也可以采用几种方式联合驱动。选择时主要考虑：负载、效率、精度和环境等因素。
 - 液压系统具有较大的功率体积比，因此，大负载通常选用液压驱动。
 - 气动系统简单、成本低，适合节拍快、负载小且精度要求不高的场合，常用于点位控制、抓取、弹性捏持和真空吸附。
 - 电动系统适合于中等负载，特别适合动作复杂、运动轨迹严格的工业机器人和各种微型机器人。

2、关节驱动方式

- 关节的驱动方式有**直接驱动和间接驱动**两种方式。
- 直接驱动方式是驱动器的输出轴和机器人手臂的关节轴直接相连。
- 间接驱动方式是驱动器经过减速器或钢丝绳、皮带、平行连杆等装置后与关节轴相连。

(1) 关节直接驱动方式

直接驱动机器人也叫作DD机器人(Direct Drive Robot)，简称DDR。DD机器人一般指驱动电机通过机械接口直接与关节连接。DD机器人的特点是驱动电机和关节之间没有速度和转矩的转换。

DD机器人与间接驱动机器人相比，有如下优点：

- ① 机械传动精度高；
- ② 振动小，结构刚度好；
- ② 机械传动损耗小；
- ④ 结构紧凑，可靠性高；
- ⑤ 电机峰值扭矩大，电气时间常数小，短时间内可以产生很大转矩，响应速度快，调速范围宽；
- ⑥ 控制性能较好。

(2) 关节间接驱动方式

- 大部分机器人的关节是间接驱动。
- 这种间接驱动，通常其驱动器的输出力矩大大小于驱动关节所需要的力矩，所以必须**使用减速器**。
- 另外，由于手臂通常采用悬臂梁结构，所以多自由度机器人关节上安装驱动器会使手臂根部关节驱动器的负荷增大。解决这一问题的方法，通常可用间接驱动机构。

3、材料的选择

- 选择机器人本体材料，应从机器人的性能要求出发，满足机器人的设计和制作要求。
- 机器人材料并不是简单工业材料的组合，它应是满足机器人性能的材料。
- 应在充分了解机器人的特性和各组成部分的基础上，从设计思想出发，确定所用材料的特性，即必须事先充分领会机器人的概念和各组成部分的作用。

- 机器人本体所用的材料也是结构材料。另一方面，机器人整体是运动的，所以，机器人运动部分的材料质量要轻。
- 精密机器人对机器人的刚度有一定的要求，即对材料的刚性有要求。刚度设计时要考虑静刚度和动刚度，即要考虑振动问题。从材料角度看，控制振动涉及到减轻重量和抑制振动两方面，本质上就是材料内部的能量损耗和刚度问题，它与材料的抗振性紧密相关。

● 总之，选择机器人材料时，要综合考虑

- 强度

- 刚度

- 重量

- 弹性

- 抗振性

- 外观以及价格

等因素。

《终结者3》中的机器人

- 梦想中的机器人材料是液态金属，可以自由变形成任何人的模样，损坏后可迅速自动修复，身体散成水珠也能再聚合起来，百打不死。



机器人常用材料:

1) 碳素结构钢和合金结构钢:

强度好, 弹性模量大, 抗变形能力强, 是应用最广泛的材料。

2) 铝、铝合金及其他轻合金材料:

特点是重量轻, 弹性模量并不大, 但是材料密度小, 故 E/P 之比仍可与钢材相比。

3) 纤维增强合金:

如硼纤维增强铝合金、石墨纤维增强镁合金, 这种纤维增强金属材料具有非常高的 E/P 比, 而且没有无机复合材料的缺点, 但价格昂贵。

- 4) **陶瓷**: 陶瓷材料具有良好的品质, 但是脆性大, 不易加工成具有长孔的连杆, 与金属零件连接的接合部需特殊设计。
- 5) **纤维增强复合材料**: 具有极好的 E / P 比, 但存在老化、蠕变、高温热膨胀, 以及与金属件连接困难等问题。这类材料不但重量轻、刚度大, 而且还具有十分突出的阻尼大的优点。所以在高速机器人上应用复合材料的实例越来越多。
- 6) **粘弹性大阻尼材料**: 增大机器人连杆件的阻尼是改善机器人动态特性的有效方法。目前有许多方法用来增加结构件材料的阻尼, 其中最适合机器人采用的一种方法是用粘弹性大阻尼材料, 对原构件进行约束层阻尼处理。

4、平衡系统设计

1) 机器人平衡系统的作用

- 机器人是一个多刚体耦合系统，系统的平衡性是极其重要的。在机器人设计中采用平衡系统的理由是：
 - ① 安全：根据机器人动力学方程知道，关节驱动力矩包括重力矩项，即各连杆质量对关节产生的重力矩。当机器人完成作业，切断电源后，机器人机构会因重力而失去稳定。平衡系统是为了防止机器人因动力源中断而失稳，引起“倒塌”的趋势。

- ② 借助平衡系统来降低因机器人构形变化，而导致重力引起关节驱动力矩变化的峰值。
- ③ 借助平衡系统能降低因机器人运动，导致惯性力矩引起关节驱动力矩变化的峰值。
- ④ 借助平衡系统能减少动力学方程中内部耦合项和非线性项，改善机器人动力特性。
- ⑤ 借助平衡系统能减小机械臂结构柔性所引起的不良影响。
- ⑥ 借助平衡系统能使机器人运行稳定，降低地面安装要求。

2) 平衡系统设计的主要途径

- 尽管为了防止因动力源中断，机器人有向地面“倒塌”的趋势，可采用不可逆转机构或制动闸。但是，在机器人日趋高速化之时，机器人平衡系统的良好设计仍是非常重要的。其设计途径有三条：
 - ✓ 质量平衡技术
 - ✓ 弹簧力平衡技术
 - ✓ 可控力平衡技术

5、主要部件的设计和选择

- 近年来，机器人朝着智能化、标准化方向发展。模块化机器人得到重视，它是由一些标准化、系列化的模块，通过具有特殊功能的结合部件，用积木拼搭的方式组成一个机器人系统。其特点是经济、灵活。目前，国内外已研制和生产了各种不同的**标准组件**，如伺服电机、传感器、手臂、手腕、手爪、机身。因此，在设计机器人时，可选用标准模块。当然也可自行设计一些专用部件。

五、传动部件设计

- 机器人是运动的，各个部位都需要能源和动力，因此设计和选择良好的传动部件是非常重要的。这涉及到关节形式的确定，传动方式以及传动部件的定位和消隙等多个方面。

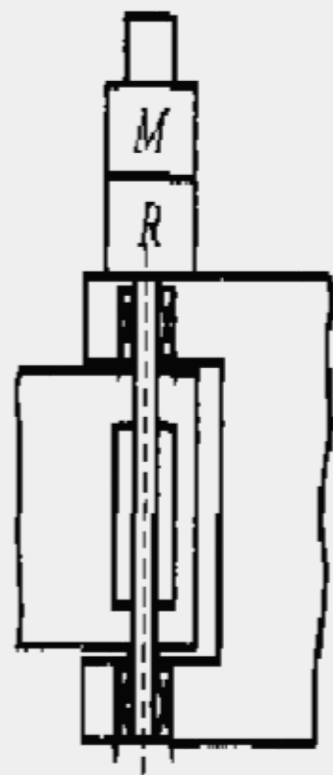
1、关节

- 机器人中连接运动部分的机构称关节(Joint)。关节有**转动型**和**移动型**，分别称它为转动关节和移动关节。

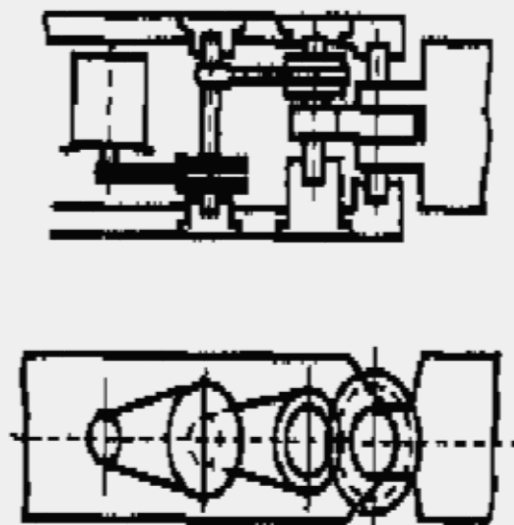
1) 转动关节

- 转动关节就是关节型机器人中被简称为“关节”的连接部分，它既连接各机构，又传递各机构间的回转运动(或摆动)，用于基座与臂部、臂部之间、臂部和手等连接部位上。
- 关节由**回转轴、轴承和驱动机构**组成。
- 关节与驱动机构的连接方式有多种，因此转动关节也有多种形式。

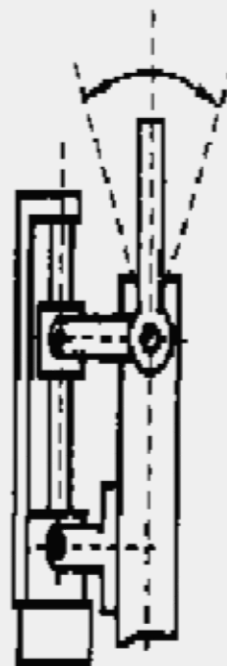
②驱动机构与回转轴正交式



(a)

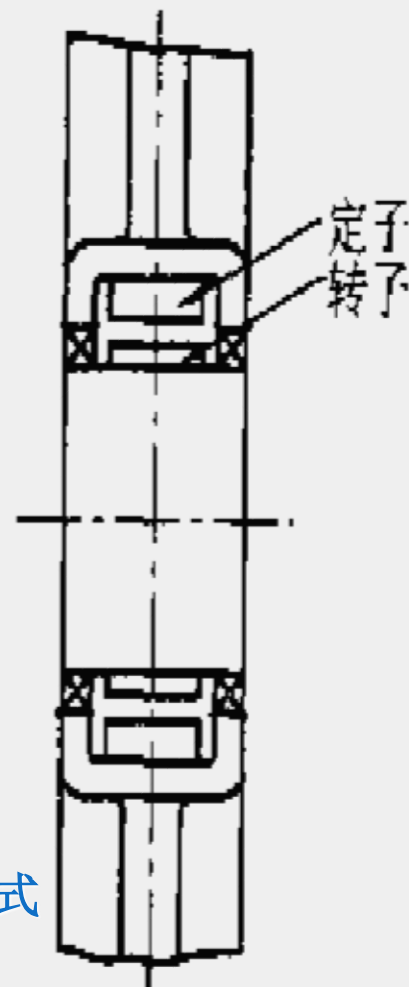


(b)



(c)

③外部驱动机构驱动臂部的形式



(d)

④驱动电机安装在关节内部的形式

图 2-17 转动关节的形式

①驱动机构和回转轴同轴式

转动关节的形式

①驱动机构和回转轴同轴式

- 这种形式直接驱动回转轴，有较高的定位精度。但是为减轻重量，要选择小型减速器并增加臂部的刚性。它适用于水平多关节型机器人。

②驱动机构与回转轴正交式

- 重量大的减速机构安放在基座上，通过臂部内的齿轮、链条来传递运动。这种形式适用于要求臂部结构紧凑的场合。

③外部驱动机构驱动臂部的形式

- 适合于传递大扭矩的回转运动，采用的传动机构有滚珠丝杠、液压缸和汽缸

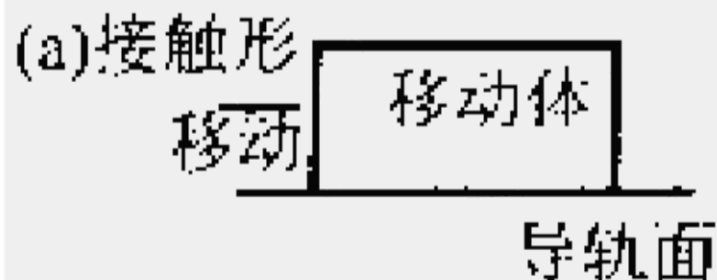
④驱动电机安装在关节内部的形式

- 这种方式称为“直接驱动方式”。

2) 移动关节

- 移动关节由**直线运动机构**和在整个运动范围内起**直线导向作用的直线导轨**部分组成。导轨部分分为**滑动导轨、滚动导轨、静压导轨和磁性悬浮导轨**等形式，它们各有特点。
- 一般，机器人导轨要求间隙小或能消除间隙。在垂直于运动方向上应刚度高，摩擦系数小且不随速度变化，并且有高阻尼、小尺寸和小惯量。通常，由于机器人在速度和精度方面要求很高，故一般采用结构紧凑且价格低廉的滚动导轨。

(1)滑动导轨



(2)滚动导轨



(b)动压形



(3)静压导轨



(c)树脂板粘接形



(4)磁性悬浮导轨



直线导轨的种类

滚动导轨可以按轨道形状和滚动体分为下述种类：

- 按滚动体分类——球、圆柱滚子和滚针；
- 按轨道分类——圆轴式、平面式和滚道式；
- 按滚动体是否循环分类——循环式、非循环式
- 装有滚珠的滚动导轨适用于中小载荷和摩擦小的场合；
- 装有滚柱的滚动导轨适用于重载和高刚性的场合。受轻载的滚柱特性接近于线性弹簧，呈硬弹簧特性，而滚珠的特性接近于非线性弹簧，刚性要求高时应施加一定的预紧力。

2、传动件的定位和消隙

1) 传动件的定位

- 机器人的重复定位精度要求较高，设计时应根据具体要求，选择适当的定位方法。目前常用的定位方法有电气开关定位、机械挡块定位和伺服定位。

(1) 电气开关定位

- 电气开关定位是利用电气开关(有触点或无触点)作行程检测元件。液压驱动的机械手运行至定位点时，行程开关发出信号，电控系统使电磁换向阀关闭油路而实现定位。电动机驱动的机械手需要定位时，行程开关发信号，电气系统激励电磁制动器进行制动而定位。
- 使用电气开关定位的机械手，其结构简单、工作可靠、维修方便，但由于受惯性力、油温波动和电控系统误差等因素的影响，重复定位精度比较低，一般为 ± 3 — ± 5 mm。

(2)机械挡块定位

- 机械挡块定位是在行程终点设置机械挡块，当机械手减速运动到终点时，紧靠挡块而定位。
- 若定位前缓冲较好，定位时驱动压力未撤除，在驱动压力下将运动件压在机械挡块上，或驱动压力将活塞压靠在缸盖上就能达到较高的定位精度，最高可达 $\pm 0.02\text{mm}$ 。若定位时关闭驱动油路，去掉驱动压力，机械手运动件不能紧靠在机械挡块上，定位精度就会减低，其减低的程度与定位前的缓冲效果和机械手的结构刚性等因素有关。

(3) 伺服定位系统

- 电气开关定位与机械挡块定位这两种定位方法，只适用于两点或多点定位。而在任意点定位时，要使用伺服定位系统。伺服系统可以输入指令控制位移的变化，从而获得良好的运动特性。它不仅适用于点位控制，而且也适用于连续轨迹控制。
- 开环伺服定位系统没有行程检测及反馈，是一种直接用脉冲频率变化和脉冲数量控制机器人速度和位移的定位方式。这种定位方式抗干扰能力差，定位精度较低。如果需要较高的定位精度(如 $\pm 0.2\text{mm}$)，则一定要降低机器人关节轴的平均速度。
- 闭环伺服定位系统具有反馈环节，抗干扰能力强，反应速度快，容易实现任意点定位。

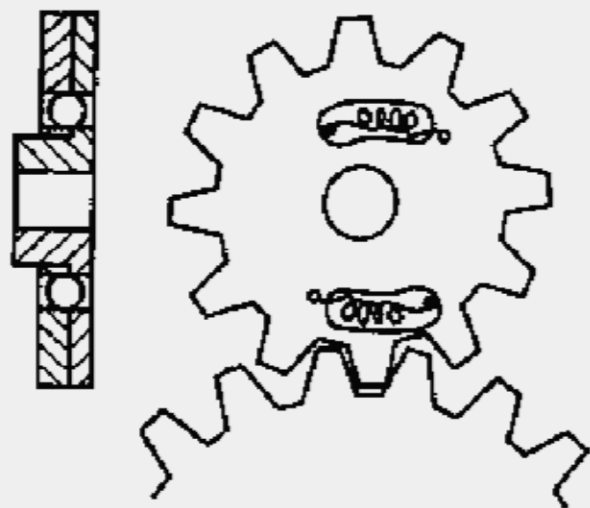
2) 传动件的消隙

- 传动机构存在间隙，也叫**侧隙**。就齿轮传动而言，齿轮传动的侧隙是指一对齿轮中一个齿轮固定不动，另一个齿轮能够作出最大的角位移。**传动的间隙，影响了机器人的重复定位精度和平稳性。**对机器人控制系统来说，传动间隙导致显著的非线性变化、振动和不稳定。
- 但是，传动间隙是不可避免的，其产生的主要原因有：由于**制造及装配误差**所产生的间隙，为适应**热膨胀**而特意留出的间隙。
- **消除传动间隙的主要途径有：**提高制造和装配精度，设计可调整传动间隙的机构，设置弹性补偿零件。

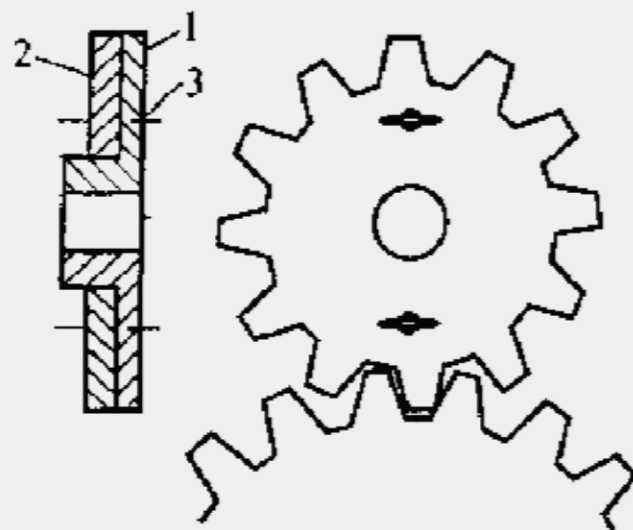
几种常用的传动消隙方法：

(1)消隙齿轮

- 图2—26(a)所示的消隙齿轮由具有相同齿轮参数的并只有一半齿宽的两个薄齿轮组成，利用弹簧的压力使它们与配对的齿轮两侧齿廓相接触，完全消除了齿侧间隙。图2—26(b)所示为用螺钉₃将两个薄齿轮1和2连接在一起，代替图(a)中的弹簧。其好处是间隙可以调整。
-



(a) 弹簧消隙

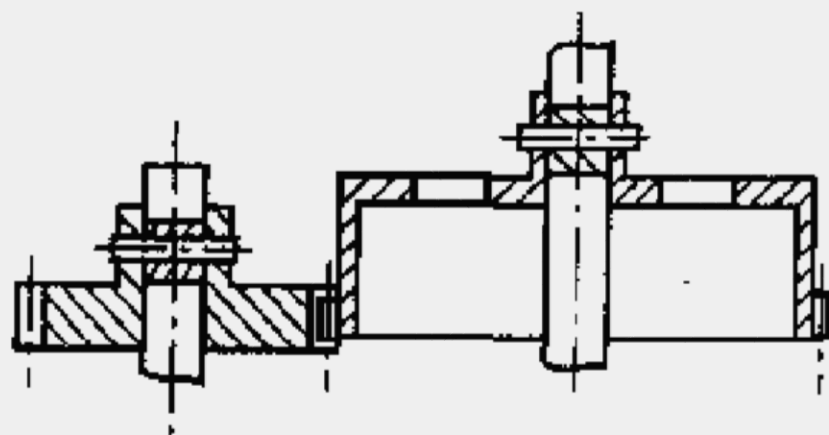


(b) 螺钉消隙

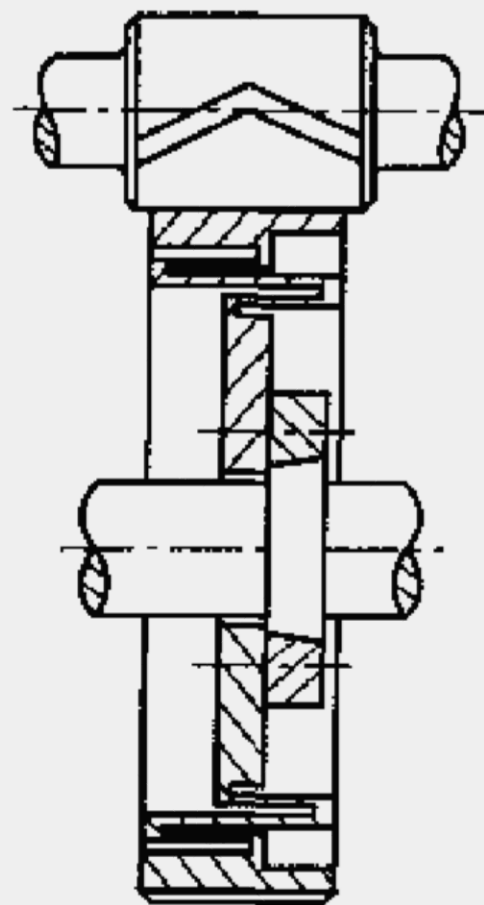
图 2-26 消隙齿轮

(2) 柔性齿轮消隙

- 图2—27(a)所示为一种钟罩形状的具有弹性的柔性齿轮，在装配时对它稍许加些预载就能引起轮壳的变形，从而引起每个轮齿的双侧齿廓都能啮合，消除了侧隙。图2—27(b)所示为采用了上述同样的原理，却用不同设计形式的径向柔性齿轮，轮壳和齿圈是刚性的，但与齿轮圈连接处具有弹性。对于给定同样的扭矩载荷，为保证无侧隙啮合，径向柔性齿轮所需要的预载力比钟罩状柔性齿轮要小得多。



(a) 钟罩状柔性齿轮

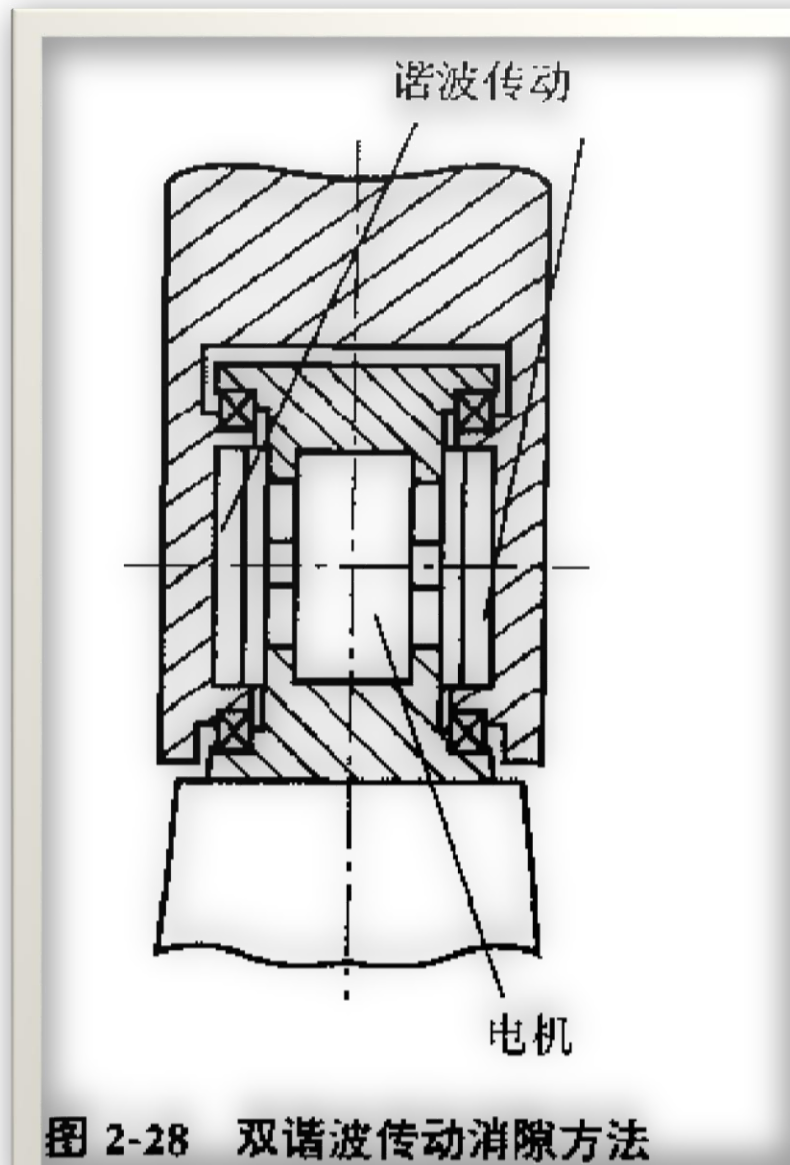


(b) 径向柔性齿轮

图 2-27 柔性齿轮消隙

(3)对称传动消隙

- 一个传动系统设置两个对称的分支传动，并且其中必有一个是具有“回弹”能力的。右图所示的是使用了两个谐波传动的消隙方法。电机置于关节中间，电机双向输出轴连接完全相同的两个谐波减速器，驱动一个手臂运动。谐波传动中的柔轮弹性很好。



(4) 偏心机构消隙

- 如右图所示的偏心机构实际上是中心距调整机构。当有齿轮磨损等原因造成传动间隙增加时，最简单的方法是调整中心距。

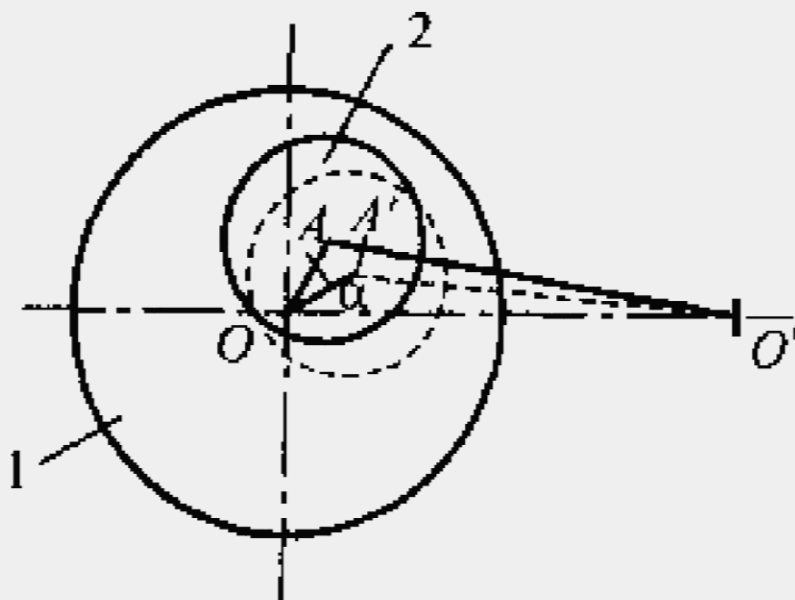


图 2-30 偏心消隙机构

(5)齿廓弹性覆层消除

齿廓表面覆有薄薄一层弹性很好的橡胶层或层压材料，相啮合的一对齿轮加以预载，可以完全消除啮合侧隙，如右图所示。齿轮几何学上的齿面间隙，在滑动橡胶层内部发生剪切弹性流动时被吸收，因此，像铝合金，甚至石墨纤维增强塑料这种非常轻而又具备良好接触和滑动品质的材料，都可用来作为传动齿轮的材料，这还大大地减少了重量和转动惯量。



图 2-31 齿廓弹性层消除

3) 机器人传动机构

- 传动机构用来把驱动器的运动传递到关节和动作部位。

机器人中常用的传动机构有：

- ◆ 齿轮传动
- ◆ 螺旋传动
- ◆ 皮带及链传动
- ◆ 流体传动
- ◆ 连杆机构与凸轮传动

(1) 齿轮传动

- 机器人中常用的齿轮传动机构是：
 - 行星齿轮传动机构
 - 谐波传动机构
- 电动机是高转速、小力矩的驱动器，而机器人通常却要求低转速、大力矩，因此，常用行星齿轮机构和谐波传动机构减速器来完成速度和力矩的变换与调节。

(2) 丝杠传动

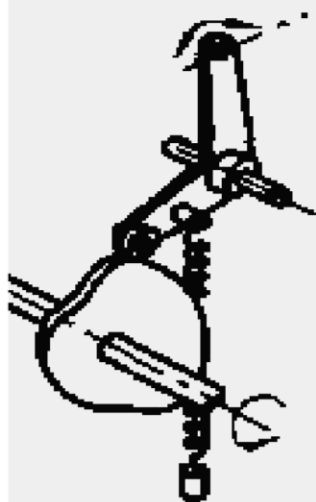
- 丝杠传动有滑动式、滚珠式和静压式等。机器人传动用的丝杠具备结构紧凑、间隙小和传动效率高等特点。

(3) 皮带传动与链传动

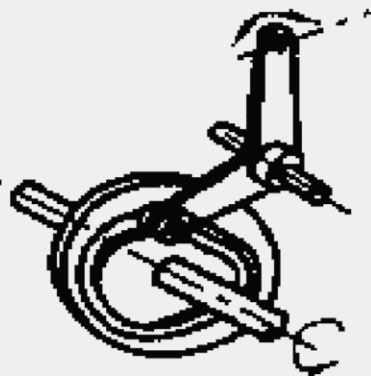
- 皮带和链传动用于传送平行轴之间的回转运动，或把回转运动转换成直线运动。机器人中的皮带和链传动分别通过皮带轮或链轮传递回转运动，有时还用来驱动平行轴之间的小齿轮。

(4) 杆、连杆与凸轮传动

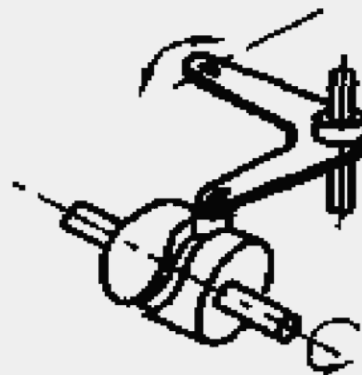
- 重复完成简单动作的搬运机器人(固定程序机器人)中广泛采用杆、连杆与凸轮机构，例如，从某位置抓取物体放在另一位置上的作业。连杆机构的特点是用简单的机构可得到较大的位移，而凸轮机构具有设计灵活、可靠性高和形式多样等特点。外凸轮机构是最常见的机构，它借助于弹簧可得到较好的高速性能。内凸轮驱动时要求有一定的间隙，其高速性能劣于前者。圆柱凸轮用于驱动摆杆，而摆杆在与凸轮回转方向平行的面内摆动。设计凸轮机构时，应选用适应大载荷的凸轮曲线(修正梯形和修正正弦曲线等)。



外凸轮

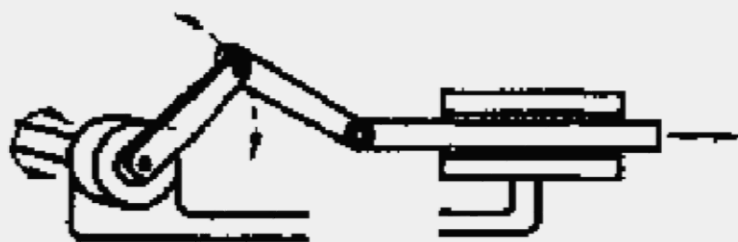


内凸轮

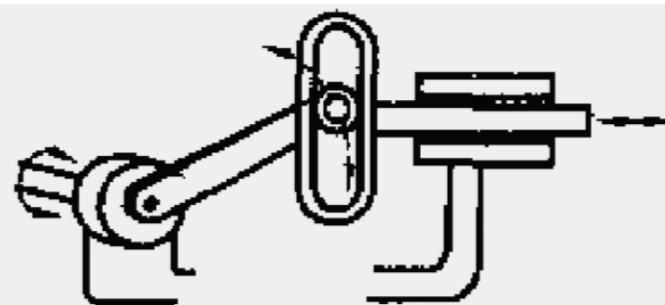


圆柱凸轮

图 2-40 凸轮机构



(a) 曲柄式



(b) 拨叉式

图 2-41 连杆机构

(5) 流体传动

- 流体传动分为液压传动和气压传动。
- 液压传动由液压泵、液压马达或液压缸组成，可得到高扭矩-惯性比。
- 气压传动比其他传动运动精度较差，但由于容易达到高速，多数用在完成简易作业的搬运机器人上。
- 液压、气压传动中，设计成模块化和小型化的机构较易得到应用。

3、行走机构

- 1) 概述

- 分类:

- 行走机构按其行走运动轨迹，可分为：

- 固定轨迹式

- 无固定轨迹式

- 可分为轮式、履带式和步行式。

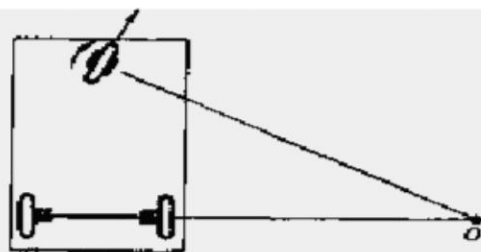
- 它们在行走过程中，前两者与地面为连续接触，后者为间断接触。前两者的形态为运行车式，后者则为人类(或动物)的腿脚式。运行车式行走机构用得比较多，多用于野外作业，比较成熟。步行式行走机构正在发展和完善中。

1) 概述

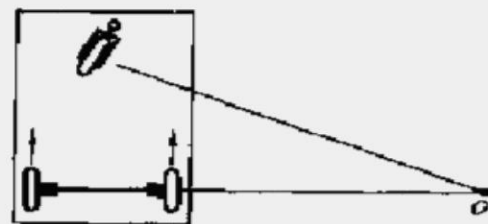
- **组成：**它由行走的驱动装置、传动机构、位置检测元件、传感器、电缆及管路等组成。
- **作用：**它一方面支承机器人的机身、手臂，另一方面还根据工作任务的要求，带动机器人在广阔的空间内运动。
- 一般的机器人多为固定式，但随着海洋科学、原子能工业及宇宙宇宙空间事业的发展，移动机器人、自动行走机器人的应用也越来越多。
- 固定轨道可移动机器人的机身底座，安装在一个可移动的拖扳座上，靠丝杠螺母驱动，整个机器人沿丝杠纵向移动。

2) 车轮式行走机器人

- 车轮式机器人动作稳定，操纵也简单，在无人工厂中，用来搬运零部件或做其他工作，使用得最多。它最适合平地行走。如果不是特殊型号的就不能跨越高度，不能爬楼梯。普通型号的有三个轮、四个轮或六个轮，它们或有驱动轮和自位轮，或有驱动轮和转向机构，用来转弯。

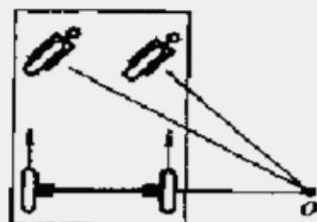


(a) 驱动轮和转向机构

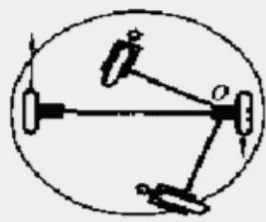


(b) 两个驱动轮和自位轮

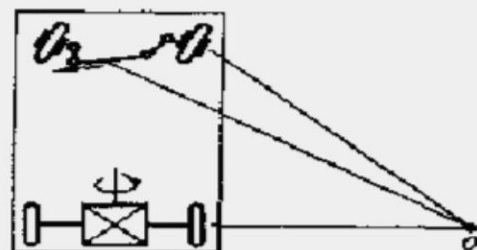
图 2-44 三个轮的行走和转弯机构



(a)

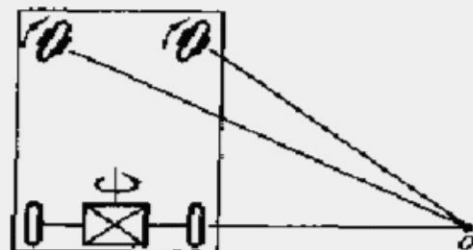


(b)



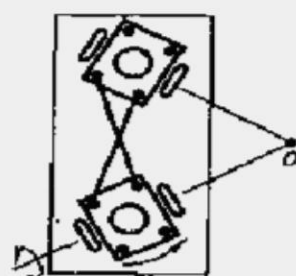
差动齿轮装置

(c)

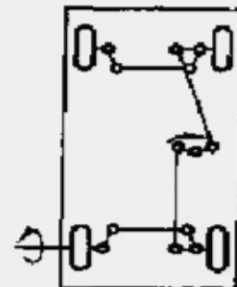


差动齿轮装置

(d)



(e)



(a)两个驱动轮和两个自位轮； (b)两个驱动轮两个自位轮； (c)一个驱动系统和转向轮；
(d)一个驱动系统和两个转向轮； (e)全部轮都装有转向机构，能减少转弯半径

图 2-45 四个轮的行走和转弯机构

- 四个轮子全装有转向机构，任何方向都能行走、转弯，是全方位的移动机器人。（2-46）
- 由于把车轮的接地点设在伞齿轮圆锥面的延长线上，所以转弯和行走是相互独立的，转弯时能高精度地控制移动距离，没有前面说的缺点。作为特殊的车轮，人们提出了各种各样的机构方案。
- 倾斜安装的具有两个驱动轮的行走和转弯机构。如果机器人本体向前倾倒时，车轮的接地点变得比重心更朝前，所以能够稳定站立。（2-47）
- 能上下台阶的机器人，行走时车轮旋转，上下台阶时臂回转。与脚式的移动机构比较，它的特点是行走和上下台阶的控制较容易。（2-48）

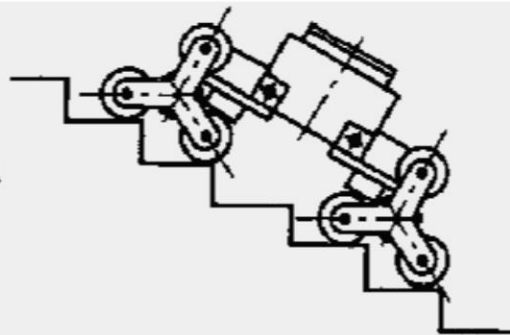
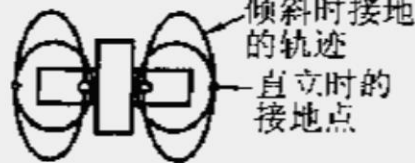


图 2-46 全方位移动机器人

图 2-47 摆动摆线移动机构

图 2-48 转臂式阶梯升降机构

3) 脚式行走机器人

- 脚式行走机器人，即所谓的步行机器人。它的一般特征是不仅能在平地上，而且能在凹凸不平的地上步行，能跨沟越壑，上下台阶，具有广泛的适应性。但要控制它迈步而不倾倒是具有难度的，完全实现上述要求的步行机器人极少。



- 图2—49是模拟人类脚的步行机器人的机构图。实现
对它的控制，使身体的重心经常在接地的脚上，一边
不断取得准静态的平衡，一边稳定地步行。也有人试
验过用自由度较少的其他的两只脚的步行机器人，但
是为了能变换方向和上下台阶，这种机构一定需要有多
的自由度。

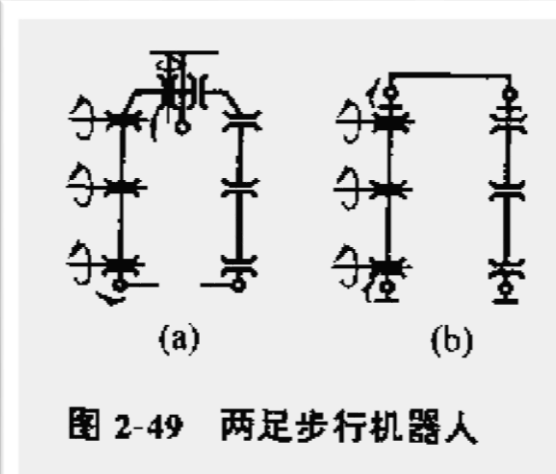
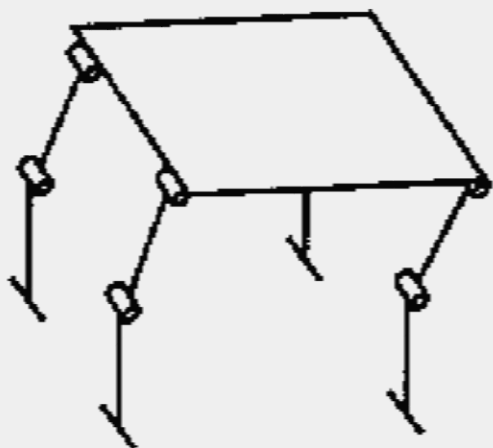


图 2-49 两足步行机器人

- 四只脚的机器人在静止状态下是稳定的，具有一切步行机器人的优点，所以它和六只脚的机器人一样，具有很高的实用性。
- 图2—50 (b)是平移—平移变换的缩放机构，脚尖的位置容易计算，改变步行方向和上下台阶各脚只要有三个自由度就足够了。



(a) 8 自由度加利福尼亚马



(b) 利用缩放机构的脚机构

图 2-50 四脚步行机器人

- 五只脚机器人的例子如图2—53所示。在平地上靠脚尖上的轮子行走，所以不是“步行”机器人，但腿可以伸缩，使脚踏上台阶，能升能降是它具有的特征。六只脚步行机器人的步行控制比四只脚更容易。图2—54所示是空气压力驱动的步行机器人的例子。图2—55所示每个脚有三个自由度，可实现方向的变换。

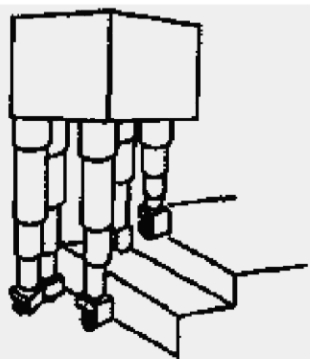


图 2-53 五脚机器人

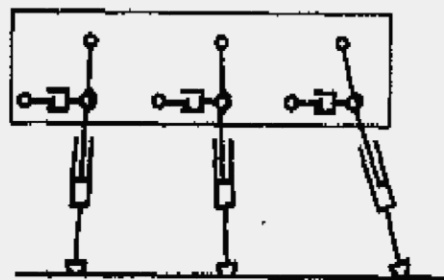


图 2-54 十二个自由度的六脚步行机器人

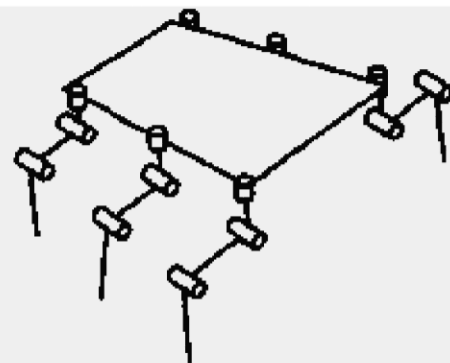


图 2-55 十八个自由度的六脚步行机器人

3) 履带式行走机器人

- 履带式行走具有很大的特点：可以在有些凹凸的地面上行走，可以跨越障碍物，能爬梯度不太高的台阶。它的缺点是由于没有自位轮，没有转向机构，要转弯只能靠左右两个履带的速度差，所以不仅在横向，而且在前进方向也会产生滑动，转弯阻力大，不能准确地确定回转半径等。图2—56所示是装有转向机构的履带式机器人。它没有上述的缺点，可以上下台阶。

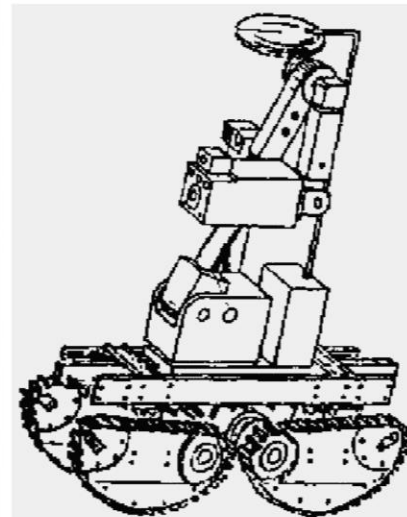


图 2-56 装有转向机构的履带式机器人

- 图 2—57(a)所示的机器人主体前后装有转向器，并装有使转向器绕着图中的A—A旋转提起机构，这使得上下台阶非常顺利，能得到诸如用折叠方式向高处伸臂、在斜面上保持主体水平等各种各样的姿势。(b)的履带形状可以为适应台阶而改变，也比通常履带式的动作更为自如。



4) 其他行走机器人

- 为了特殊的目的，还研制了各种各样的移动机器人机构。图2—58所示是能在壁上爬行的机器人。(a)所示的是用吸盘交互地吸附在壁面上来移动，(b)所示的滚子是磁铁，当然壁面一定是磁性体才行。图2—59所示是车轮和脚并用的机器人，脚端装有球形转动体。除了普通行走之外，可以在管内把脚向上方伸，用管断面上的三个点支持移动，也可以能在管子上沿轴向或圆周方向移动。



5) 行走机构设计应注意的问题

- (1) 平稳性：平稳性是行走机构设计首先要考虑的问题，不但要求在行走时保持平衡，而且在静止时也要保持平衡。
- (2) 灵活性、转向、越障、爬坡：行走机构要求具有人的一些智能，比如辨向、转向、越障、爬坡等智能。

4、机身设计

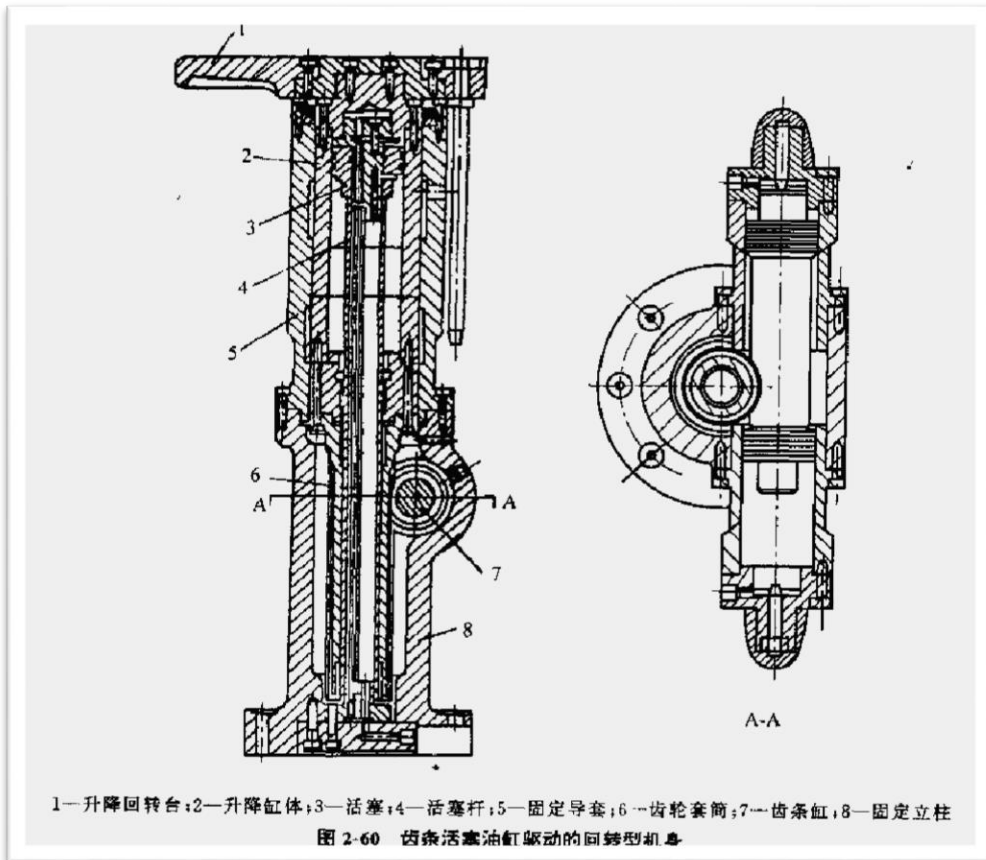
- 机器人机械结构有三大部分：机身、手臂(包括手腕)、手部。
- 机身，又称为立柱，是支撑臂部的部件，并能实现手臂的升降、回转或俯仰运动。机器人必须有一个便于安装的基础件，这就是机器人的机座。机座往往与机身做成一体。

1) 机身的典型结构

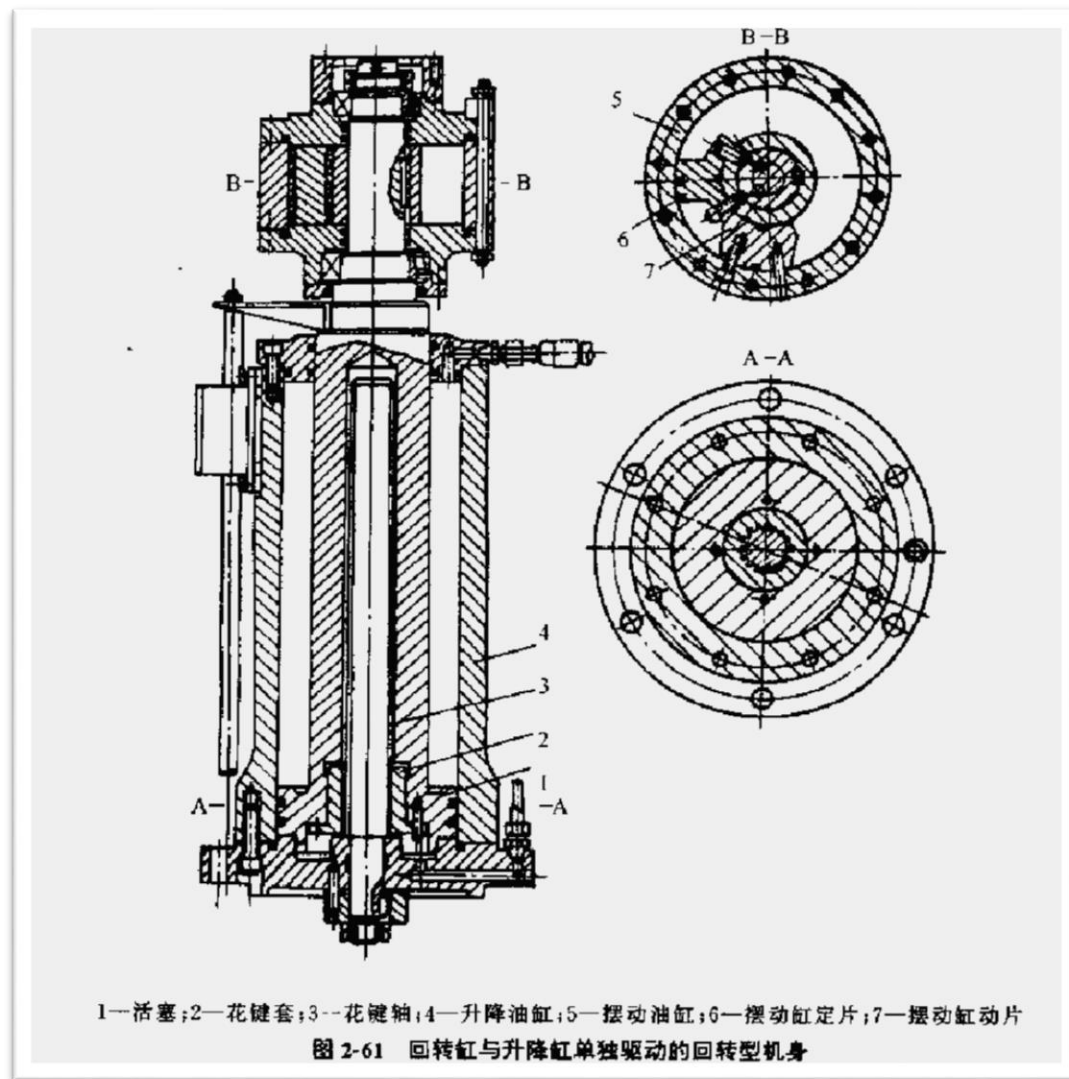
- 采用哪一种自由度形式由机器人的总体设计来定。
- 比如，圆柱坐标式机器人把回转与升降二个自由度归属于机身；球坐标式机器人把回转与俯仰二个自由度归属机身；关节坐标式机器人把回转自由度归属于机身；直角坐标式机器人有时把升降 z 轴或水平移动 X 轴的自由度归属于机身。

(1) 回转与升降机身

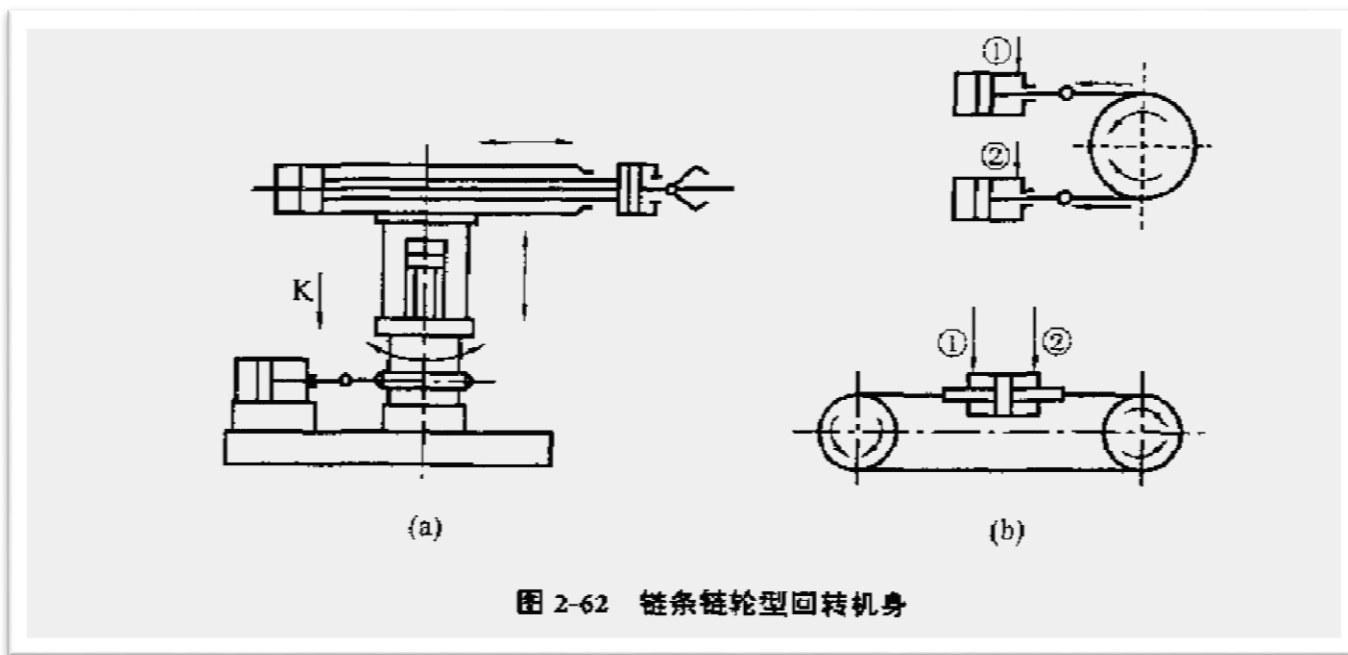
- ①齿条活塞油缸驱动的回转型机身。图所示结构中，活塞杆4是空心的，内装油管。当齿条工作时，回转齿轮6带动升降缸体2、升降回转台1及手臂一起回转。



②回转缸与升降缸单独驱动的回转型机身，如图所示。升降油缸在下，回转油缸在上。升降运动由活塞1驱动，靠升降活塞杆内花键套2导向。回转运动靠摆动油缸5驱动。因摆动缸安置在升降活塞杆的上方，故活塞杆尺寸要加大。

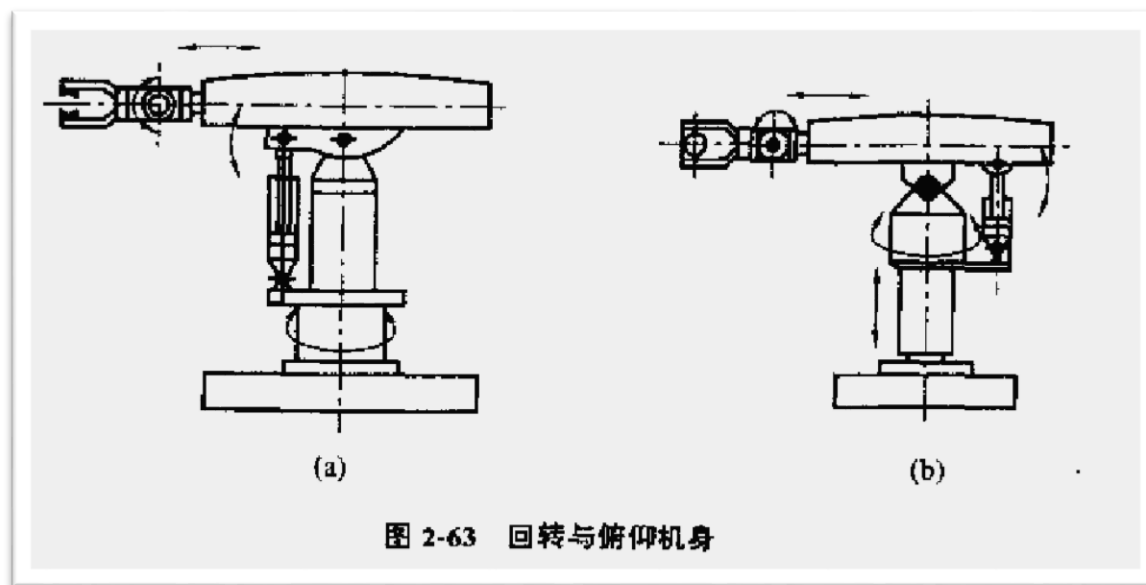


③链轮传动机构。链条链轮传动是将链条的直线运动变为链轮的回转运动，它的回转角度可大于 360° 。图 (a) 所示为气动机器人采用活塞汽缸和链条链轮传动机构，以实现机身的回转运动(K向视图为图 (b)的上图)。此外，也有用双杆活塞汽缸驱动链轮回转的方式。



(2) 回转与俯仰机身

- 机器人手臂的俯仰运动，一般采用活塞油(汽)缸与连杆机构来实现。手臂俯仰运动用的活塞缸位于手臂的下方，其活塞杆和手臂用铰链连接较好，缸体采用尾部耳环或中部销轴等方式与立柱连接，如图所示。



(3) 机身设计要注意的问题

- (1)刚度和强度大，稳定性要好。
- (2)运动灵活，导套不宜过短，避免卡死。
- (3)驱动方式适宜。
- (4)结构布置合理。

5、臂部设计

臂部是支撑腕部和手部，用来改变手部在空间中位置的部件。臂部的主要运动有伸缩、回转、升降或俯仰。

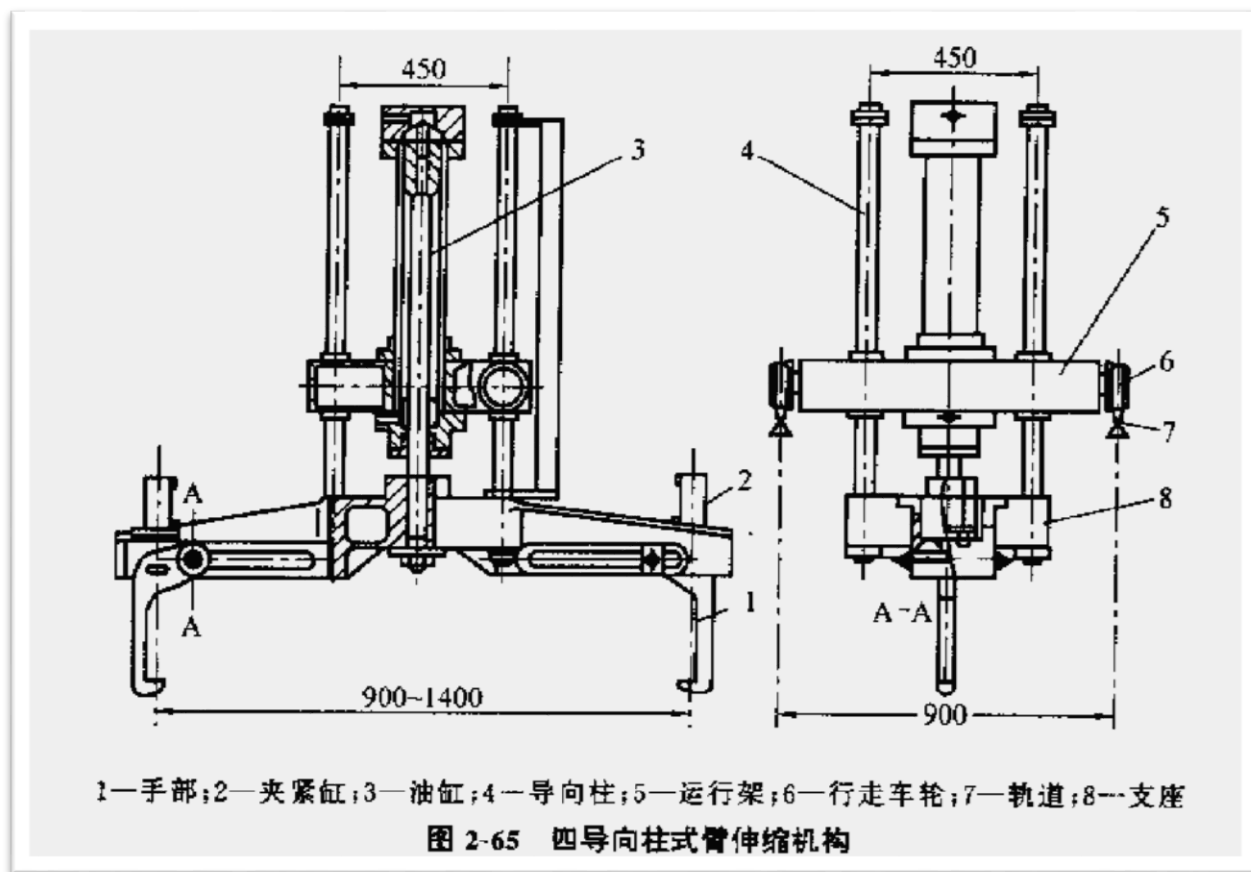
1) 臂部设计的基本要求

臂部的结构形式必须根据机器人的运动形式、抓取重量、动作自由度、运动精度等因素来确定。同时，设计时必须考虑到手臂的受力情况，油(汽)缸及导向装置的布置，内部管路与手腕的连接形式等因素。

2) 臂部的典型机构

- (1)臂部伸缩机构
- 行程小时，采用油(汽)缸直接驱动；当行程较大时，可采用油(汽)缸驱动齿条传动的倍增机构或采用步进电机或伺服电机驱动，也可采用丝杠螺母或滚珠丝杠传动。为了增加手臂的刚性，防止手臂在伸缩运动时绕轴线转动或产生变形，手臂的伸缩机构需设置导向装置，或设计方形、花键等形式的臂杆。常用的导向装置有单导向杆和双导向杆等，可根据手臂的结构、抓重等因素选取。

- 如图所示，为采用四根导向柱的臂伸缩结构。手臂的垂直伸缩运动由油缸3驱动。其特点是行程长，抓重大。工件形状不规则时，为了防止产生较大的偏重力矩，采用四根导向柱。这种结构多用于箱体加工线上。

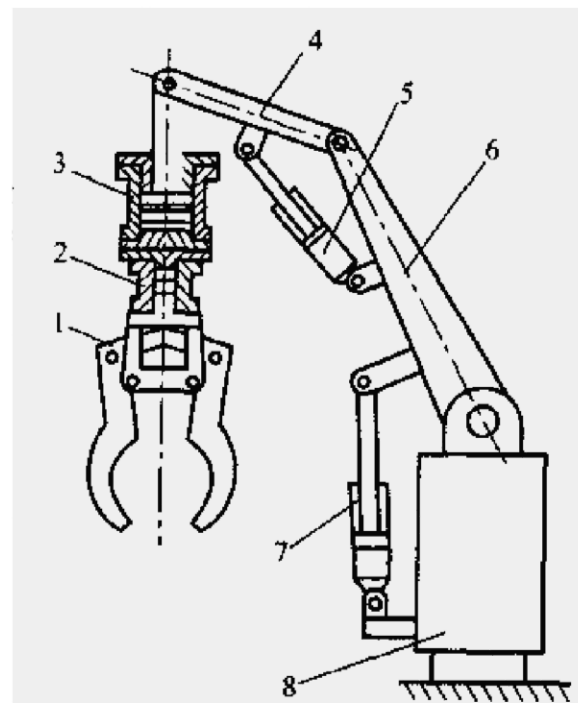


● (2)手臂俯仰运动机构

- 通常采用摆臂油(汽)缸驱动、铰链连杆机构传动来实现手臂的俯仰，如图所示。

● (3)手臂回转与升降机构

- 手臂回转与升降机构通常是通过臂部相对于立柱的运动机构来实现。常采用回转缸与升降缸单独驱动，适用于升降行程短而回转角度小于 360° 的情况，也有采用升降缸与气马达一锥齿轮传动的结构。



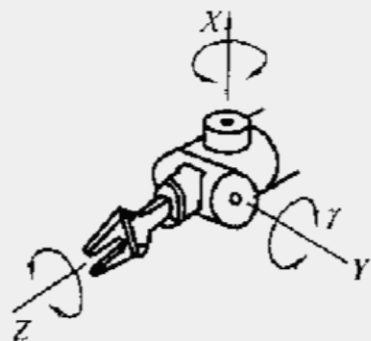
1—手部；2—夹紧缸；3—升降缸；4—小臂
2,5,7—摆动缸，6—大臂，8—立柱，

图 2-66 摆动缸驱动连杆俯仰臂机构

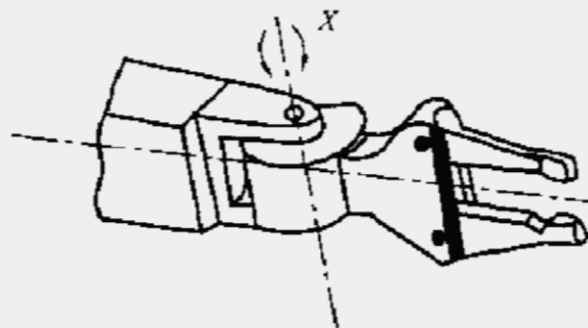
6、手腕设计

1) 手腕的自由度和设计时应注意的问题

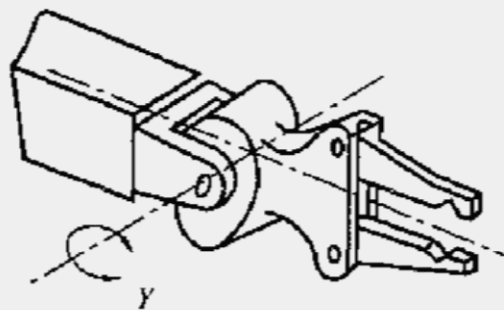
- 腕部是臂部与手部的连接部件，起支承手部和改变手部姿态的作用。为了使手部能处于空间任意方向，要求腕部能实现对空间X,Y,Z三个坐标轴的转动，即具有偏转、俯仰和回转三个自由度，如图2—67所示。通常也把手腕的偏转叫做Yaw，用Y表示；把手腕的俯仰叫做Pitch，用P表示；把手腕的回转叫做Roll，用R表示。手腕的坐标系和自由度见图。



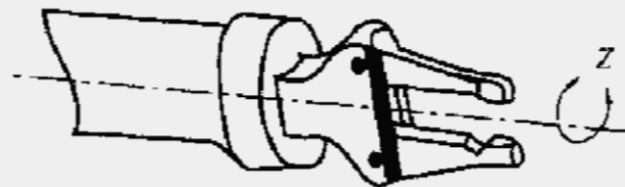
(a)



(b)



(c)



(d)

(a)腕部坐标系;(b)手腕的偏转;(c)手腕的俯仰;(d)手腕的回转

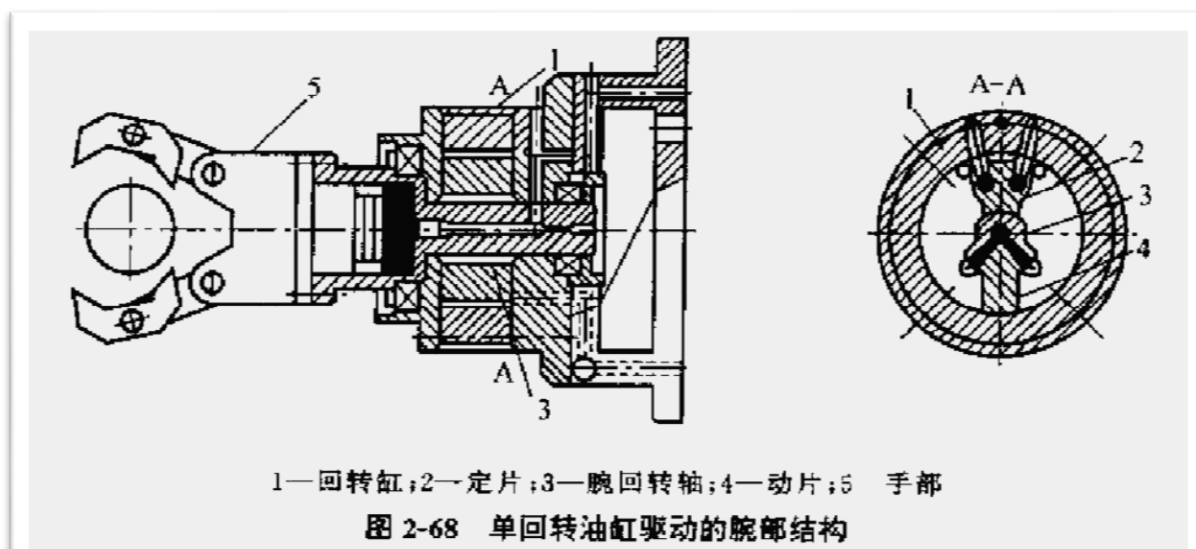
图 2-67 手腕的坐标系和自由度

- 手腕按自由度个数可分单自由度手腕，二自由度手腕和三自由度手腕。采用几个自由度的手腕应根据机器人的工作性能来确定。在有些情况下，腕部具有二个自由度：回转和俯仰或回转和偏转。一些专用机械手甚至没有腕部，但有的腕部为了特殊要求还有横向移动的自由度。设计腕部时一般要注意以下问题：
 - ①结构紧凑、重量轻。
 - ②动作灵活、平稳，定位精度高。
 - ③强度、刚度高。
 - ④设计合理的与臂和手部的连接部位以及传感器和驱动装置的布局 and 安装。

2) 腕部的典型结构

(1) 单自由度回转运动手腕

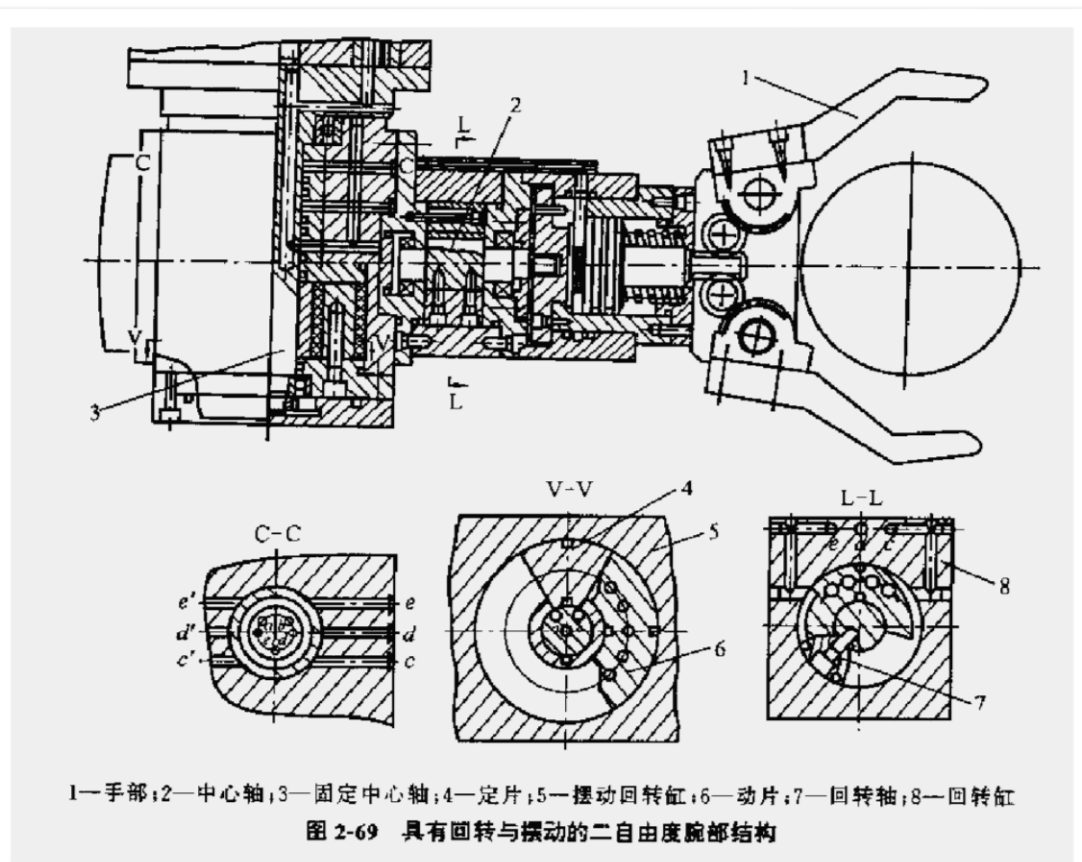
- 用回转油缸和汽缸直接驱动实现腕部回转运动。图所示是采用回转油缸直接驱动的单自由度腕部结构。这种手腕具有结构紧凑。体积小、运动灵活、响应快、精度高等特点，但回转角度受限制，一般小于 270° 。



(2) 二自由度手腕

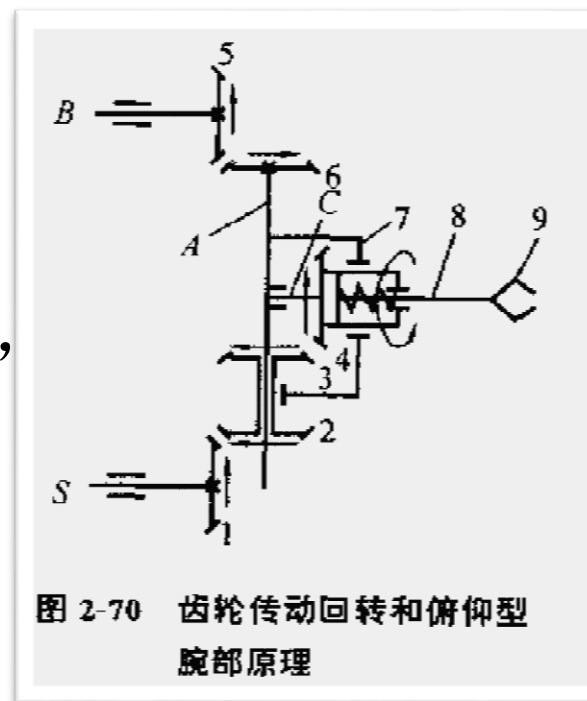
① 双回转油缸驱动的腕部

- 图所示是采用两个轴线互相垂直的回转油缸的腕部结构。
v—v剖面为腕部摆动回转油缸，工作时，动片6带动摆动回转油缸，使整个腕部绕固定中心轴3摆动。L—L剖面为腕部回转油缸，工作时，动片7带动回转中心轴2，实现腕部的回转运动。



② 齿轮传动二自由度腕部

- 图所示为采用齿轮传动机构实现手腕回转和俯仰的二自由度手腕。手腕的回转运动由传动轴S传递，轴S驱动锥齿轮1回转，并带动锥齿轮2，3，4转动，因手腕与锥齿轮4为一体；从而实现手部绕C轴的回转运动。手腕的俯仰由传动轴B传递，轴B驱动锥齿轮5回转，并带动锥齿轮6绕A轴回转，因手腕的壳体7与传动轴A用销子连接为一体，从而实现手腕的俯仰运动。



3) 三自由度手腕

① 液压直接驱动三自由度手腕

- 图所示是液压马达直接驱动的具有偏转、俯仰和回转三个自由度的手腕结构示意图。这种直接驱动手腕的关键是能否设计和加工出尺寸小、重量轻而驱动力矩大、驱动特性好的驱动电机或液压驱动马达。

② 齿轮链轮传动三自由度碗部

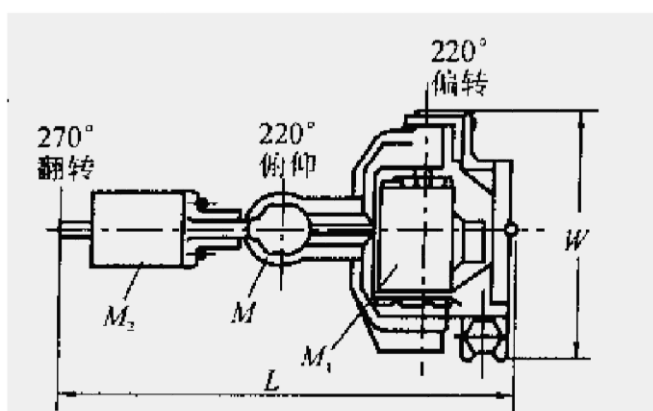
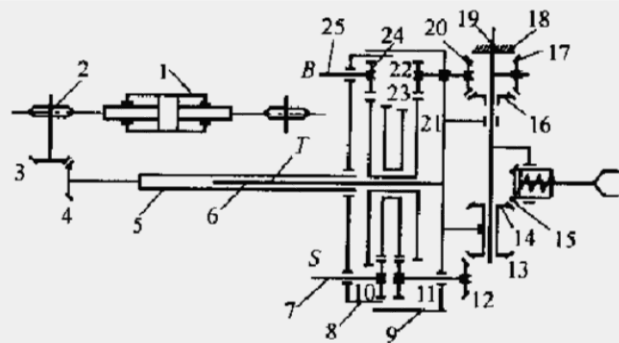


图 2-71 液压直接驱动三自由度手腕



1—油缸；2—链轮；3、4—锥齿轮；5、6—花键轴 T；7—传动轴 S；8—腕架；9—行星架；10、11、22、24—圆柱齿轮；12、13、14、15、16、17、18、20—锥齿轮；19—摆轴；21、23—双联圆柱齿轮；25—传动轴 B

图 2-72 齿轮链轮传动三自由度手腕原理图

7、手部设计

- 1) 机器人手部的功能
- 机器人手也叫末端操作器，相当于人的手爪。主要作用是夹持工件或让工具按照规定的程序完成指定的工作。手爪用于抓取物体，并进行细微操作。人的五指有二十个自由度，通过手指关节的伸曲，可以进行各种复杂的动作，进行使用剪刀、筷子之类的灵巧操作。人类抓取物体的动作大致可分捏、握和夹三大类。不同的抓取方式决定于手爪的结构和自由度。
- 手爪亦称抓取机构，通常是由手指、传动机构和驱动机构组成，应根据抓取对象和工作条件进行设计。除了具有足够的夹持力外，还要保持适当的精度，手指应能顺应被抓对象的形状。

1) 机器人手部的功能

- 手爪自身的大小、形状、结构和自由度是机械结构设计要点，要根据作业对象的大小、形状和位姿等几何条件，以及重量、硬度等物理条件来综合考虑。同时还要考虑手爪与被抓物体接触后产生的约束和自由度等问题。智能手爪还装有相应的传感器(触觉或力传感器等)，能感知手爪与物体的接触状态、物体表面状况和夹持力大小等。因此，手部设计的主要研究方向是柔性化、标准化、智能化。

2) 手部的分类及工作原理

- 手部按夹持原理分手指式和吸盘式，手指式和吸盘式按不同的方式又可进行分类。

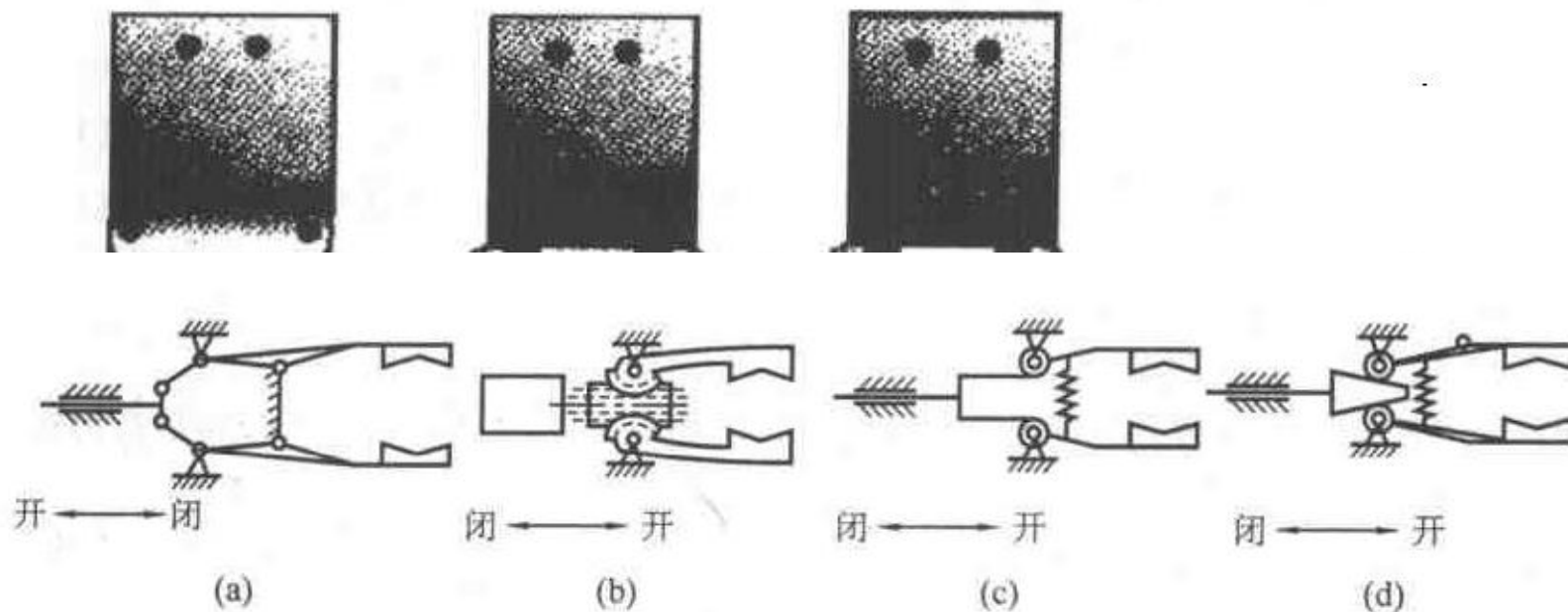


图 2-76 回转型手爪传动机构

图 2-75 不同夹持方式的手爪

• (1) 手指式手爪

- 手指式手爪按夹持方式分外夹式、内撑式、内外夹持式。按手指的运动形式可分为回转型、平动型和平移型。
- ①回转型。当手爪夹紧和松开物体时，手指作回转运动。当被抓物体的直径大小变化时，需要调整手爪的位置才能保持物体的中心位置不变。
- ②平动型。手指由平行四杆机构传动，当手爪夹紧和松开物体时，手指姿态不变，作平动。和回转型手爪一样，夹持中心随被夹物体直径的大小而变。
- ③平移型。当手爪夹紧和松开工件时，手指作平移运动，并保持夹持中心固定不变，不受工件直径变化的影响。

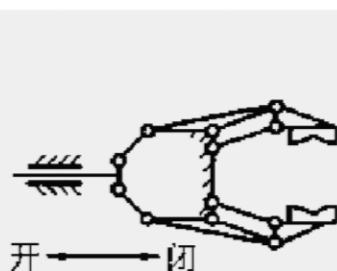
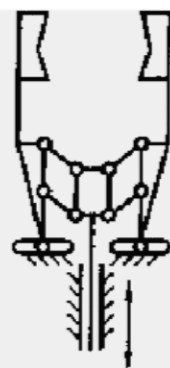
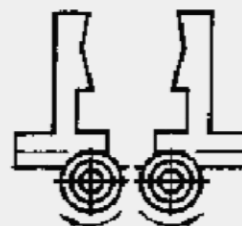


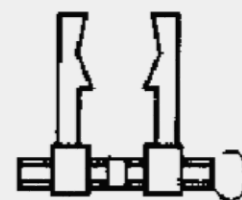
图 2-77 平动型手爪机构



(a)



(b)



(c)

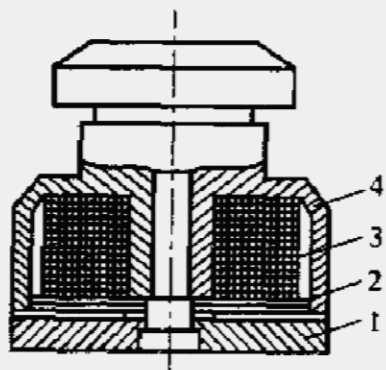
图 2-78 平移型手爪机构

设计手指式手部应注意的问题：

- ①设计合适的开闭距离或角度，以便抓取和松开工件。
- ②足够的夹紧力，保证可靠、安全地抓持和运送工件。
- ③能保证工件在手指内准确定位。
- ④尽可能使结构紧凑、重量轻。
- ⑤考虑通用性和可调整性。
- ⑥考虑对环境的适应性，如耐高温、耐腐蚀、耐冲击等。

2) 吸盘式手部

- 吸盘式手部是靠吸盘所产生的吸力来夹持工件，适用于吸持板状工件及曲形壳体类工件。可分为磁力吸盘和空气负压吸盘。



1—磁盘 2—防尘盖 3—线圈 4—外壳体

图 2-81 电磁吸盘结构

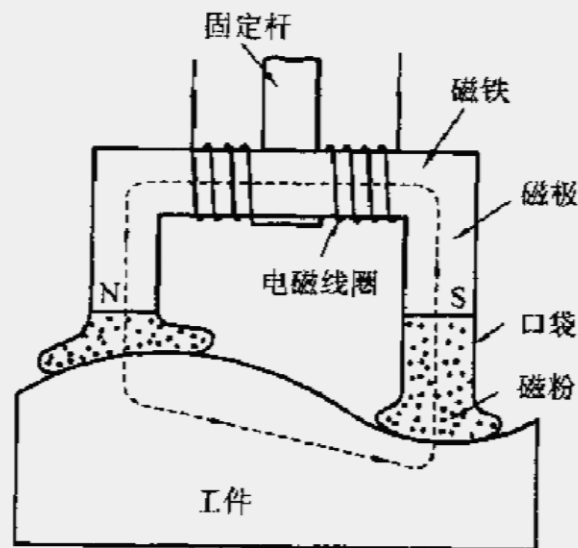


图 2-82 磁粉异形吸盘原理示意图

● 空气负压吸盘

- 空气负压吸盘主要用于搬运体积大、重量轻的零件，如冰箱壳体、汽车壳体，也广泛用在需要小心搬运的如显像管、平板玻璃等物件。空气负压吸盘按产生负压的方法不同，有真空式、喷气式和挤气式。

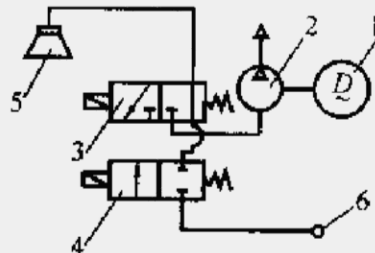


图 2-83 真空吸盘控制系统

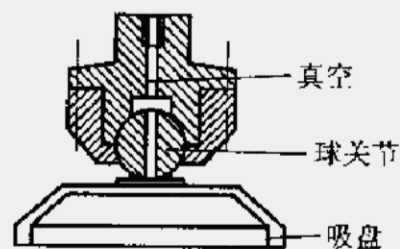


图 2-84 自适应吸盘



图 2-85 异形吸盘

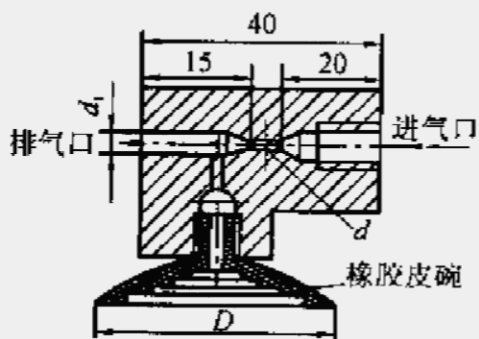


图 2-86 喷气式吸盘

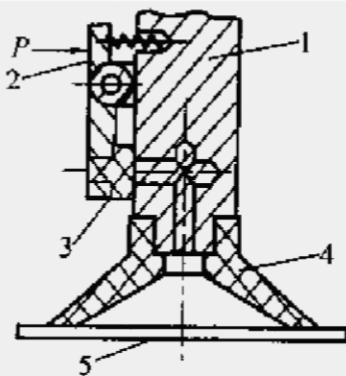


图 2-87 挤气式吸盘

课程作业

- 1、试述机器人的基本组成？
- 2、试述机器人的发展趋势？