

第3章 智能机器人的感知系统

智能机器人的感知系统相当于人的五官和神经系统,是机器人获取外部环境信息及进行内部反馈控制的工具。感知系统将机器人各种内部状态信息和环境信息从信号转变为机器人自身或机器人之间能够理解和应用的数据、信息甚至知识,它与机器人控制系统和决策系统组成机器人的核心。环境感知是智能机器人最基本的一种能力,感知能力的高低决定了一个智能机器人的智能性。

3.1 感知系统体系结构

机器人感知系统本质是一个传感器系统。机器人感知系统的构建包括系统需求分析、环境建模、传感器的选择等。

人、机器人与在环境中的感知行为都可以按照复杂度分为以下几个等级。

(1) 反射式感知。反射式感知根据当前传感器的激励而直接引导执行器的本能响应,如人体的膝跳反射、智能机器人的简单避障行为;反射式感知不需要知识记忆。

(2) 信息融合感知。需要短期的知识记忆来综合传感器的信息,以得到外界复杂环境的局部印象。

(3) 可学习感知。能够从当前信息与历史信息中提取知识,更新对环境的认知。

(4) 自主认知。不仅仅依赖传感器的刺激和历史经验,也依赖于当前执行的任务与追求的目标;能够根据当前的任务,采用柔性的行为实施复杂的认知行动。例如,蜜蜂可以通过舞蹈来表达食物所处的方位。

可见,环境感知的更高层次是能够进行空间知识的语言描述与语言交流,感知功能模块的灵活组合以及合理的传感响应体系是实现认知行为的功能平台。

机器人感知系统的研究也逐步从片面的、离散的、被动的感知层次上升到全局的、关联的、主动的认知层次上。

3.1.1 感知系统的组成

要使机器人拥有智能,并对环境变化做出反应。首先,必须使机器人具有感知环境的能力,用传感器采集信息,是机器人智能化的第一步;其次,采取适当的方法,将多个传感器获取的环境信息加以综合处理,控制机器人进行智能作业,则是提高机器人智能程度的重要体现。



图 3.1 给出了智能机器人的传感器分布。传感器为机器人智能作业提供决策依据,是机器人的重要组成部分。

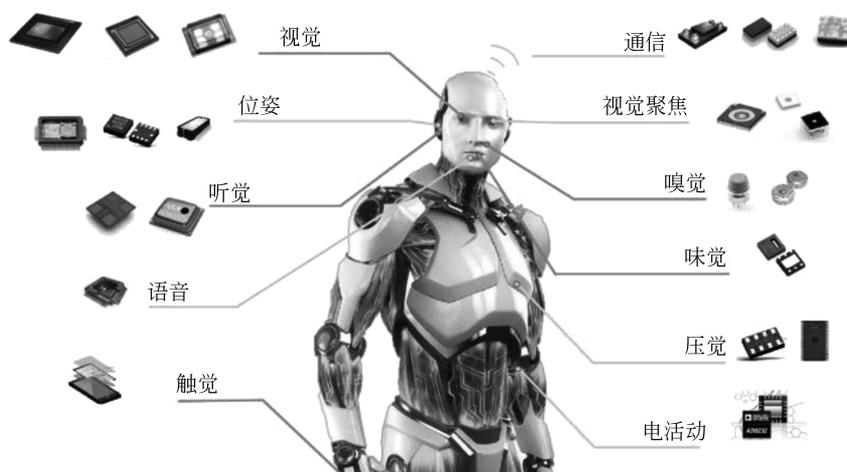


图 3.1 感知系统的组成

1. 视觉

视觉是获取信息最直观的方式,人类 75% 以上的信息都来自视觉。同样,视觉系统是机器人感知系统的重要组成部分之一。视觉一般包括 3 个过程: 图像获取、图像处理和图像理解。

2. 触觉

机器人触觉传感系统不可能实现人体全部的触觉功能。机器人触觉的研究集中在扩展机器人能力所必需的触觉功能上。一般地,把检测感知和外部直接接触而产生的接触、压力、滑觉的传感器称为机器人触觉传感器。

机器人力觉传感器用来检测机器人自身力与外部环境力之间的相互作用力。就安装部位来讲,可以分为关节力传感器、腕力传感器和指力传感器。

3. 听觉

听觉是仅次于视觉的重要感觉通道,在人的生活中起重要作用。机器人拥有听觉,使得机器人能够与人进行自然的人机对话,听从人的指挥。达到这一目标的决定性技术是语音技术,它包括语音识别和合成技术两方面。

4. 嗅觉

气味是物质的外部特征之一。机器人嗅觉系统通常由交叉敏感的化学传感器阵列和适当的模式识别算法组成,可用于检测、分析和鉴别各种气味。

5. 味觉

海洋资源勘探机器人、食品分析机器人、烹调机器人等需要用味觉传感器进行液体成分的分析。

6. 接近觉

接近觉传感器介于触觉传感器和视觉传感器之间,不仅可以测量距离和方位,而且可以融合视觉和触觉传感器的信息。接近觉传感器可以辅助视觉系统的功能,判断对象物体的方位和外形,同时识别其表面形状。因此,准确抓取部件,对机器人接近觉传感器的精度要



求较高。

表 3.1 为按照功能对传感器进行的总结分类。

表 3.1 按照功能对传感器进行的总结分类

功 能	传 感 器	方 式
接触的有无	接触传感器	单点型、分布型
力的法线分量	压觉传感器	单点型、高密度集成型、分布型
剪切力接触状态变化	滑觉传感器	点接触型、线接触型、面接触型
力、力矩、力和力矩	力觉传感器、力矩传感器、力和力矩传感器	模块型、单元型
近距离的接近程度	接近觉传感器	空气式、电磁场式、电气式、光学式、声波式
距离	距离传感器	光学式(反射光量、反射时间、相位信息), 声波式(反射音量、反射时间)
倾斜角、旋转角、摆动角、摆动幅度	角度传感器(平衡觉)	旋转型、振子型、振动型
方向(合成加速度、作用力的方向)	方向传感器	万向节型、球内转动球型
姿势	姿势传感器	机械陀螺仪、光学陀螺仪、气体陀螺仪
特定物体的建模、轮廓形状的识别	视觉传感器(主动视觉)	光学式(照射光的形状为点、线、圆、螺旋线等)
作业环境识别、异常的检测	视觉传感器(被动式)	光学式、声波式

3.1.2 感知系统的分布

1. 内传感器与外传感器

1) 内传感器

内传感器通常用来确定机器人在其自身坐标系内的姿态位置, 是完成智能机器人运动所必需的传感器。表 3.2 为内传感器按照检测内容的分类。

表 3.2 内传感器按照检测内容的分类

检 测 内 容	传感器的方式和种类
倾斜(平衡)	静电容式、导电式、铅垂振子式、浮动磁铁式、滚动球式
方位	陀螺仪式、地磁铁式、浮动磁铁式
温度	热敏电阻、热电偶、光纤式
接触或滑动	机械式、导电橡胶式、滚子式、探针式
特定的位置或角度	限位开关、微动开关、接触式开关、光电开关
任意位置或角度	板弹簧式、电位计、直线编码器、旋转编码器
速度	陀螺仪
角速度	内置微分电路的编码器
加速度	应变仪式、伺服式
角加速度	压电式、振动式、光相位差式



2) 外传感器

外传感器用于机器人本身相对其周围环境的定位,负责检测距离、接近程度和接触程度之类的变量,便于机器人的引导及物体的识别和处理。按照机器人作业的内容,外传感器通常安装在机器人的头部、肩部、腕部、臀部、腿部、足部等。

2. 多传感器信息融合

多传感器信息融合技术,是通过对这些传感器及其观测信息的合理支配和使用,把多个传感器在时间和空间上的冗余或互补信息依据某种准则进行组合,以获取被观测对象的一致性解释或描述。

为获取较好的感知效果,智能机器人的多传感器有着不同的分布形式。

(1) 水平静态连接:传感器分布在同一水平面的装配方式。一般用于多个同一类型传感器互相配合的场合,传感器具有零自由度。

(2) 非水平静态连接:传感器不在同一水平面上分布。多种不同类型、不同特点的传感器常常采用这种方式,传感器具有零自由度。

(3) 水平动态连接:传感器分布在同一个水平面,且至少具有一个自由度。一般用于多个同一类型传感器互相配合的场合。

(4) 非水平动态连接:传感器不在同一水平面分布,且至少具有一个自由度。多种不同类型、不同特点的传感器常常采用这种方式。

(5) 动态与静态混合连接:多个传感器既有静态连接又存在动态连接,是动静结合的连接方式。

3. 无线传感器网络

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳的、自组织的网络系统。无线传感器网络显著地扩展了智能机器人的感知空间,提高了智能机器人的感知能力,为智能机器人的智能开发、机器人间的合作与协调,以及机器人应用范围的拓展提供了可能性。

另外,由于智能机器人具有机动灵活和自治能力强等优点,将其作为无线传感器网络的节点,可以方便地改变无线传感器网络的拓扑结构,改善网络的动态性能。因此,无线传感器网络和机器人技术相结合可以有效地改善和提高系统的整体性能,是智能机器人与传感器网络发展的必然趋势。

3.2 距离/位置测量

机器人测距系统主要实现如下功能。

- (1) 实时地检测自身所处空间的位置,进行自定位。
- (2) 实时地检测障碍物的距离和方向,为行动决策提供依据。
- (3) 检测目标姿态以及进行简单形体的识别,用于导航及目标跟踪。

如图 3.2 所示,非接触测定空间距离的方法大体可以按以下几种角度分类。

- (1) 根据测量的介质,可以分为超声波传感器和激光或红外线等光学距离传感器。
- (2) 根据测量方式,可以分为主动型(向被测对象物体主动照射超声波或光线)和被动

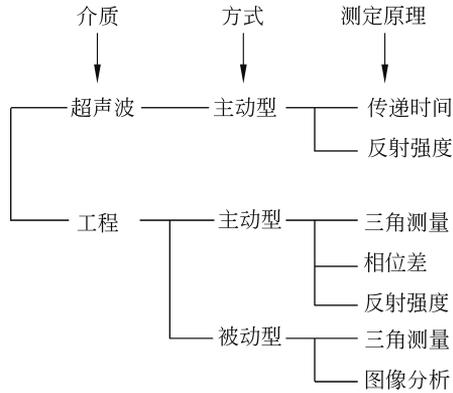


图 3.2 传感器的分类

型(不向对象物体照射光线,仅依据发自对象物体的光线)。主动型依据的测量原理有 3 类:基于三角测量原理的方法、调制光相位差的方法、基于反射光强度的方法。被动型依据的测量原理有两类:基于多个摄像机的立体视觉三角测量法、基于单个摄像机获得的单张图像加以分析,得到距离信息的方法。

3.2.1 声呐测距

由于测距声呐信息处理简单,速度快,价格低,被广泛用作智能机器人的测距传感器,以实现避障、定位、环境建模和导航等功能。

1. 基本原理

超声波是频率高于 20kHz 的声波,它方向性好,穿透能力强,易于获得较集中的声能。脉冲回波法通过测量超声波经反射到达接收传感器的时间和发射时间之差来实现机器人与障碍物之间的测距,也叫渡越时间法。该方法简单实用,应用广泛,其原理如图 3.3 所示。

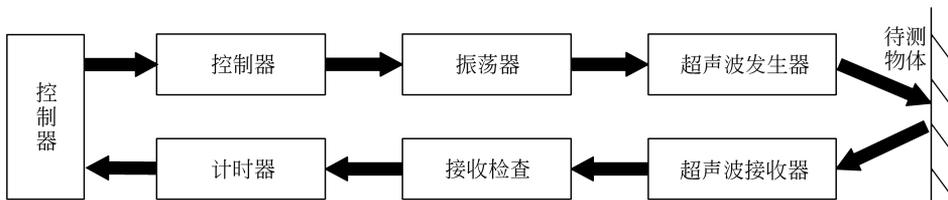


图 3.3 脉冲回波测距原理图

发射传感器向空气中发射超声波脉冲,声波脉冲遇到被测物体反射回来,由接收传感器检测回波信号。若测出第一个回波达到的时间与发射脉冲间的时间差为 t ,即可算得传感器与反射点间的距离 s ,即

$$s = \frac{c}{2}t \quad (3.1)$$

式中, c 为材料中的声速, t 为声波的往返传播时间。

脉冲回波方法仅需要一个超声波换能器来完成发射和接收功能,但同时收发的测量方式又导致了“死区”的存在。因为距离太近,传感器无法分辨发射波束与反射波束。通常,脉冲回波模式超声波测距系统不能测量小于几厘米的范围。



超声波还有回波衰减、折射等缺点。超声波阵列测量还有交叉感应(A传感器的发射回波被B传感器接收到),扫描频率低(一般不超过100Hz,轮询扫描式不超过10Hz)等问题。

2. 典型器件

(1) 图3.4为Polaroid 600系列端面型测距声呐,是目前民用领域性能最好、适合机器人使用的测距声呐。发散角为 15° ,有效距离为10m,精度可达1%。该传感器已集成化,与MCU的接口较为简单,操作容易,性能稳定,并有不锈钢的保护罩,可以用于室内或非恶劣的室外环境。

(2) 图3.5为eURM37测距声呐,该声呐是Dream Factory推出的较便宜的产品,具有RS232接口或RS422接口,发散角为 30° ,有效距离为5m,精度可达1%。



图 3.4 Polaroid 600 系列端面型测距声呐



图 3.5 eURM37 测距声呐

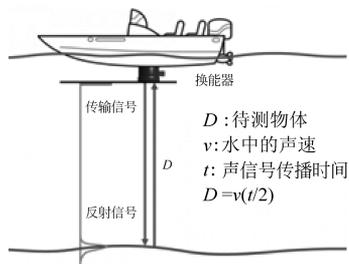
3. 测距声呐系统实例

图3.6(a)是SeaRobotix水下机器人机身上的测距声呐P30。P30是一种非单波束回声测深仪,可在水下的测量范围长达50m,工作深度可达300m,具有0.5%的量程范围解析度、 30° 的波束角宽度和厘米级的精度数据。

图3.6(b)是P30的测距原理图,P30通过换能器发射115kHz脉冲,然后侦听并测量返回的声能强度。声波在水中传播时固体物体会反射或反射回,然后传播回P30。



(a) 水下机器人和测距声呐实物图



(b) 测距原理图

图 3.6 水下机器人和测距声呐

3.2.2 红外测距

红外辐射俗称红外线,是一种不可见光,其波长范围为 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 。工程上把红外线所占据的波段分为4部分,即近红外、中红外、远红外和极远红外。

红外传感系统按照功能分成以下5类。

(1) 辐射计,用于辐射和光谱测量。



(2) 搜索和跟踪系统,用于搜索和跟踪红外目标,确定其空间位置,并对它的运动进行跟踪。

(3) 热成像系统,可产生整个目标红外辐射的分布图像。

(4) 红外测距和通信系统。

(5) 混合系统,是指以上各类系统中的两个或多个的组合。

1. 基本原理

红外传感器一般采用反射光强法进行测量,即目标物对发光二极管散射光的反射光强度进行测量。红外传感器包括一个可以发射红外光的固态二极管和一个用作接收器的固态光敏二极管或三极管。当光强超过一定程度时,光敏三极管就会导通,否则截止。发光二极管和光敏三极管需汇聚在同一面上,这样反射光才能被接收器收到。

光的反射系数与目标物的表面颜色、粗糙度等有关。目标物颜色较深、接近黑色或透明时,其反射光很弱。若以输出信号达到其一阈值作为“接近”时,则对不同的目标物体“接近”的距离是不同的。因此,机器人可利用红外的返回信号来识别周围环境的变化,但它作为距离的测量并不精确。

2. 典型器件

日本夏普公司推出的一系列体积(手指大小)小、质量(小于 10g)轻、接口简单的红外测距传感器(infrared range finder),是用于微型机器人测距的不错选择。GP2D12 是该系列传感器中的典型产品,夏普 GP2D12 红外测距传感器的实物和工作原理如图 3.7 所示。

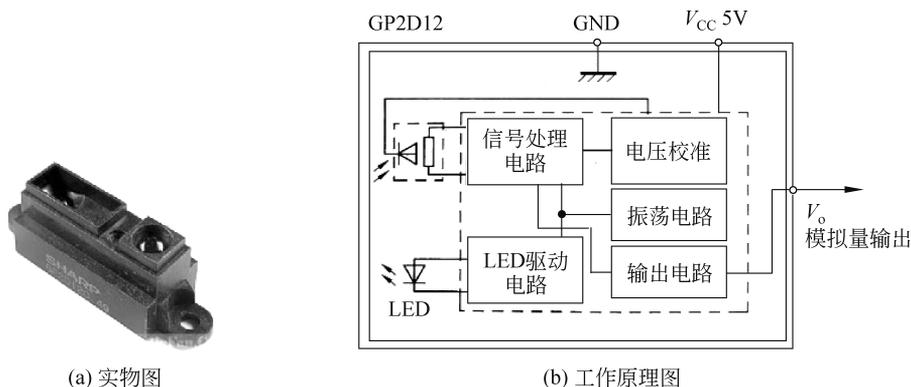


图 3.7 红外测距传感器

GP2D12 的输出为 0~5V 模拟量(电压值随距离变化);量程范围为 10~80cm,接口类型为 3 针(电压输出、地、电源)。这些作为大多数微型智能机器人的避碰和漫游测距传感器指标都足够了。另外,GP2D12 还可以检测机器人的各关节位置、姿态等。

3.2.3 激光扫描测距

声呐测距的问题在于:距离有限,对于尺寸较大的环境,无法探测到四周;多次反射带来的串扰严重影响测量的精度。而红外测距传感器所能测量的有效距离非常有限。

激光扫描测距传感器(激光雷达)的测量范围广、精度高、扫描频率高,是非常理想的测距传感器。



1. 基本原理

1) 三角法

如图 3.8 所示,扫描运动位于由物体到检测器和由检测器到激光发射器两直线所确定的平面内,检测器聚焦在表面很小的一个区域内。因为光源与基线之间的角度 β 和光源与检测器之间的基线距离 B 已知,可根据几何关系求得 $D = B \tan \beta$ 。

通过上述装置对物体进行扫描,只要记录下检测器的位姿轨迹,便可以将这些距离量转换为三维坐标,测量出物体的空间环境。

2) 相位法

如图 3.9(a)所示,波长为 λ 的激光束被一分为二。一束(称为参考光束)经过距离 L 到达相位测量装置,另一束经过距离 d 到达反射表面。反射光束经过的总距离为

$$d' = L + 2d \quad (3.2)$$

如图 3.9(b)所示,若 $d=0$,此时, $d'=L$,参考光束和反射光束同时到达相位测量装置。若 d 增大,反射光束与参考光束间将产生相位移。

$$d' = L + \frac{\theta}{2\pi} \lambda \quad (3.3)$$

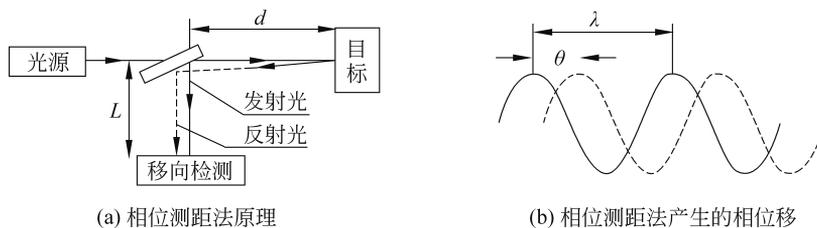


图 3.9 相位测距原理图

若 $\theta = 2k\pi, k=0, 1, \dots, n$, 两个波形将再次对准。因此只根据测得的相位移无法区别反射光束与发射参考光束。因此只有要求 $\theta < 360^\circ$, 才有唯一解。把 $d' = L + 2d$ 代入式(3.3), 可得

$$d = \frac{\theta}{4\pi} \lambda = \frac{\theta}{4\pi} \times \frac{c}{f} \quad (3.4)$$

由于波长已知,故可以用相位移表示距离。激光波长很短,在实际机器人的应用中,用一个波长大得多的波对激光波调幅。调制的激光信号发射到目标,返回光束被解调,然后将它与参考信号比较,即可确定相位移。这样就得到了一种更为实际的波长工作范围。

激光扫描测距传感器安装在可移动的物体上,每隔一定时间,扫描器在前方扫描一定的角度,并且每隔一定角度采集得到障碍物的距离。这样便可以得到机器人周围的物理和空间环境。

2. 典型器件

典型的激光雷达产品有 SICK 公司的 LMS200, 与 HOKUYO 公司相对简化、更廉价的



激光扫描传感器 URG-04LX 系列产品。激光雷达的优点很多,但是缺点也很明显:价格昂贵,并且尺寸大,质量较重。

1) LMS200 激光雷达

如图 3.10 所示,LMS200 激光雷达利用旋转的激光光源,经过反射镜发射到环境中,反射光束被传感器的敏感元件接收到,通过计算发射光束和接收光束的时间差实现测距。

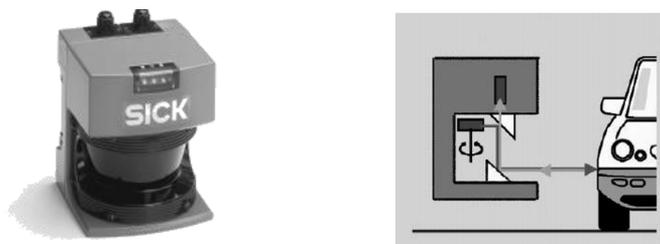


图 3.10 LMS200 激光雷达

LMS200 激光雷达测量范围广,扫描频率高。可以扫描 180° 以上的范围,每秒对前方 180° 范围、半径 80m 的区域扫描 75 次,并返回 720 个测距点数据(角度分辨率为 0.25°)。在最大量程的条件下,LMS200 的典型分辨率可以达到 10mm。

2) URG-04LX 系列激光雷达

URG-04LX 的外形和在一个房间里的实际测量示意图如图 3.11 所示。

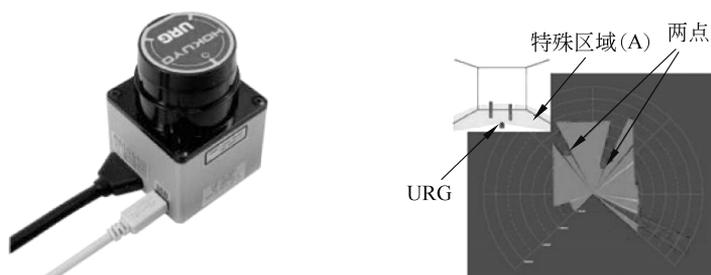


图 3.11 URG-04LX 激光雷达

URG-04LX 系列激光雷达的体积为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 70\text{mm}$,质量仅为 160g,精度达到 10mm,功耗只有 2.5W,角度分辨率为 0.36° ,扫描范围达到了 240° ,并且价格只有 LMS200 的三分之一。但是相应地,有效测量距离大幅度减小了,扫描测量半径只有 4m。因此更适合应用在那些工作在狭小空间的小型机器人上。

3.2.4 旋转编码器

旋转编码器是一种角位移传感器,分为光电式、接触式和电磁式三种,光电式旋转编码器是闭环控制系统中最常用的位置传感器。旋转编码器可分为绝对式编码器和增量式编码器两种。

1. 绝对式编码器

绝对式编码器能提供运转角度范围内的绝对位置信息,工作原理如图 3.12 所示。

图 3.12(a)示意了从发光管经过分光滤镜等光学组件,通过编码盘的透射光被光学敏感

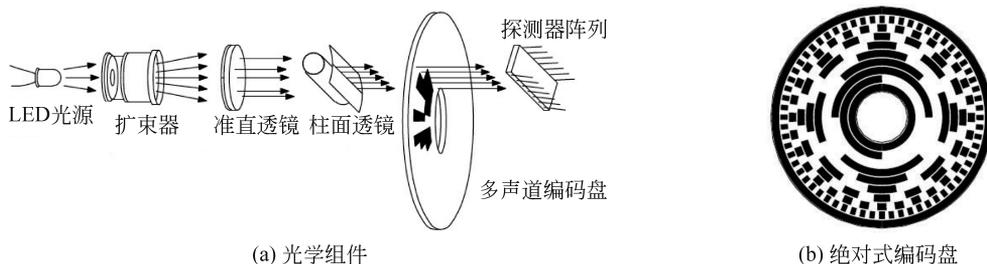


图 3.12 绝对式编码器

器件检测到的原理。图 3.12(b)是一个 8 位(256 点分辨率)绝对式编码盘的示意图。编码盘具有 8 个同心圆,分别代表 8 个有效位。黑色表示不透光,白色表示透光。发光管发出的光线经过分光组件后变成 8 组平行光,穿过编码盘的光投射到光学敏感器件上,就可以得到编码盘当前的角度信息。

2. 增量式编码器

目前,机器人等伺服系统上广泛应用的是增量式编码器。绝对式编码器由于成本较高,正在被增量式编码器所替代。增量式编码器则可为每个运动增量提供输出脉冲。

如图 3.13 所示,典型的增量式编码器由一个红外对射式光电传感器和一个由遮光线和空隔构成的码盘组成。当码盘旋转时,遮光线和空隔能阻拦红外光束,或让其通过。为计算绝对位置,增量式编码器通常需要集成一个独立的通道——索引通道,它可以在每次旋转到定义的零点或原点位置时提供一个脉冲。通过计算来自这个原点的脉冲可以计算出绝对位置。

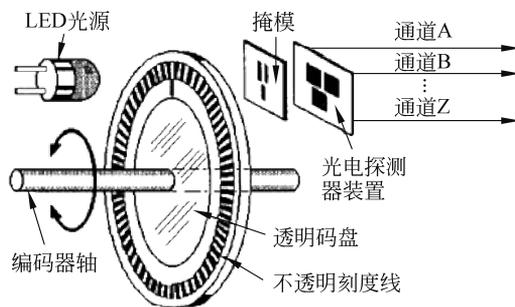


图 3.13 增量式编码器

3. 典型器件

目前市场上有各种精度的增量式编码器可供选择,1~2 英寸直径的编码器每转的计数范围为 32~2500。主要的编码器生产厂商包括安杰伦、欧姆龙、多摩川等。编码盘安装在电动机尾端伸出的轴上,而其他部件则安装在电动机尾端的外壳上。

由于光电编码器的一些性能限制,近年来还出现了磁传感器原理的旋转编码器。利用测量磁场原理的磁传感器有很多优于光电系统的地方,特别是在一些充满灰尘、污物、油脂、潮湿的恶劣环境下,因为磁场不会受这些污染物的影响。

对于伺服驱动器来说,编码器的原理是光学原理还是磁原理并不重要。选择能够正常安装、线数符合要求的编码器就可以。



3.2.5 旋转电位计

电位计就是带中心抽头的可变电阻。旋转电位计通常具有一个轴,轴旋转的时候,电位计的抽头会在电阻丝上移动;电位计带有 3 个端子,两个是电阻的两端,电阻值固定;另外一个为抽头输出端,其与两端的电阻值随着旋转角度的变化而变化。因此可以利用旋转电位计测量转动角度等信息。

市场上的旋转电位计很多,有单圈的(最大转动角度为 360°)、多圈的(最大转动角度超过 360°)等。旋转电位计的价格很便宜,最便宜的不到 1 元,高档的也不过几十元。但是,使用它们作为角位移传感器的时候要注意以下两点。

(1) 旋转电位计都是采用电阻丝作为传感元件。属于接触式测量,会有磨损,寿命有限,因此不宜用在高速频繁旋转的场合。

(2) 由于制造工艺等原因,同一型号的多个旋转电位计会有一定误差。通常这个误差为 $5\% \sim 10\%$ 。因此无法用于高精度的角位移测量。

3.3 触觉测量

一般认为,触觉包括触觉、压觉、滑觉、力觉 4 种,狭义的触觉是指前 3 种感知接触的感觉。触觉传感器可以分为集中式和分布式(或阵列式)。

1. 集中式传感器

集中式传感器的特点是功能单一,结构简单。

2. 分布式(阵列式)传感器

分布式传感器可以检测分布在面状物体上的力或位移。如图 3.14 所示,由于输出的是传感器面上各个点的信息,因此其结构比集中式传感器更复杂。随着新型敏感压阻材料 CSA(碳毡)等的出现,更高分辨率的触觉传感器成为可能。CSA 灵敏度高,具有较强的耐过载能力。缺点是有迟滞,线性差。

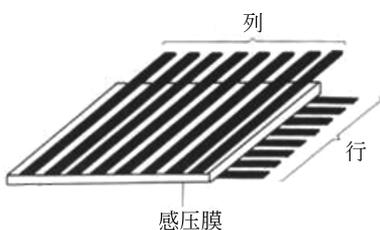


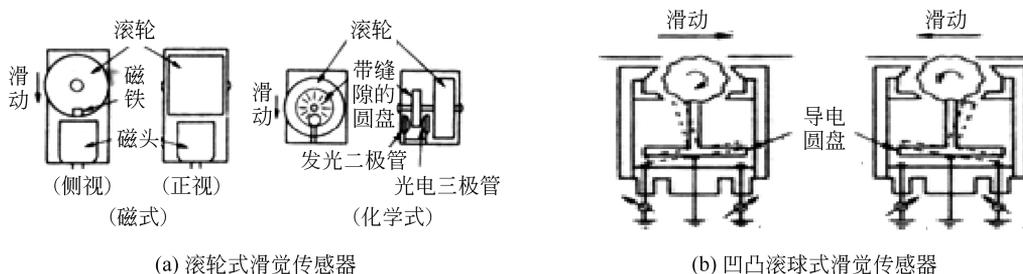
图 3.14 阵列触觉传感器的基本结构

爱德华等利用现代集成电路技术,将阵列触觉传感器的空间分辨率提高到 0.6mm 以下。其分辨性能甚至优于人类皮肤(人的皮肤约为 1mm 的分辨率)。

从触觉的使用环境和感知对象来看,并非所有的触觉都需要高的阵列数与空间分辨率,阵列数为 16×16 以下、空间分辨率大于 1mm 足以胜任作为一般用途使用的触觉传感器的任务。传感器的表面柔顺性、可组合性、强固性倒是一个十分突出的问题。若希望将触觉和其他感觉传感器都装在机器人的手指上,还需考虑传感器的空间可安装性、能否与其他传感器组合在一起等问题。

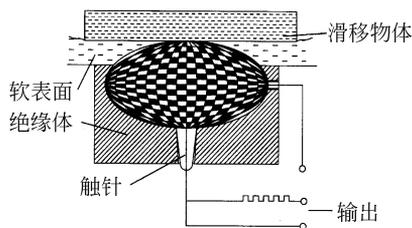
滑觉传感器主要是感受物体的滑动方向、滑动速度及滑动距离,以解决夹持物体的可靠性问题。滑觉传感器有滚轮式和滚球式两种。图 3.15 是滑觉传感器的典型结构。

在图 3.15(a)中,物体滑动引起滚轮转动,用磁铁、静止磁头、光传感器等进行检测,这种传感器只能检测单方向滑动。



(a) 滚轮式滑觉传感器

(b) 凹凸滚球式滑觉传感器



(b) 贝尔格莱德大学研制的机器人专用滑觉传感器

图 3.15 滑觉传感器的典型结构

在图 3.15(b)中,用滚球代替滚轮,可以检测各个方向的滑动。由于表面凹凸不平,滚球转动时将拨动与之接触的杠杆,使导电圆盘产生振动,从而传达触点开关状态的信息。

图 3.15(c)是贝尔格莱德大学研制的机器人专用滑觉传感器。它由一个金属球和触针组成,金属球表面分成许多个相间排列的导电和绝缘小格。触针头很细,每次只能触及一格。当工件滑动时,金属球也随之转动,在触针上输出脉冲信号,脉冲信号的频率反映了滑移速度,个数对应滑移的距离。

图 3.16 是振动式滑觉传感器,传感器表面伸出的触针能和物体接触。对象物体滑动时,触针与物体接触,产生振动,这个振动由压电传感器或磁场线圈结构的微小位移计进行检测。

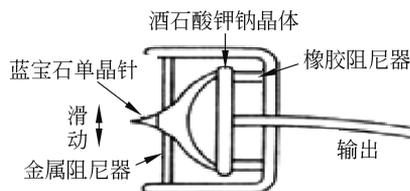


图 3.16 振动式滑觉传感器

3.4 压觉测量

力传感器的种类繁多,如电阻应变片压力传感器、半导体应变片压力传感器、压阻式压力传感器、电感式压力传感器、电容式压力传感器、谐振式压力传感器及电容式加速度传感器等。通常将机器人的力传感器分为以下 3 类。

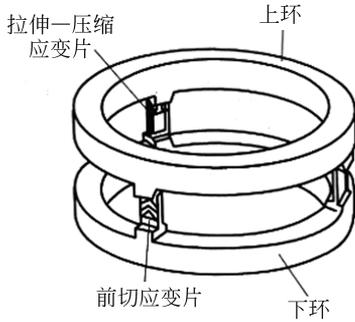
- (1) 装在关节驱动器上的力传感器,称为关节力传感器。用于控制中的力反馈。
- (2) 装在末端执行器和机器人最后一个关节之间的力传感器,称为腕力传感器。
- (3) 装在机器人手爪指关节(或手指上)的力传感器,称为指力传感器。

力传感器是从应变来测量力和力矩的。所以,设计和制作应变部分的形状,恰如其分地反映力和力矩的真实情况至关重要。

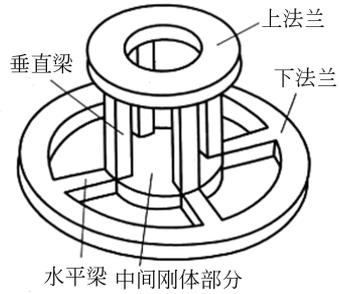


1. 环式传感器

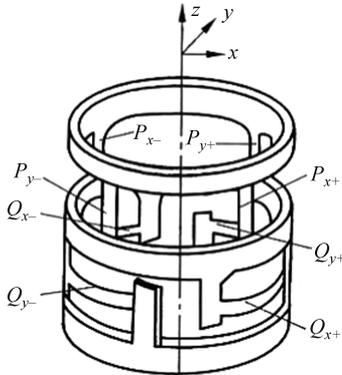
图 3.17(a)所示为美国德雷珀研究所提出的 Waston 腕力传感器环式竖梁式结构,环的外侧粘贴测量剪切变形的应变片,内侧粘贴测量拉伸—压缩变形的应变片。



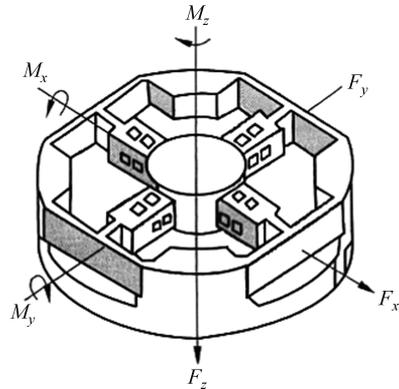
(a) Waston腕力传感器环式竖梁式结构



(b) 垂直水平梁式力传感器



(c) SRI传感器应变片连接方式



(d) 林纯一研制的腕力传感器

图 3.17 各种力觉传感器及连接方式

2. 垂直水平梁式传感器

图 3.17(b)为 Seiner 公司设计的垂直水平梁式力传感器。在上下法兰之间设计了垂直梁和水平梁,在各个梁上粘贴应变片,构成力传感器。

3. 圆筒式传感器

图 3.17(c)为 SRI 研制的六维腕力传感器,它由一只直径 75mm 的铝管铣削而成,具有 8 根窄长的弹性梁,每根梁的颈部只传递力,扭矩作用很小。梁的另一头贴有应变片。图中 P_{x+} 到 Q_{y-} 代表了 8 根应变梁的变形信号的输出。

$$\begin{cases} F_x = k_1(P_{y+} - P_{y-}) \\ F_y = k_2(P_{x+} - P_{x-}) \\ F_z = k_3(Q_{x+} + Q_{x-} + Q_{y+} + Q_{y-}) \\ M_x = k_4(Q_{y+} - Q_{y-}) \\ M_y = k_5(Q_{x+} - Q_{x-}) \\ M_z = k_6(P_{x+} + P_{x-} + P_{y+} + P_{y-}) \end{cases} \quad (3.5)$$

式中, k_1, k_2, \dots, k_6 为结构系数,可由实验测定。该传感器为直接输出型力传感器,不需要



再作运算,并能进行温度自动补偿。其主要缺点是维间存在耦合,且弹性梁的加工难度大、刚性较差。

4. 四根梁式传感器

图 3.17(d)为日本的林纯一研制的腕力传感器。它是一种整体轮辐式结构,传感器在十字梁与轮缘联结处有一个柔性环节,4 根交叉梁上共贴有 32 个应变片(图中以小方块显示),组成 8 路全桥输出。显然,六维力(力矩)的获得需要进行解耦运算。

3.5 姿态测量

智能机器人行进时可能会遇到各种地形或障碍。这时即使机器人的驱动装置采用闭环控制,也会由于轮子打滑等原因造成机器人偏离设定的运动轨迹,并且这种偏移是旋转编码器无法测量到的。这时就必须依靠电子罗盘或角速率陀螺仪来测量这些偏移,并进行必要的修正,以保证机器人行走的方向不会偏离。

3.5.1 磁罗盘

磁罗盘是一种基于磁场理论的绝对方位感知传感器。借助于磁罗盘,机器人可以确定自己相应于地磁场方向的偏转角度。常用的磁罗盘包括机械式磁罗盘、磁通门罗盘、霍尔效应罗盘、磁阻式罗盘。

1. 机械式磁罗盘

指南针就是一种机械式磁罗盘。早期的磁罗盘将磁针悬浮于水面或悬置于空中来获取航向。现在的机械式磁罗盘系统将环形磁铁或一对磁棒安装于云母刻度盘上,并将其悬浮于装有水与酒精或者甘油混合液的密闭容器中。

2. 磁通门罗盘

磁通门罗盘是在磁通门场强计的原理上研制出来的。它除了可应用在陆地的各种载体上,还广泛地应用在飞行体、舰船和潜水设备的导航与控制上。其主要优点是灵敏度高、可靠性好、体积小和启动快。

磁通门罗盘由检测头和信号处理电路两部分组成。检测头是两组在空间上相互垂直的带有磁芯的线圈,磁芯由高磁导率、低矫顽力的软磁材料制成。这种材料的特点是外加磁场较弱时,磁化强度可达最大值,去掉外磁场后,材料保持的剩余磁化强度很小,容易退磁。

如图 3.18 所示,激励绕组缠绕在环形磁芯上,两组测量绕组相互正交。若在检测头的激励绕组上施加一中心频率为 f 。并足以使磁芯饱和的正弦电压 u_1 ,当将检测头置于被测直流磁场 H_0 中时,就会发现其测量绕组的输出信号中不但含有奇次谐波,还含有偶次谐波,其中偶次谐波(特别是二次谐波)的大小和相位分别反映了直流磁场的强度和方向。因此,检测出测量绕组中偶次谐波的幅值和相位,并加以鉴别,也就检测出了该直流磁场 H_0 的大小和方向。

3. 霍尔效应罗盘

霍尔元件是一长为 L 、宽为 W 、厚度为 d 的半导体薄片,如图 3.19 所示。

当在矩形霍尔元件中通以图 3.19 中所示的电流 I ,并外加磁场 B ,磁场方向垂直于霍尔元件所在的平面时,霍尔元件中的载流子在洛伦兹力的作用下将发生偏转,在霍尔元件上下

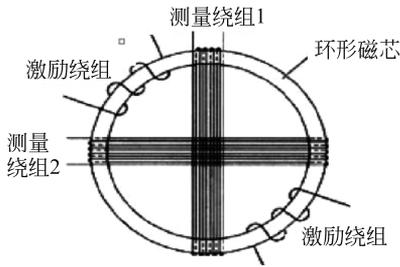


图 3.18 环形磁通门罗盘检测头的结构原理图

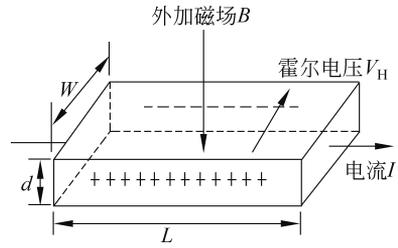


图 3.19 霍尔效应原理图

边缘出现电荷积聚,产生一电场,该电场称为霍尔电场。达到稳态时,霍尔电场和磁场对载流子的作用互相抵消,载流子恢复初始的运动方向,从而使霍尔元件上下边缘产生电压差,称为霍尔电压 V_H 。霍尔电压可根据式(3.6)近似计算为

$$V_H = \frac{\mu_H IB}{d} \quad (3.6)$$

式中, μ_H 为比例常数,称为霍尔系数,它由导体或半导体材料的性质决定; B 为磁场强度; I 为电流强度。

可以看出,霍尔元件的输出电压随磁场线性变化,基于这种原理可以实现能够检测载体方位角度的霍尔效应罗盘。

4. 磁阻式罗盘

磁阻式罗盘是利用磁阻元件制作而成的罗盘。磁阻元件可以分为各向异性磁阻元件和巨磁阻元件。目前,较为典型和应用较广泛的基于磁阻效应的磁传感器是霍尼韦尔公司的 HMC1001、HMC1002 和 HMC2003,其中 HMC1001 和 HMC1002 分别为单轴和双轴磁传感器,而 HMC2003 则是集成 HMC1001、HMC1002 磁阻传感器和高精度放大器而实现的三轴磁传感器。

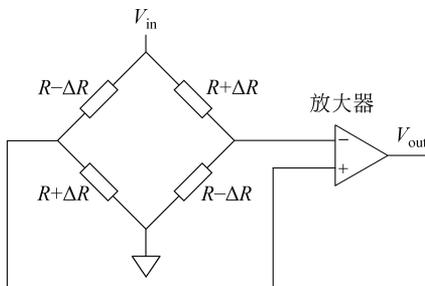


图 3.20 磁阻传感器检测电路

这类传感器利用的是一种镍铁合金材料的磁阻效应工作的:给镍铁合金制成的薄片通上电流,磁场垂直于该薄片的分量将改变薄片的磁极化方向,从而改变薄片的电阻。这种合金电阻的变化就叫作磁阻效应,这种效应直接与电流方向和磁化矢量之间的夹角有关。这种电阻变化可由惠斯通电桥测得。如图 3.20 所示,电桥中 4 个电阻的标称值均为 R ,供电电源 V_b 使电阻中流过电流,而磁场的有效分量 H 使 4 个电阻的阻值发生变化。经过推导可得出电路

输出

$$\Delta V_{out} = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) V_b = SHV_b \quad (3.7)$$

其中, S 为传感器的灵敏度。此公式只适用于一定范围,当超出这一范围时, ΔV_{out} 与 H 便不再满足线性关系。

5. 电子罗盘系统实例

电子罗盘(数字罗盘、电子指南针、数字指南针)是测量方位角(航向角)比较经济的一种



电子仪器。如今电子罗盘已广泛应用于手表、手机、对讲机、雷达探测器、望远镜、探星仪、寻路器、武器/导弹导航(航位推测)、位置/方位系统、安全/定位设备、汽车、航海和航空的高性能导航设备、智能机器人设备等需要方向或姿态传感的设备中。

电子罗盘有以下几种传感器组合。

(1) 双轴磁传感器系统：由两个磁传感器垂直安装于同一平面组成，测量时必须持平，适用于手持、低精度设备。

(2) 三轴磁传感器、双轴倾角传感器系统：由3个磁传感器构成X、Y、Z轴磁系统，加上双轴倾角传感器进行倾斜补偿。除了测量航向，还可以测量系统的俯仰角和横滚角。适合于需要方向和姿态显示的精度要求较高的设备。

(3) 三轴磁传感器、三轴倾角传感器系统：由3个磁传感器构成X、Y、Z轴磁系统，加上三轴倾角传感器(加速度传感器)进行倾斜补偿。除了测量航向，还可以测量系统的俯仰角和横滚角。适合于需要方向和姿态显示的精度要求较高的设备。

霍尼韦尔的HMR 3100双轴电子罗盘如图3.21所示。采用USART串行通信连接系统，接口简单，体积小。单轴电子罗盘的尺寸小、质量轻、精度较低(典型精度为 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$)，价格便宜。

如图3.22所示，C100 Plus是KVH公司推出的一种新型高精度电子罗盘，通过独特的滤波算法使得其航向精度提高到 $\pm 0.2^{\circ}$ 。

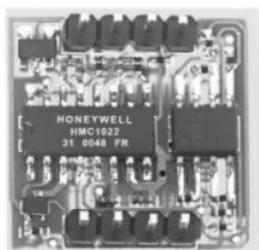


图 3.21 HMR 3100 双轴电子罗盘



图 3.22 C100 Plus 新型高精度电子罗盘

3.5.2 角速度陀螺仪

商用的电子罗盘传感器精度通常为 0.5° 或者更差。如果机器人的运动距离较长， 0.5° 的航向偏差可能导致机器人运动的线位移偏离值不可接受。而陀螺仪可以提供极高精度(16位精度，甚至更高)的角速率信息，通过积分运算可以在一定程度上弥补电子罗盘的误差。

角速度陀螺仪就是能够检测重力方向或姿态角变化(角速度)的传感器，根据检测原理可以将其分为陀螺式和垂直振子式等。

1. 陀螺式

绕一个支点高速转动的刚体称为陀螺。在一定的初始条件和一定的外力矩作用下，陀螺会在不停自转的同时还绕着另一个固定的转轴不停地旋转，这就是陀螺的旋进(precession)，又称为回转效应(gyroscopic effect)。人们利用陀螺的力学性质制成的各种功能的陀螺装置称为陀螺传感器(gyroscope sensor)。

陀螺传感器检测随物体转动而产生的角速度可以用于智能机器人的姿态，以及转轴不



固定的转动物体的角速度检测。陀螺式传感器大体有速率陀螺仪、位移陀螺仪、方向陀螺仪等几种,机器人领域中大都使用速率陀螺仪(rate gyroscope)。

根据具体的检测方法,又可以将其分为振动型、光纤型、机械转动型等。

1) 振动陀螺仪

振动陀螺仪(vibratory gyroscope)是指给振动中的物体施加恒定的转速,利用哥氏力作用于物体的现象来检测转速的传感器。

哥氏力 f_c 是质量 m 的质点,同时具有速度 v 和角速度 ω ,相对于惯性参考系运动时所产生的惯性力,如图 3.23 (a)所示,惯性力作用在对应于物体的两个运动方向的垂直方向上,该方向即为哥氏加速度 a_c 的方向。哥氏力 f_c 大小可表示为

$$f_c = ma_c = 2mv \times \omega \quad (3.8)$$

在图 3.23(b)中建立与图 3.23(a)中相同的姿态坐标系。假设让音叉的两根振子相互沿 y 轴振动,于是在 z 轴方向引起转动速度,音叉左侧的分叉沿 $-x$ 方向、右侧的分叉沿 $+x$ 方向产生哥氏力。无论是直接检测哥氏力,或者是检测它们的合力作用在音叉根部向左转动的力矩,均能检测出转动的角速度 ω 。之所以将音叉设计为两个分叉,是由于此方法可以消除音叉加速度的影响。

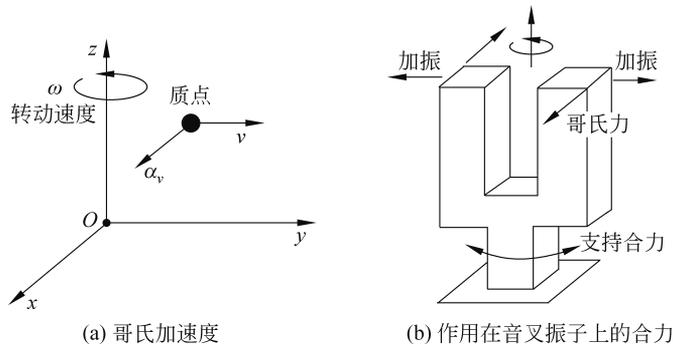


图 3.23 检测哥氏力的转速陀螺仪

2) 光纤陀螺仪

光纤陀螺仪的工作原理是基于萨格纳克效应,能够实现高精度姿态测量。在图 3.24 所示的环状光通路中,来自光源的光经过光束分离器被分成两束,在同一个环状光路中,一束向左转动,另一束向右转动进行传播。这时,如果系统整体相对于惯性空间以角速度 ω 转动,显然,光束沿环状光路左转一圈所花费的时间和右转一圈是不同的。这就是所谓的萨格纳克效应,人们已经利用这个效应开发了测量转速的装置,图 3.25 就是其中的一例。

该装置的结构是共振频率 Δf 振动的两个方向的激光在等腰三角形玻璃块内通过反射镜传递波束。如果玻璃块围绕与光路垂直的轴以角速度 ω 转动,左右转动的两束传播光波将出现光路长度差,导致频率上的差别。让两个方向的光发生干涉,该频率差就呈现出干涉条纹。这时有

$$\Delta f = \frac{4S\omega}{\lambda L} \quad (3.9)$$

式中, S 为光路包围的面积; λ 为激光的波长; L 为光路长度。

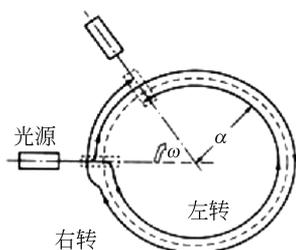


图 3.24 萨格纳克效应

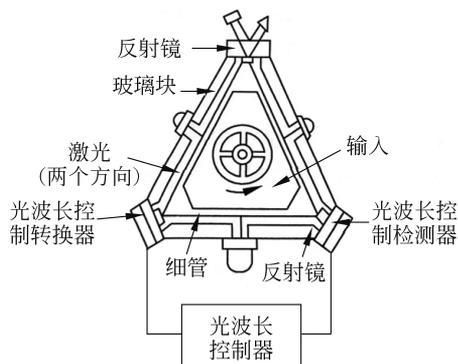


图 3.25 环状陀螺仪的结构

2. 垂直振子式

图 3.26 是垂直振子式伺服倾斜角传感器的原理。振子由挠性膜片支撑,即使传感器处于倾斜状态,振子也能保持铅直姿态,为此振子将离开平衡位置。通过检测振子是否偏离了平衡点,或者检测由偏离角函数(通常是正弦函数)给出的信号,就可以求出输入倾斜角度。该装置的缺点是,如果允许振子自由摆动,由于容器的空间有限,因此不能进行与倾斜角度对应的检测。实际上作了改进,把代表位移函数输出的电流反馈到可动线圈部分,让振子返回平衡位置,此时振子质量产生的力矩 M 为

$$M = m g \cdot l \sin\theta \tag{3.10}$$

转矩 T 为

$$T = K \cdot i \tag{3.11}$$

在平衡状态下,应有 $M = T$,于是得到

$$\theta = \arcsin \frac{K \cdot i}{m g \cdot l} \tag{3.12}$$

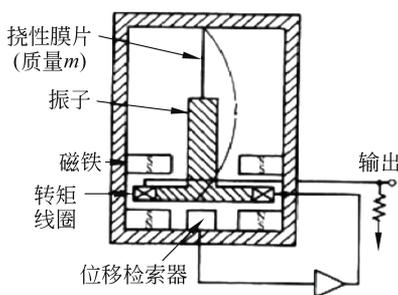


图 3.26 垂直振子式伺服倾斜角传感器的原理

这样,根据测出的线圈电流 i 即可求出倾斜角 θ ,并克服了上述装置测量范围小的缺点。

3. 实例

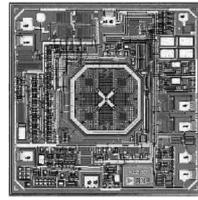
ADXRS 150 是一款角速度范围为 $150^\circ/\text{s}$ 的 MEMS 角速度传感器,集成于一个微小的芯片上,如图 3.27(a)所示。如图 3.27(b)所示,ADXRS 150 提供精确的参考电压和温度输出的补偿技术,以及 $7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 3\text{mm}$ 微小的封装。它具有 Z-轴响应、宽频、抗高振动,噪音为 $0.05^\circ/\sqrt{\text{Hz}}$,具有 2000g 冲击耐受力、温度传感器输出、精确电压参考输出,对精确应用



绝对速率输出,5V 单电压操作,小而轻(小于 0.15cm^2 , 小于 0.5g)等特点。



(a) ADXRS 150速率陀螺



(b) ADXRS 150内部结构

图 3.27 ADXRS 150 角速度传感器

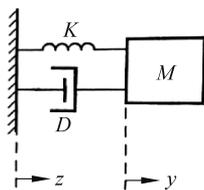
ADXRS 150 通常应用于车辆底盘滚转传感、惯性测量单元 IMU、平台稳定控制、无人机控制、弹道测量等。由于人体容易累积高达 4000V 的静电,虽然 ADXRS 150 本身具有静电保护,但仍有可能被高能量的静电击穿而不被察觉。因此,使用时应遵守恰当的防静电准则,以避免不必要的损失。

3.5.3 加速度计

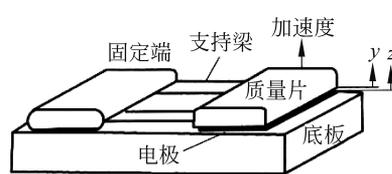
为抑制振动,有时在机器人的各个构件上安装加速度传感器,测量振动加速度,并把它反馈到构件底部的驱动器上。有时把加速度传感器安装在机器人的手爪部位,将测得的加速度进行数值积分,然后加到反馈环节中,以改善机器人的性能。

1. 质量片+支持梁型的加速度传感器

如图 3.28(a)所示,一端固定、一端链接质量片的悬臂梁构成的加速度传感器向上运动时,作用在质量片上的惯性力导致梁支持部分的位移及梁的内应力的产生。梁支持部位的位移可通过图 3.28(b)中的上下电极之间间隙长度的变化或内部应力的变化而被检测出来。由于半导体微加工技术的发展,已经能够通过硅的蚀刻来制作小型加速度传感器了。



(a) 传感器原理图



(b) 传感器结构图

图 3.28 悬臂梁结构的加速度传感器

2. 质量片位移伺服型加速度传感器

质量片位移伺服型加速度传感器就是检测图 3.28 中梁所支持的质量片的位移。例如,通过相应的静电动势进行反馈,使质量片返回到位移为零的状态。这种传感器结构,由于不存在质量片的几何位移,所以比图 3.28 中所讲的传感器的加速度测量范围更大。

3. 压电加速度传感器

对于不存在对称中心的异极晶体,加在晶体上的外力除了使晶体发生形变以外,还将改变晶体的极化状态,在晶体内部建立电场,这种由于机械力作用使介质发生极化的现象称为正压电效应。



压电加速度传感器利用具有压电效应的材料,受到外力时发生机械形变,并将产生加速度的力转换为电压(反之,若外加电压也能产生机械形变)。压电元件大多数由高介电系数的钛(锆)酸铅($\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$)系材料制成。

若压电常数为 d_{ij} , i 和 j 分别表示压电元件的极化方向和变形方向,加在元件上的应力 F 和产生电荷 Q 的关系可表示为

$$Q = d_{ij}F \quad (3.13)$$

设压电元件的电容为 C_p , 输出电压为 V , 则有

$$V = \frac{Q}{C_p} = \frac{d_{ij}F}{C_p} \quad (3.14)$$

显然, V 和 F 在很大动态范围内保持线性关系。

图 3.29 给出了压电元件变形的 3 种基本模式: 压缩变形、剪切变形和弯曲变形。图 3.30 给出了基于剪切模式的加速度传感器的结构。传感器中一对平板形或圆筒形的压电元件被垂直固定在轴对称的位置上, 压电元件的剪切压电常数大于压缩压电常数, 而且不受横向加速度的影响, 在一定的高温下仍然能保持稳定的输出。

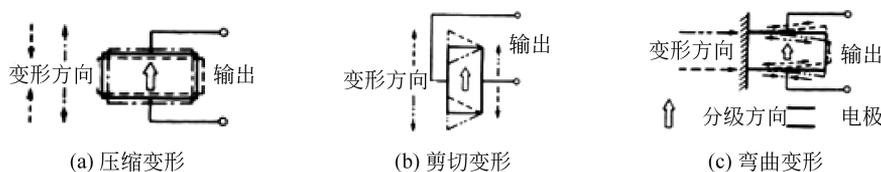


图 3.29 压电元件的变形模式

4. 应用实例

加速度传感器可以使机器人了解它现在身处的环境。如是在爬山还是在走下坡? 摔倒了没有? 对于飞行类的机器人(无人机)来说, 加速度计对于控制飞行姿态也是至关重要的。由于加速度计可以测量重力加速度, 因此可以利用这个绝对基准为陀螺仪等其他没有绝对基准的惯性传感器进行校正, 消除陀螺仪的漂移现象。

笔记本计算机内置的加速度传感器能够动态地监测出笔记本计算机在使用中的振动, 智能地选择关闭硬盘还是让其继续运行。数码相机内置的加速度传感器能够检测拍摄时手部的振动, 并根据这些振动进行补偿, 达到“防抖”的目的。

如图 3.31 所示, ADI、Honeywell、Freescale 等公司都提供微机电系统(micro electrical & mechanical system, MEMS)技术的加速度计。目前, 在要求不很高的机器人应用中, 比较广泛使用的是 ADI 的 ADXL 系列的双轴加速度计芯片。

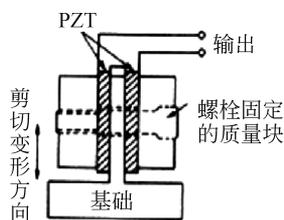


图 3.30 剪切式压电加速度传感器

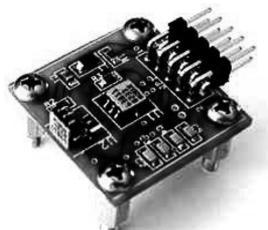


图 3.31 ADXL 加速度传感器