

机器人的作用在于替代人类完成各项工作,与人类的工作过程相似:人类在工作过程中,需要通过眼、耳、鼻、舌和皮肤接触等方式获取外界信息,经过脑部处理后,再通过手、脚等器官完成控制、把握、行走等动作,构成了一套“检测-处理-执行”的流程。

机器人在工作过程中,也需要完成同样的流程:通过特殊的设备感知关键状态、经过微处理器、计算机或神经网络处理分析后,交由机械臂、轮子或推进器等移动装置或加热设备、制冷设备等非移动装置执行相关工作。因此,这种用于感知外部状态或机器人自身状态的设备被称为传感器。

例如,物流转运中心的搬运机器人通过无线网络接收到搬运指令后,需要根据地面的标记,通过定位传感器感知机器人的当前位置,经由路径分析后确定最佳路径,并在行驶过程中通过感知位置保证行驶路线的正确。此外,在搬运等过程中也需要依靠压力传感器、图像传感器等完成外部状态的感知,而机器人的电池电压、工作电流、承载压力等自身状态也是必要的工作参数。可见,传感器系统是现代机器人系统的必备组成部分。

3.1 传感器系统结构组成



各类机器人上所用的传感器与其他装置上的传感器原理基本相同,但结合机器人的工作精度和工作场合等条件的约束,机器人对传感器有着更高的要求,具体要求如下。

(1) 精度高、灵敏度高、分辨率高、重复性好。精度(Precision)指测量值与真值的最大差异,传感器的精度越高,测量的结果越接近于真实被测量;灵敏度(Sensitivity)指传感器在稳态工作情况下输出量变化 Δy 与输入量变化 Δx 的比值,即输入特性曲线的斜率。如某位移传感器,在位移变化 1mm 时,输出电压变化为 200mV,则其灵敏度应表示为 200mV/mm;分辨率(Resolution)指传感器能够响应的最小测量值,如果输入量从某一非零值缓慢地变化,当输入变化值未超过某一数值时,传感器的输出并未发生变化,即传感器对此输入量的变化是无法分辨的,该数值称为传感器的分辨率。只有当输入量的变化超过分辨率时,传感器输出才会发生变化,分辨率与数字传感器的 AD 转换器密切相关。重复性指传感器在输入量按同一方向做全量程多次测试时,所得特性曲线不一致性的程度。多次按相同输入条件测试得出的输出特性曲线越重合,其重复性越好,误差也越小。传感器输出特性的不重复性主要由传感器机械部分的磨损、间隙、松动、部件的内摩擦、积尘以及辅助电路老化和漂移等因素造成。

机器人系统中的传感器应当具有比民用设备传感器更高的精度和更好的重复性,如工业机器人对机械手的定位和承重的要求,远高于普通民用产品的要求。此外,机器人在工作

过程中往往从事的是重复性劳动,其传感器始终在特定范围内进行重复测量。因此,为了保证每次测量的准确性和一致性,机器人上的传感器必须有良好的重复性。

(2) 稳定性好、可靠性好。机器人的工作环境通常较为复杂和恶劣,与民用传感器的工作环境相比,机器人的工作环境可能面临着高温、高压、高湿度、高粉尘,甚至是有毒、有害、有腐蚀性的威胁。因此,机器人所使用的传感器必须能够在这样的环境中保证更高稳定性和可靠性。

(3) 抗干扰能力强。机器人工作的场合电磁环境复杂,伺服电动机、推进器、电动机以及电焊等设备工作电流大、电流变化快,会向外辐射大量电磁波,造成电磁干扰问题。因此,机器人所使用的传感器必须具有对电磁干扰的防护能力。

(4) 重量和体积优势强,安装替换方便。机器人所使用的传感器工作时间长,工作强度大。因此在使用时,应能够方便地应对发生的故障,快速地拆卸故障传感器、安装新传感器,以减少机器人因故障导致的停机时间。

3.1.1 传感器系统组成

传感器是机器人系统获取外界状态和自身状态的重要途径,是机器人连接外部环境的重要接口,也是机器人迈向自主化、智能化的基础。现代机器人通常会装备多个传感器,并利用多个传感器的数据进行解算和处理,以获取机器人的当前状态并预测未来状态,如机器人使用加速度、陀螺仪和电子罗盘等传感器计算姿态的,同时还可以通过历史累计数据计算机器人的运动速度。因此,根据传感器数据在机器人系统中的使用目的,可以按照由简单到复杂分为以下几个等级。

(1) 反射式感知。反射式感知仅根据传感器的输出结果进行直接的数据处理或判定,执行简单的行为,如防碰撞和避障等。反射式感知行为简单、处理简单,不需要复杂的算法和神经网络即可完成,反应速度快,但可实现的功能有限。

(2) 融合式感知。融合式感知是对多个传感器的输出数据进行融合处理,综合处理多传感器的多尺度数据,历史数据也需要被存储并参与计算。因此可以实现对状态的预判功能,并做出反应,如PID算法等。融合式感知处理简单,反应速度较快,且具有预判能力,适合在机器人的基本作业过程中使用。

(3) 经验式感知。经验式感知除了依靠传感器的数据之外,还需要建立相应的知识库或专家系统,机器人根据知识库或专家系统的判决结果执行动作。经验式感知是建立在庞大的人类历史经验基础之上的,能够满足机器人作业期间的各类环境变化,但知识库或专家系统可能会因系统庞大导致机器人系统响应缓慢。

(4) 自主学习式感知。自主学习式感知的最大特点是在使用前,并不通过人工方式分析系统关系或构建专家系统,而是构建应用于该系统的神经网络,机器人系统根据神经网络的反馈结果执行作业任务,且在工作的过程中还可以实现神经网络的训练和更新。自主学习式感知对机器人系统的运算能力有较高的要求,通常要求使用GPU或FPGA等具有较强算力的设备来部署神经网络,因此其成本高、难度大。

从传感器输出的信号类型角度区分较为简单,可分为模拟电信号、数字电信号和光信号等,目前较为常用的是数字传感器。数字传感器通常具有集成度高、抗干扰强、使用简单的特点。数字传感器通常包括以下四部分。

(1) 敏感材料。敏感材料是指能够感知被测量且随着被测量变化按照一定规律变化的,而对其他干扰因素不敏感的材料。敏感材料通常封装在保护外壳中,构成敏感元件,在电路中使用。

如某 PTS 铂金 SMD 扁平片式温度传感器中的敏感材料 PTS 是一种温度敏感材料,其测温范围为 $-55\sim+175^{\circ}\text{C}$,在该范围内可达到小于 $\pm 0.1\%$ 的稳定度。最为重要的是,该材料还具有 $+3850\text{ppm/K}$ 的线性温度特性,而且对湿度、光照度、震动等其他信号类型不响应或不敏感。而某湿度传感器中使用的氯化锂材料,在经过特殊老化和涂覆工艺后,其湿度测量范围达到了 $1\%\text{RH}\sim 100\%\text{RH}$,实现了感湿范围内的线性化,且传感器探头在 $-80\sim+600^{\circ}\text{C}$ 的工作温度均具有稳定的感湿能力。

可见,敏感材料是指可以感知物理量、化学量或生物量(例如:电、光、声、力、热、磁和气体分布等)的特殊材料,按照被感知的类型,常见的敏感材料可以分为以下几种。

① 热敏材料:能够根据所处环境的温度变化,发生有规则的电阻、磁性、介电或半导体物理特性变化的敏感材料。

② 力敏材料:能够根据针对材料的压力变化,发生有规则的电阻、磁性、介电或半导体物理特性变化的敏感材料。

③ 磁敏材料:能够将磁能转换为电信号等特性的敏感材料。

④ 湿敏材料:可以吸附、吸收或凝结空气中的水蒸气,并能够根据水蒸气量改变电阻值等特性的敏感材料。

⑤ 气敏材料:能够根据某种气体浓度变化改变电阻值等特性的敏感材料。

⑥ 光敏材料:能够根据光线强度变化改变电阻值等特性的敏感材料。

⑦ 声敏材料:能够根据声音的强弱变化改变电阻值等特性的敏感材料。

⑧ 电压敏感材料:能够根据电压的大小变化改变电阻值等特性的敏感材料。

⑨ 离子敏感材料:能够将溶液中离子的活跃度转换为电信号等特性的敏感材料。

(2) 信号调理电路。信号调理电路指位于敏感材料和信号采集电路之间的对信号进行预处理的电路,包括衰减器、前置放大器、电荷放大器以及非线性补偿电路等。敏感材料在工作过程中依然会受到非感知信号的影响,而信号调理电路主要的目的是消除这些影响、消除外界其他干扰因素。

如压力传感器中的信号调理电路,其功能则是补偿压力敏感元件在不同温度下的误差,根据误差与压力传感器温度曲线之间的关系进行匹配,从而减小温度对压力传感器输出数据准确度的影响。因此,信号调理电路一般安装紧贴敏感元件,并且会增加用于补偿或调整误差的传感器。

(3) 信号采集电路。信号采集电路对敏感元件输出的信号(通常是模拟电信号)进行模数转换后成为数字信号。

(4) 信号输出电路。信号输出电路将采集后的数值,按照传感器要求的输出类型进行转换,主要包括通信接口和通信协议两方面。

① 通信接口转换指传感器输出所使用的接口以及该接口所附加的接口协议,例如,传感器输出使用 RS232/RS485 接口,应遵循该接口所定义的底层通信协议中的起始位、数据位、停止位和校验位的要求,如常见的 8-N-1(即 8 位数据、没有校验、1 位停止)等;若采用以太网协议传输,则除了使用网线和网络接口外,还应使用 TCP 或 UDP 进行封包传输。

② 通信协议转换。网络协议所规定的格式并不能代表传感器所有的输出数据,如传感器每次输出的数据长度为 16 位,使用 8-N-1 协议无法满足传输要求,因此就需要用户定义上层协议格式,并增加协议头、尾,组成结构或校验等协议格式,构成上层通信协议。

数字传感器的四个组成部分可以根据传感器的结构和特性进行改变,尤其是随着微处理器技术的发展,可以一定程度上实现信号调理、信号采集和信号输出功能的高度集成和数字化处理。例如,将误差修正功能保存在微处理器内部,实时修正,免去了复杂的外部电路。处理器内部集成的模数转换器、通信接口和通用输入输出接口功能可以实现信号采集、信号输出和控制功能。如图 3.1 所示为 TMP117 高精度低功耗数字温度传感器的内部结构,该传感器工作电压为 $1.8\sim 5.5\text{V}$,在 $-55\sim +150^{\circ}\text{C}$ 范围内能实现 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 的测温精度,而在 $-20\sim +50^{\circ}\text{C}$ 范围内能达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的测温精度,分辨率可达 0.0078°C ,1Hz 的连续工作模式下的工作电流只有 $3.5\mu\text{A}$,关机模式下电流仅 150nA ,具有 I²C 和 SMBus 通信接口并支持可编程的温度报警功能,其 BGA 封装芯片的尺寸只有 $1.53\text{mm}\times 1.00\text{mm}\times 0.50\text{mm}$ 。

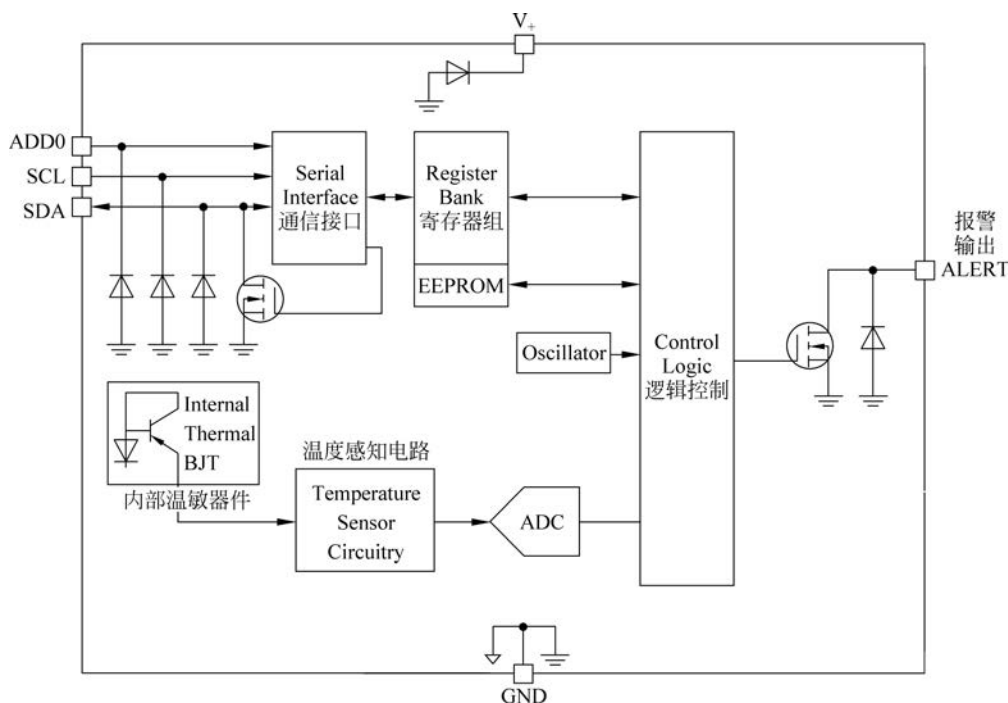


图 3.1 TMP117 温度传感器内部结构图

TMP117 传感器内部集成了微处理器和必要的组成部件,其内部的微处理器部分包括 Control Logic(逻辑控制)、Oscillator(晶体振荡器)、EEPROM(数据存储)、Register Bank(寄存器)、Serial Interface(串行通信接口)和 ADC(模数转换器)等功能模块,将采集、存储、通信和控制等功能高度集成,同时实现了报警输出功能。Internal Thermal BJT 中封装了温度敏感半导体材料,由 Temperature Sensor Circuit 对 Internal Thermal BJT 的输出进行放大等处理后送至 ADC 进行模数转换,转换后的结果由 Control Logic 等模块进行判断处理。可见,数字传感器的高度集成简化了传感器的结构。同时也一定程度上模糊了传感器内部的功能划分,数字传感器内部的微处理器就可以完成采集、存储、通信和处理等功能,降

低了传感器功耗,缩小了传感器体积,减少了传感器模拟信号的传输干扰,同时也提升了传感器的易用性,降低了传感器价格。目前,越来越多的电子设备上都已经开始使用各类高集成度、低功耗和小体积的数字传感器。

3.1.2 传感器系统部署特性

机器人系统中的传感器用于采集机器人和外部状态信息,实现类似人类的感知作用。根据传感器在机器人系统中的感知类型,可以分为内部状态传感器和外界环境检测传感器两类:内部状态传感器用于机器人监测自身的状态,以调整机器人的运作方式和行为。内部状态通常包括机器人本体姿态和各运动部件的姿态、能量状态、运动状态和位置状态,以及机器人自身各部件的运行状态。特别需要注意的是,内部传感器并不特别要求安装在机器人“内部”,监测机器人的运动状态的传感器可以是机器人内部的传感器,如电流传感器、电压传感器、加速度计、陀螺仪或电子罗盘等,也可以在机器人外部安装传感器,如使用摄像头监测机器人的状态,或内外结合,如机器人使用北斗/GPS 卫星定位系统确定自身的位置信息,则该系统既有机器人内部的定位芯片,又要依赖外部的卫星系统等。外界环境检测传感器则用来感受机器人外部的环境状态,以供机器人调整自身的运作方式和行为。外部环境状态包括温度和湿度等机器人运作相关的气象因素、机器人运动路径的状态,以及所有对机器人作业有影响的、需要考虑的外界因素。同样,外界环境检测传感器也不一定要求安装在机器人“外部”,如机器人感知外界温度的传感器就可以安装在机器人本体表面,感知外界地形的激光雷达也可以安装在机器人内部,检测是否与外界接触的碰撞传感器或压力传感器也应安装在机器人表面。

可见,外界环境检测传感器和内部状态传感器与传感器的安装位置无关,而与检测的信息所处的位置有关。因此,机器人系统中的各个传感器的部署应遵循“就近、适度、勿扰和安全”的原则。

(1) 就近原则。传感器应在不干扰被测部件作业的情况下,尽可能靠近被测部件或与之密切接触。如某机器人部件在运行过程中发热量较大,应对其温度进行监控。根据就近原则,一体化传感器或者是分体式传感器的温度探头应紧贴该发热部件并保证紧密接触,并保证良好的导热性能,使传感器的感知温度尽可能接近部件的真实温度。图 3.2 是一款市售的安装有光电编码器的直流电动机的外观图,根据就近原则,用于测量电动机的转速的光电编码器可以直接安装在电动机轴上,以减少系统的复杂度、提升稳定性、降低成本、缩小体积。而用于机器人姿态检测的加速度计和陀螺仪等传感器,则可以直接安装在待测部件上,如躯干、臂和腿等。

(2) 适度原则。多传感器可以构建冗余感知系统提升机器人系统的可靠性、构建描述内外部状态的高维度数据源。高精度传感器可以提供更高精度的各种状态数据,但是高维度、高精度和大量数据会对机器人的数据处理系统和决策系统造成巨大的压力,导致机器人需要更大的存储空间、更快的处理器和更长的处理时间,造成巨大的数据处理成本。因此,传感器选用应坚持适度原则,



图 3.2 安装有光电编码器的直流电动机

在满足机器人运行精度要求的前提下选择传感器的数量和性能指标即可。

(3) 勿扰原则。传统传感器测量时往往需要紧贴被测部件或安装在机器人的特定位置上,在部署时可能会存在传感器体积与部件体积接近,导致部件体积、重量增大等问题,进而会导致部件工作状态发生改变。一旦发生类似情况,应该调整传感器的部署方式或者更换传感器的类型,从而尽可能减少对原部件的干扰,即遵循传感器部署的勿扰原则。如测量机器人手臂的姿态,则应该在满足测量要求的情况下,选择体积小、重量轻的数字传感器,以减少对手臂运动的影响。

勿扰原则的另一方面是尽可能少地消耗被测物体数量,如传感器 A 在感知特殊气体的浓度过程中,需要使用气体进行反应才能进行检测,而传感器 B 在检测过程中不消耗任何气体。因此,则在等同条件下应优先考虑传感器 B,以减少对被测物的损耗。

(4) 安全原则。安全原则包括传感器自身安全和被测物品安全两个方面。自身安全指传感器在工作周期内应该保证传感器不被工作环境所损害,如测量硫化氢气体浓度,既可以选用接触式的电化学传感器,又可以选用基于光谱分析的光学传感器,选用原则应在满足设备要求的前提下满足安全原则。如某国产型号为 ME3-H₂S 的硫化氢传感器,其工作原理为硫化氢和氧气在工作电极与电极发生相应的氧化还原反应并释放电荷形成电流,电流大小与 H₂S 浓度成正比,测量传感器的输出电流即可判定硫化氢浓度的高低。该传感器具有低功耗、高精度、高灵敏度、线性范围宽、抗干扰能力强、优异的重复性和稳定性等显著优点,但该传感器一般用于硫化氢气体检测,在空气中的使用寿命仅为 2 年,不适合进行长期浓度检测。而另一种型号为 G800-H₂S 的硫化氢传感器则采用了紫外光谱法,其吸收光谱利用比尔朗伯定律,通过入射光与透射光的对比来计算得出硫化氢气体的浓度,连续工作的寿命可以达到 10 年。因此,在安全原则的要求下,ME3-H₂S 型传感器用于长期测量硫化氢气体浓度是不安全的,但可用于检测空气中是否有硫化氢气体,且需要定期更换传感器,而 G800-H₂S 则可用于长期监测硫化氢气体浓度。

感知的过程也应该保护被测物品的安全,这一点与勿扰原则是类似的。但安全原则是传感器应用的底线,安装传感器对被测部件所造成的干扰可以通过调整部件的工作模式进行补偿,但对被测物品的损坏是无法补偿的。

随着图像传感器和图像识别技术的发展,光学测量已经成为一种流行的远程、非接触式测量方法。上述 G800-H₂S 采用了紫外光谱法测量法实现了硫化氢气体的非接触式测量,而攀升公司的 PMS5003 等多型号 PM_{2.5} 传感器则利用激光散射原理测量并计算颗粒物的等效粒径和单位体积内不同粒径颗粒物的数量。光学测量所带来的非接触式测量方法尤其适合在无法接触的场合工作,如高温、高压、高速或复杂测量等。尤其是近年来,随着高分辨率摄像机的发展普及,光学图像可以实现对被测物体的超清拍照及识别功能。如 IMS 公司的光学测量系统则在轧钢领域用于产品质量监测,将光学系统的图像采集端(摄像机)安装在连铸出口处,如图 3.3(a)所示。摄像机可以精准测量钢坯的几何形状,其测量结果可用于优化加热炉装料,防止出板坯进入加热炉时的翘头或下栽、塌陷等问题。将光学系统的图像采集端(摄像机)安装在热轧线精轧机后,如图 3.3(b)所示,摄像机可以测量带材的宽度,用于优化剪切控制优化后部精轧机工艺。

光学测量的引入,尤其是其非接触特性,使得很多原来无法测量、难以测量的被测物得以被测量。光学测量不仅在工业领域得到应用,在军事领域、民用领域和娱乐领域也得到广

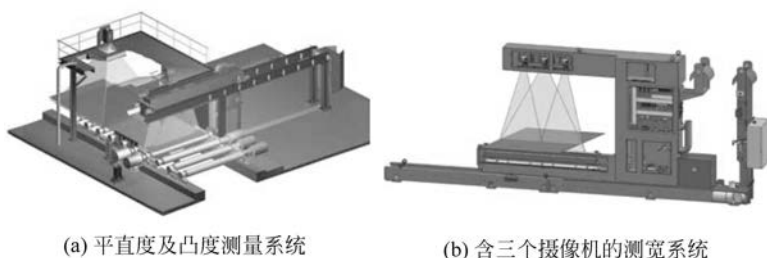


图 3.3 用于轧钢厂生产的光学测量系统

泛应用。如利用反射激光的震动信息还原远端声音实现的窃听技术、利用可见光摄像机实现的汽车车牌识别技术、利用可见光和红外结构光实现的 KINECT 娱乐设备等。光学测量的主要传感器是各类摄像头,包括可见光摄像头、紫外光线阵、红外光传感器和激光雷达等,其部署特性要易于传统的接触式测量传感器,甚至可以通过光学镜头实现远距离和超远距离的测量。

3.2 常见的数字传感器

传统的数字传感器指部署在待测部件附近,输出各类数字信号的传感器。数字传感器具有部署简单、通信简单、抗干扰性强、误差低和互换性好等优点,基于 MEMS(微型机电系统)技术设计和加工的数字传感器还具有体积小、功耗低以及各类智能功能,是机器人系统的必备器件。

3.2.1 距离和位置传感器

距离和位置是机器人的重要状态信息,严格意义上,机器人的位置信息也是通过机器人多次测量与已知位置参照物之间的距离来确定的。因此,机器人测距系统的主要功能如下。

- (1) 检测自身与固定标志物之间的距离,以确定自身所处位置。
- (2) 检测当前障碍物之间的距离和方向,为机器人移动提供决策依据。
- (3) 检测障碍物的姿态和形状,为机器人移动提供决策依据。

机器人的测距方式以非接触式测距为主,即不采用类似尺等接触式工具的测量方法。非接触式测距方式则以各类传输媒介作为测量介质,非接触式测距有如下几种分类方式。

(1) 根据测量介质进行分类,可以分为声波或超声波测距、红外测距、激光测距等。介质与测距环境关系密切,包括工作环境和测量距离等。

(2) 根据测量方法进行分类,可以分为主动辐射测距和被动辐射测距。主动辐射测距即测距装置上需要有辐射信号发送装置,依靠被测物体的反射来测量距离,被动辐射测距即测距装置只具备接收功能,不向外发送任何测距相关信号(光/声波等),只通过测量被测物体的辐射即可完成测量。

(3) 根据测量原理进行分类,除了依据立体视觉的方法之外,还包括直接利用信号强度的强度测量法、依据信号传播时间的传播时间测量法、依据信号传播后相位差的相位测量法等。



在各种测量原理中,由于电磁波、光波或声波等信号在传输过程中的理论衰减曲线会受到 LOS(Line of Sight)或 NLOS(Non-Line of Sight)等各类障碍物,以及雨、雾、云等难以预知的影响,产生较大的信号强度漂移,因此,目前的各类传感器已经极少直接使用信号强度计算距离了,但利用信号强度进行有无判别的传感器在机器人领域仍发挥着重要作用,如各类接近开关、光电开关和光电围栏等。

如图 3.4 所示是两种光电开关的工作示意图。当有被测物(任何遮光物体)进入对射式光电开关的测量范围内时,发射器所发射的光被被测物遮挡,此时接收器无法收到具有一定特性的光(强度无法达到阈值或波长无法被接收),则可判定为有被测物进入了光束范围;当有被测物(任何反光物体)进入反射式光电开关的测量范围时,发射器所发射的光被被测物反射,部分光束反射回接收器(接收器通常与发射器一体化封装),接收器检测到足够强度的反射光后,即可判定为有被测物进入了光束范围。光电开关的电路简单、工作可靠,适合进行检测、安防和计数等工作。

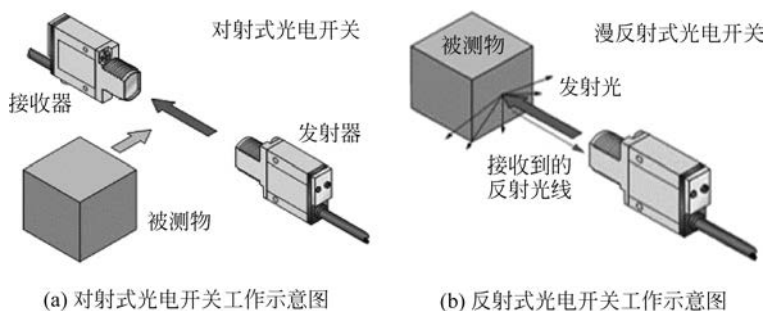


图 3.4 两种利用信号强度进行有无判别的光电传感器原理示意图

目前,在机器人系统中常见的测距传感器包括以下几类。

1. 声波测距

各类声波测距设备是典型的使用传播时间测量法测量距离的设备。基于声波在空气中具有较低传播速率的特性,机器人系统中通常会使用超声波模块进行近距离测量,利用声波可以在水中传播的特性,水下机器人系统又可以利用声呐测距、通过水声进行通信。基于超声波测距模块,陆地机器人系统可以实现避障、定位和环境建模功能,各类竞赛小车和汽车上的倒车雷达和近距离防碰撞设备都是用了超声波测距模块进行近距离测距的。

超声波是指频率高于 20kHz 的声波,超声波具有方向性好、穿透力强、声束能量集中等优点,可以实现向特定方向的发射。采用超声波测距时通常采用测量脉冲回波时间间隔的方法,即渡越时间法。传感器发射模块在 t_1 时刻向空气中发射一段超声波脉冲,如果在测距范围内有障碍物存在,则超声波脉冲会被障碍物反射并被传感器接收模块所接收(接收模块与发射模块的位置差可以忽略),若接收时刻为 t_2 ,则障碍物距离传感器接收模块的距离 s 为

$$s = c(t_2 - t_1)/2 \quad (3.1)$$

其中, c 为空气中的声速。

基于超声波的渡越时间法原理简单,但在实际应用中存在诸多限制因素:①距离过近无法使用,由于超声波脉冲有一定的时间宽度,一旦测量距离过近,就会导致传感器无法区

分发射波束和反射波束,因此,超声波传感器的最小测量距离通常不小于几厘米;②由于超声波在传输过程中会逐渐衰减,现有超声波传感器测量距离一般也都在 10m 以内;③超声波传感器的声波不具备指纹特征,因此多个传感器之间不具备区分能力,难以构成独立的连续工作的测距阵列。

独立工作的超声波传感器的工作原理和使用方法比较简单,图 3.5 是市售的一款广泛应用的 HC-SR04 型超声波传感器的外观图。该传感器除了电子设备必备的 VCC 和 GND 用于供电之外,仅有两个不涉及通信协议且依靠电平直接控制的控制端口 Trig 和 Echo,超声波波束的宽度约为 15°。

该传感器在工作时,首先在 Trig 端口给传感器一个超过 10 μ s 的高电平触发信号后,传感器开始工作,通过 T 端向外发射 8 个 40kHz 的方波并不断通过 R 端检测是否有信号返回,若 R 端有信号返回则表示传感器收到了被测物体的反射回波,并通过 Echo 端口输出一段高电平信号。高电平信号的持续时间就是超声波脉冲从发射到返回的时间,则可计算出超声波的传输距离,也就是传感器到被测物体距离的 2 倍。

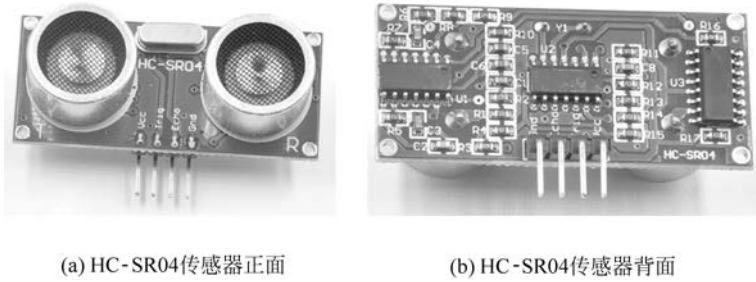
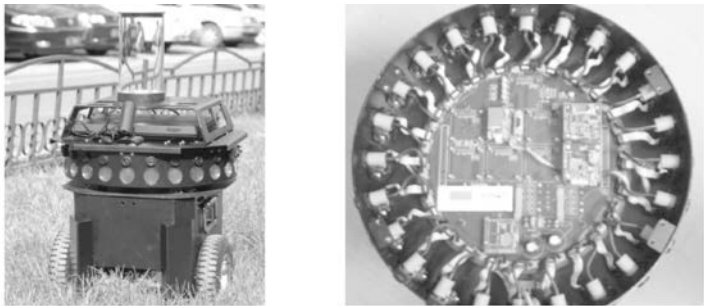


图 3.5 HC-SR04 型独立超声波传感器

基于超声波传感器的测距阵列目前较为鲜见,主要是因为多个独立传感器之间不具备区分能力。图 3.6 是博创公司在 UP-Voyager IIA 型机器人上装备的声呐(超声波测距阵列)。声呐距离地面约 45cm,声呐内部安装了 24 个独立的超声波传感器,传感器的角度间隔为 15°。但由于超声波传感器的反射波束会发生扩散,辐射范围变大,造成对相邻若干传感器的干扰。只有通过规划各独立的超声波传感器的工作时间,使特定传感器发射出的回波不干扰其他传感器的接收才能解决这种问题。



(a) UP-Voyager IIA型机器人外观 (b) UP-Voyager IIA型机器人超声波传感器阵列

图 3.6 UP-Voyager IIA 型机器人和声呐(超声波传感器阵列)内部结构图

第一种规划方式较为简单,即所有 24 个传感器在任一时刻只有一个传感器处于工作状态,该方式可以杜绝传感器之间的干扰。但传感器利用率低、采样频率低,对环境变化的感知速度慢、感知时间长。

第二种规划方式为分区轮询式,即建立常规情况下相互之间不干扰的传感器编号集合,集合之间循环工作。例如,将传感器进行编号为 01~24,若传感器 01 对传感器 04 和 22 不产生干扰、02 对 05 和 23 不产生干扰、03 对 06 和 24 不产生干扰,以此类推,则可以编制三组传感器节点的集合:

$$\begin{aligned} A &= \{01, 04, 07, 10, 13, 16, 19, 22\} \\ B &= \{02, 05, 08, 11, 14, 17, 20, 23\} \\ C &= \{03, 06, 09, 12, 15, 18, 21, 24\} \end{aligned}$$

工作时则可以集合 A、B 和 C 依次工作即可,其工作效率可大幅度提升。还可以实现动态分组,以在多反射的复杂地形情况下进一步降低干扰,或在简单地形情况下降低工作频次以降低系统功耗。

2. 红外测距

红外测距的基本原理是利用信号强度计算距离,其传感器对工作环境要求较高。目前市售红外测距传感器主要是 SHARP 公司的 GP2Y0A21YK0F 和 GP2D12、GP2D15 系列等。红外测距传感器相较超声波传感器,具有体积小、功耗低等优势。图 3.7 是 GP2D12 传感器的内部原理图。

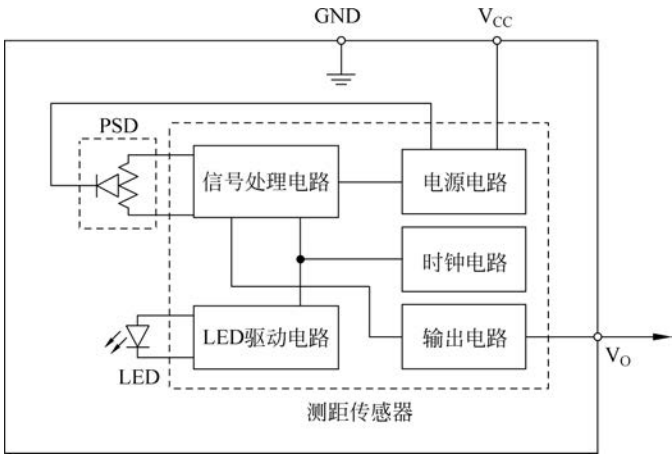


图 3.7 GP2D12 传感器的内部原理图

由 GP2D12 的数据手册(GP2D12 Application Note)可知,在 10~80cm 的测量范围内,其输出电压与反射物距离之间具有一定的关系,可通过一定的换算关系或查表的方式将传感器的输出电压转换为距离。此外,GP2D12 Application Note 中也标示了光照强度、环境温度甚至是反射物的运动形式等外界因素对传感器测距的影响,传感器的数据手册中明确地要求工作时应保持光学镜头清洁,并避免在工作环境中出现灰尘、水、油等其他影响光学传输的干扰因素。

可见,利用信号强度原理进行光学测距的红外传感器在实际应用中有一定的局限性,测距距离范围小于超声波传感器,且对测距的工作环境也有较高的要求,因此这类传感器一般

工作在清洁稳定、测距范围满足近距离要求的环境中。

3. 激光测距

超声波信号和红外光信号由于指向性较差,其信号强度会随着传播距离的增大而逐渐衰减,但激光具有高指向性、高单色性和高亮度等特点,可以实现远距离的传输和测距。激光测距主要有传播时间(Time of Flight, ToF)测距和三角反射测距两种方式。

(1) 传播时间测距,即利用激光在发射点和反射点之间的传播时间 t 计算两点之间的距离 D :

$$D = C \times t / 2 \quad (3.2)$$

其中, C 是光在测距环境中的传播速度。

普通连续发射的激光难以测量光的传播时间,因此通常采用脉冲法或相位法来测量激光在介质中的传播时间。脉冲法是指利用持续时间极短、瞬时功率极大、能量非常集中的激光脉冲进行测距的方法。该方法可以用于地形测量、战术测距、导弹轨迹跟踪,以及人造卫星、地月测距的远距离和超远距离测距。

脉冲法的测距原理如图 3.8 所示。由激光发射器发射一个短时间大功率的脉冲激光信号,该信号经过 L 距离的传播之后到达被测物体表面并被反射,反射信号被激光接收器接收,根据激光的传播时间间隔 t ,就可以得出目标物的距离。脉冲法的测距精度与激光发射器的光电转换速度、接收器的信噪比和时间计量精度密切相关。

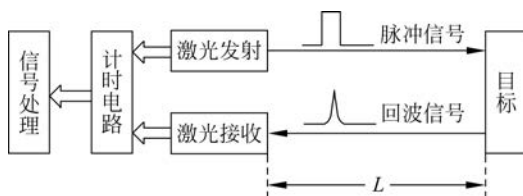


图 3.8 脉冲式激光测距原理图

相位法是利用特定信号对激光进行调制,激光在测距的过程中仅充当信号的载体,通常采用的调制信号的波长远大于激光的波长。如图 3.9 所示,调制信号周期为 λ ,调制后的激光信号在传播的过程中遇到障碍物(墙)反射后,反射光的相位会与发射光产生一定的相位差 θ ,则反射物距离 d 满足如下关系。

$$d = \theta \times \lambda / 4\pi = \theta \times c / 4\pi f \quad (3.3)$$

其中, c 为调制信号的传播速度,也即电磁波传播的速度, f 为调制信号的频率。在特定的调制信号和传播环境下, $c/4\pi f$ 是一个常数。

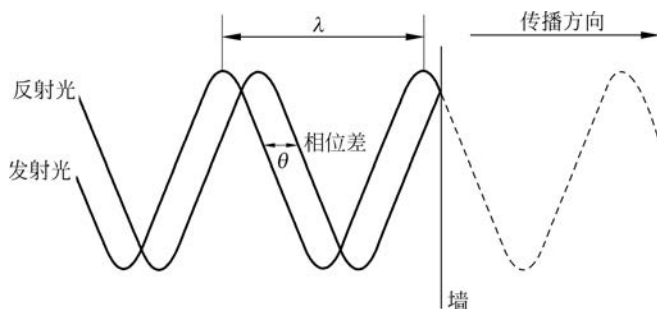


图 3.9 调制后的激光遇到障碍物反射前后的相位变化

由于测距仪无法区分 θ 所经过的完整周期,因此确定距离的基本要求是 θ 必须不足一个周期,即 $\theta < 2\pi$ 。例如,调制信号频率为 100kHz 时,若激光强度满足传播要求,则该激光测距仪的最长测距距离不会超过 1500m。

(2) 三角法测距是指利用激光位移传感器进行测距,其原理如图 3.10 所示,由激光器光源发射的激光束在经过待测物反射后,进入接收系统的反射光会呈现出一定角度的偏移,该偏移角度可以被线阵传感器所接收并测量出与接收光轴之间的距离 x ,根据三角关系即可计算出传感器到待测物之间的距离 L 。

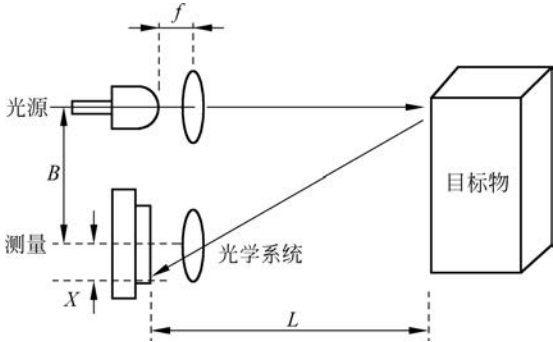


图 3.10 三角测距法原理示意图

对比脉冲法、相位法和三角法的特性,如表 3.1 所示。

表 3.1 脉冲法、相位法和三角法的特性对比

方法类型	脉冲法	相位法	三角法
测距范围	长	中	中
测距精度	中	高	高
传感器体积	小	小	大
电路系统	复杂	复杂	简单
阵列	适合	适合	不适合
抗环境干扰	高	中	低

可见,脉冲法原理简单、收发光学系统简单。远距离测距只需要增强激光功率、提升接收器灵敏度即可,但是对高精度计时的电路的要求较高。相位法同样具有原理简单、收发光学系统简单的优点,但是其测距限制较大,不能超过调制信号的一个周期,无法适用于长距离测距。三角法精度高,但容易受到外界光源的影响。

(3) 激光雷达。在激光测距领域,同样存在与声呐类似的阵列测距设备——激光雷达(Laser Detection and Ranging, LiDAR)。激光雷达的基本原理依然是脉冲法、相位法或三角法,但增加了扫描机构,使激光可以实现“上下+旋转”的扫描工作方式,通过机械旋转实现扫描的激光雷达较为传统,被称为机械式激光雷达。图 3.11 是 Velodyne 公司的 64 线激光雷达 HDL-64E 的外观和内部结构示意图,每组发射机有 16 个激光发射器,每组光学接收镜头有 32 个接收器,构成 64 条激光扫描线,在内部电路的控制下,在水平和俯仰方向上形成光学扫描。HDL_64E 激光雷达的参数如表 3.2 所示。

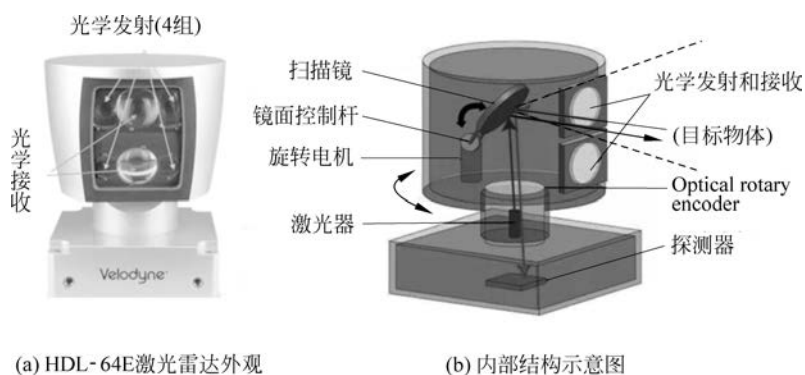


图 3.11 HDL-64E 激光雷达外观和内部结构示意图

表 3.2 HDL-64E 激光雷达的主要参数

方法类型	脉冲法
安全等级	Class1(人眼安全)
激光波长	905nm
激光线束	4 组 $\times$ 16
脉冲时间	5ns
水平视野	360°
垂直视野	26.8°
角分辨率	0.09°
距离精度	小于 2cm
距离范围	120m
扫描频率	大于 1.333 兆点/秒
扫更新频率	5~15Hz
功耗	15V, 4A
重量	13.2kg

激光雷达的主要功能参数和含义如下。

① 辐射级别。由于激光雷达多点测距是通过激光束对周围环境的不断扫描实现的,因此必须注意激光的强度,以避免在工作过程中对外界造成伤害,尤其是民用设备,如扫地机器人、无人机、自动驾驶汽车上所使用的激光雷达,辐射级别必须低于 Class 1,即人眼安全级别。

② 线束。指激光雷达在垂直视野内的分布状况,线束越多激光束越密集、垂直分辨率越高,就越能详细地描述周围的环境状况,目前常见的激光雷达线束有 16 线、32 线、64 线和 128 线等,线束越多价格越高,HDL-64E 的公开报价曾高达 70 万元人民币。

③ 水平视野。指激光雷达在水平方向上的扫描范围,一般机械式激光雷达的扫描范围都可以达到 360° ,而固态激光雷达(Solid-State LiDAR)的水平视野会有所减少,仅达到 120° 的前视方向。

④ 角分辨率。指机械式激光雷达在旋转的过程中,扫描的角度间隔。

⑤ 距离精度和距离范围。指每一个扫描点的测距特性。

⑥ 扫描频率。每秒激光雷达发射的激光点数。激光雷达的点数一般在几万点至几十

万点每秒左右。

⑦ 扫描更新频率。对机械式激光雷达而言,扫描更新频率等同于旋转的频率。

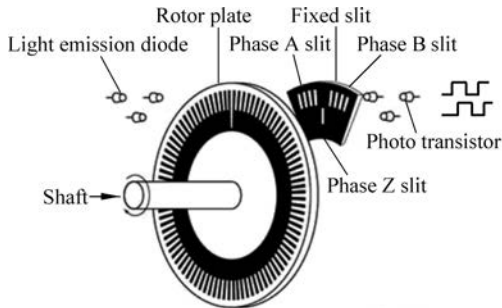
⑧ 使用寿命。采用机械旋转结构的机械式激光雷达,由于机械旋转容易导致磨损使得激光雷达的使用寿命有限,一般使用寿命为几千小时,而固态激光雷达的使用寿命可高达10万小时。

4. 旋转编码器测距

数字式旋转编码器测距属于一种间接测距设备,其测量的是旋转执行轴的旋转角度,进而计算出执行机构摆动或转动所经过的距离。旋转编码器可以分为基于光电码盘的增量式旋转编码器、绝对式旋转编码器和基于接触式的旋转电位器三种。

(1) 增量式旋转编码器。该类型编码器是机器人系统等各类精密机械结构中使用最广泛的编码器,具备结构简单、成本低、可靠性好等显著优点,其输出信号形式为每个可识别的旋转量输出一个脉冲信号。

如图 3.12(a)所示,增量式旋转编码器内部包括一套红外对射装置(包括红外发射管、一个或多个红外接收管)、一个带有一条光栅的码盘、一个用于防止光散射和干涉的掩膜。常规的增量式旋转编码器除了包括电源系统的 VCC 和 GND 之外,通常包括 A、B 和 Z 三路输出信号以及公共的 COM。当转轴带动码盘以逆时针方向旋转时,信号 B 在信号 A 的上升沿时呈现的是低电平。当转轴带动码盘以顺时针方向旋转时,则信号 B 在信号 A 的上升沿时呈现的是高电平。由此就可以判定旋转编码器转轴的旋转方向,Z 信号时旋转编码器的零点位置输出信号。



(a) 光电型增量式旋转编码器内部结构



(b) 某增量式旋转编码器外观标签

图 3.12 增量式旋转编码器内部结构和外观标识

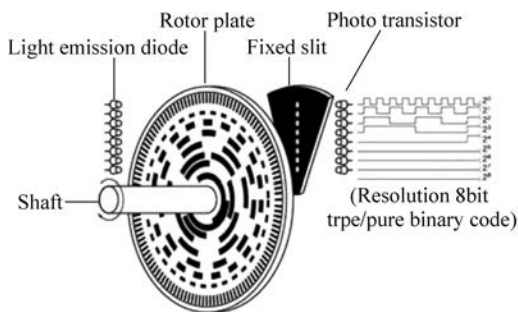
根据旋转编码器的类型不同,部分产品会对 A、B 和 Z 信号进行增减,例如,不判定旋转方向、不采集过零点信息等。此外,还有部分产品为增强信号的传输距离、增强抗干扰性能,增加了 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 和 $\bar{Z}$ 信号,用于与 A、B 和 Z 构成差分信号。如图 3.12(b)所示的增量式旋转编码器外观标签图,该传感器就采用了差分信号的输出形式,且使用差分信号可以省略信号的公共地 COM。

(2) 绝对式旋转编码器。增量式旋转编码器提供的是下一状态相对于上一个状态的增量信息,例如,旋转方向、旋转角度等,在不依靠外界电路进行统计的情况下,增量式旋转编码器是无法直接确定当前的绝对信息的,而绝对式旋转编码器则依靠码盘上的多调光通道输出当前编码器的旋转的绝对信息。

常规机械式的绝对式旋转编码器采用的是多条光栅的方式进行计数,图 3.13(a)是一个 360° 的 8 线绝对式旋转编码器的内部结构,其码盘共有 8 条光栅,当码盘旋转至 $[0^\circ, 360^\circ)$ 的任意角度时,都有一个绝对的输出值可输出其角度,角度输出的分辨率约为 1.41° 。但这种单码盘的测量范围仅限于 $[0^\circ, 360^\circ)$,无法完成多圈数值输出。

另一种能实现多圈转角输出的绝对式旋转编码器内部则通过安装减速器、多个码盘和多组红外对射装置来实现,但这种方法导致编码器结构复杂、体积增大,减速器的使用也容易导致编码器发生机械故障,影响被测物的工作稳定性。

因此,市面上已经出现了基于光学或电磁的增量式旋转编码器与微处理器系统相结合的绝对式旋转编码器,如图 3.13(b)所示为 EAB79 型穿轴磁电绝对编码器。这类编码器具有常规机械式的绝对式旋转编码器的所有功能,并且还能实现更大的计量范围和更高的计量分辨率,如 EAB79 的电气方面可以实现单圈最高 20bit 的分辨率(约 0.00034°),同时还可以实现 16bit 的多圈计数($0\sim 65535$ 圈),其精度和范围已经远超过常规机械式的性能。但 EAB79 这类编码器一旦断电,不但无法工作,还无法保存旋转位置等当前状态信息,导致系统状态丢失,难以还原。因此这类编码器一般除具有可靠的外部供电之外,还会带有备用电池,以便在意外掉电之后保存当前状态信息。



(a) 光电型绝对式旋转编码器内部结构



(b) 电子绝对式旋转编码器外观标识

图 3.13 绝对式旋转编码器内部结构和外观标识

(3) 旋转电位器。旋转电位器是一种很普通的角度计量设备,利用的是半导体材料或碳膜的电阻特性。通常具有两个接头和一个划片抽头,两个接头连接电阻的两端,划片在电阻表面移动。因此抽头与任意一端的电阻值会随着划片的运动而变化,进而改变输出电阻的大小。

旋转电位器分为单圈式(旋转角度小于 360°)和多圈式(最大转动角度超过 360°)两种。旋转电位器价格低廉,但由于划片与电阻之间是接触滑动的,长时间摩擦会导致接触不良和磨损等问题,因此旋转电位器并不适合高速运动、长期运动的场合。

5. 电磁波测距

电磁波测距是另一类典型的根据接收机接收到的信号强度计算距离的方法,又称为 RSSI(Received Signal Strength Indication)测距。电磁波测距大多基于 ZigBee、Wi-Fi 或蓝牙等无线通信设备实现,如 CC2430 和 CC2431 等。这一类射频设备通常工作在 2.4GHz 频段,具有较长的传输距离和较好的穿透性,设备本身还具备体积小、功耗低等特点。

理论上,RSSI 与距离的关系如下。

$$P_d = P_0 - \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (3.4)$$

其中, P_d 为待测距点 r 上所接收到的信号强度, P_0 为已知距离 r_0 点上的信号强度, 因此, 可以根据公式计算 r 的距离, 该公式可以表述为类似图 3.14(a) 的关系曲线。

在实际的 RSSI 测距过程中, 电磁波信号会受到各种外界环境因素的干扰, 包括反射、衍射、吸收以及多径效应等问题, 造成接收到的 RSSI 信号出现抖动, 测距距离越远、RSSI 信号越弱、出现的抖动幅度就越大, RSSI 的测距精度就越低。图 3.14(b) 中标有“■”的连线是在特定距离上测量的 RSSI 值, 可见距离稍远 RSSI 就会出现大幅波动, 波动范围甚至超过 10dBm, 对定位精度的影响也超过了 10m。造成这种问题主要是由于 ZigBee 发射功率较低, 信号在远端较弱。此外, 无线信号在长距离自由传输过程中, 传输路径周围的物体所造成的干扰叠加也会造成信号的扰动, 甚至是随时间变化的不确定性扰动。因此, RSSI 测距的工作距离较短, 一般要求 RSSI 在 -80dBm 以上才可以进行有效测距。

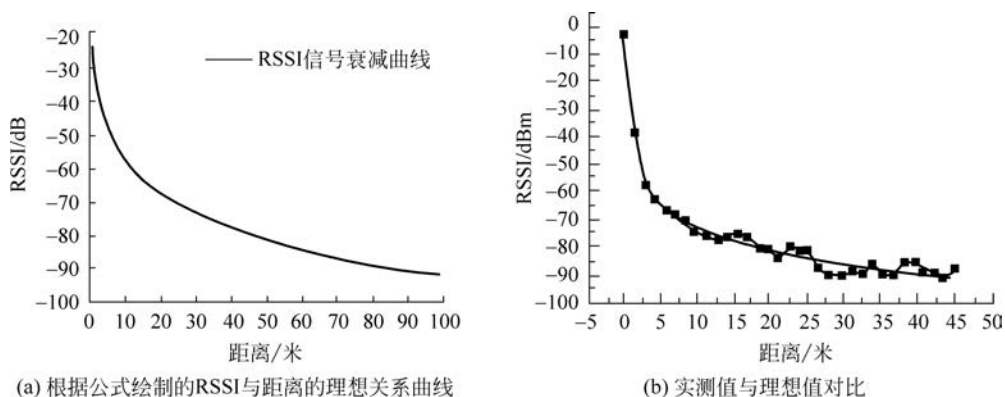


图 3.14 RSSI 与距离的关系

但 RSSI 测距的优势在于信号传输的无方向性, 即电磁波在开放空间中的自由传播特性, 使得其具备了超声波测距和红外线测距不具备的全向性, 可以简单地实现“被测传感器节点发射信号、多参照物节点同时接收”的三角定位功能。

6. 定位系统

本节所介绍的定位系统是指直接利用现有的、公开使用的、面向公众开放的定位系统, 主要特指各种卫星定位系统, 具体包括中国北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)和欧盟研制的伽利略卫星导航系统(Galileo Satellite Navigation System, GSNS 或 GALILEO), 此外还包含一些区域性的辅助定位系统, 如日本的准天顶系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)和印度的区域卫星导航系统(Indian Regional Navigational Satellite System, IRNSS)等, 以及一些针对现有定位系统的增强系统, 如美国的广域扩充系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)、日本的多功能卫星增强系统(Multi-Functional Satellite Augmentation System, MSAS)、欧盟的欧洲地球静止导航重叠服务(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS)和印度的 GPS 辅助型静地轨道增强导航(GPS Aided GEO Augmented

Navigation,GAGAN)等。上述各类卫星定位系统可以统称为 GNSS(Global Navigation Satellite System)。

这类系统的最大特点是模块化和便利性,用户只需要购买接收机或模块即可在满足定位条件时使用定位服务,而无须自行通过测距的方式解算位置信息。

目前,各类卫星定位系统虽各具差异,覆盖范围和定位精度也不一致,但现有厂商已经开发出了数量巨大的综合使用多套系统的定位模块以提升用户定位精度,如搭载了华大北斗 HD8040X 芯片的 GT-U13 GNSS 模块,其主要特性如表 3.3 所示。

表 3.3 GT-U13 型卫星定位模块的主要参数

支持系统	BDS、GPS、GLONASS、Galileo、IRNSS、QZSS、SBAS
接收频段	GPS/QZSS: L1C/A,L5C BDS: B1I,B1C,B2a,B2I,B3I GLONASS: L1 Galileo: E1,E5a SBAS,QZSS
定位精度	D-GNSS<1m CEP GNSS<2.5m CEP
启动时间	1s,热启动 小于 28s,温启动 小于 29s,冷启动
更新速度	1Hz,最大 10Hz
工作参数	高度小于 18 000m,速度小于 515m/s
支持接口	UART: 1,I ² C: 1,CAN: 1,USB: 1
数据协议	NMEA-0183 V4.0/4.1 GSA,GSV,RMC,GGA,ZDA,GLL,VTG,TXT 115 200 波特率,8 位数据位,1 位停止位
坐标系	WGS-84
尺寸	16mm×12.2mm×2.4mm

图 3.15 是 GT-U13 GNSS 模块的电路图,目前各类 GNSS 模块普遍需要使用外接有源天线。因此在电路中需要增加向有源天线(Active antenna)直流供电的元件,此外还需要用于保持数据、快速热启动的备用电池电路(V_BAKP)。尽管如此,该 GNSS 模块的外围电路仍非常简单,可以快速部署在各类移动机器人系统进行室外定位,且无需进行任何与定位相关的解算工作。

3.2.2 姿态传感器

姿态传感器是用来感知机器人本体以及相关部件与地面之间的相对关系,主要是感知相对角度的传感器。非移动式机器人或在固定轨道上运行的机器人由于位置限制,因此其姿态也相对固定。而移动式机器人由于位置可变,其姿态会随着位置的改变而发生变化,因此必须检测机器人本体和部件的姿态,以防止机器人失控或出现运动风险,以便机器人及时进行调整。



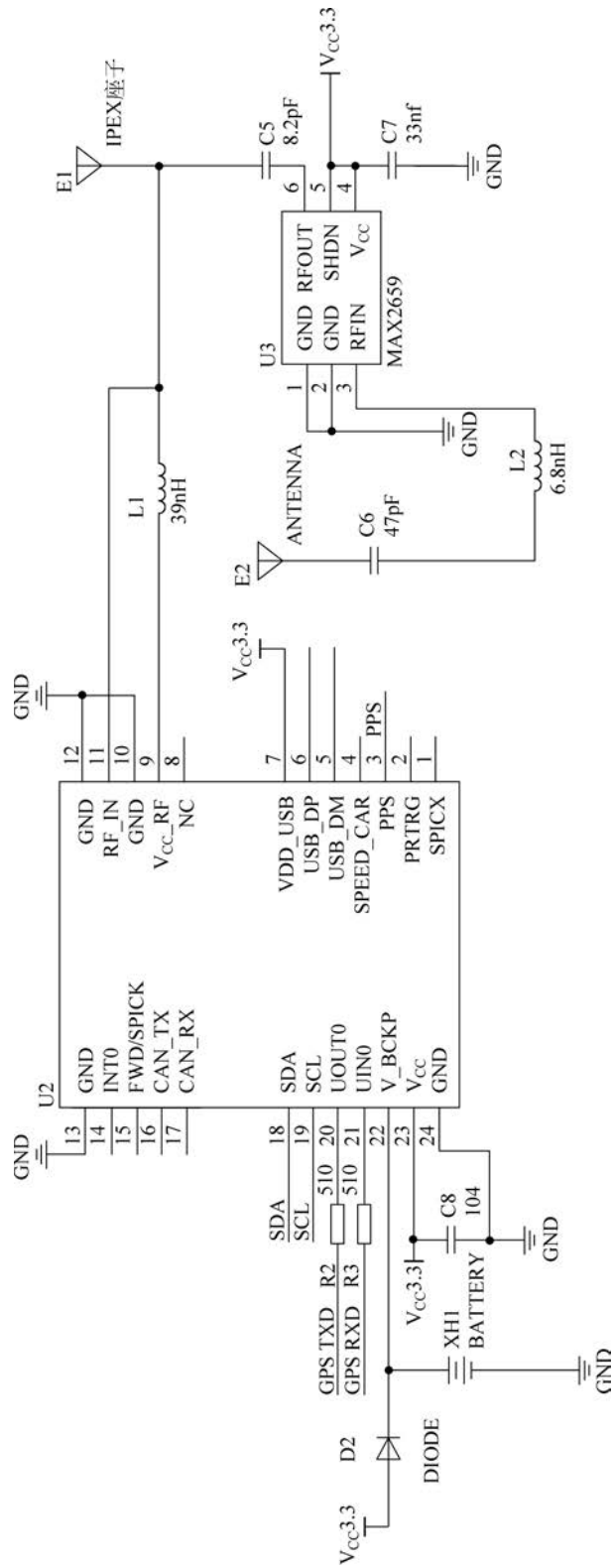


图 3.15 GT-U13 GNSS 模块使用外接有源天线的电路图

静止状态机器人姿态主要包括两类：机器人特定位置的朝向和机器人在空间中呈现的各向角度。对于在地球坐标系中的各类机器人来说，机器人特定位置的朝向通常指机器人头部在地球磁场中的指向角度，通常使用电子罗盘进行测量。机器人在空间中呈现的各向角度指机器人本体坐标系相对于地球坐标系之间的偏移角度，通常使用加速度传感器或倾角传感器进行测量，测量重力加速度 g 在机器人本体坐标系中的分量，以计算机器人的姿态。此外，处于旋转状态的机器人还需要确定其绕特定轴旋转的角速度，通常使用陀螺仪（又称角速度传感器）进行测量。

1. 电子罗盘

电子罗盘(Digital Compass)又称电子指南针，与传统的指南针功能相同，是一类用于指示方向的传感器。为了保证电子罗盘能够在任意姿态下指示方向，目前主流的 MEMS(微机电)电子罗盘通常内部安装有三个相互垂直的磁阻传感器，以保证在传感器非水平放置时仍然能够检测地球磁场相对于传感器的方向，如霍尼韦尔公司生产的 HMC5883L 等。

电子罗盘使用内部每个轴向上的磁阻传感器来检测该方向的地磁场强度，即地磁场在 3 个轴上的分量：①当电子罗盘水平放置，即俯仰角和倾斜角均为零时，使用地磁场在 X 和 Y 的分量即可计算模块的方向值；②当电子罗盘倾斜放置时，方向值的误差取决于俯仰角和倾斜角的大小。为了减小该误差的影响，通常会在系统中增加一个倾角传感器或加速度传感器，测量电子罗盘的俯仰角和倾斜角，将电子罗盘的三轴重新映射到水平平面上，映射过程可以表示为：

$$\begin{aligned} X_r &= X \cos \alpha + Y \sin \alpha \sin \beta - Z \cos \beta \sin \alpha \\ Y_r &= X \cos \beta + Z \sin \beta \end{aligned} \quad (3.5)$$

其中， X_r 和 Y_r 为要转换到水平位置的值， X 、 Y 、 Z 为三个方向的矢量值， α 为俯仰角， β 为侧倾角。可见，HMC5883L 电子罗盘在使用时，还需要配备加速度传感器，因此在部分电子罗盘中，也集成了加速度传感器的功能，如 HMC6343 等。

目前，市售的电子罗盘主要有两种，如图 3.16 所示。一种是只带有 HMC5883L 的独立模块，模块中只包含 HMC5883L 和必要的外围电路，如 LDO、电阻和电容等；另一类是多类型传感器集成模块，如 GY-58 模块，其内部集成了 HMC5883L 电子罗盘、ITG3205 陀螺仪和 ADXL345 三轴加速度传感器。

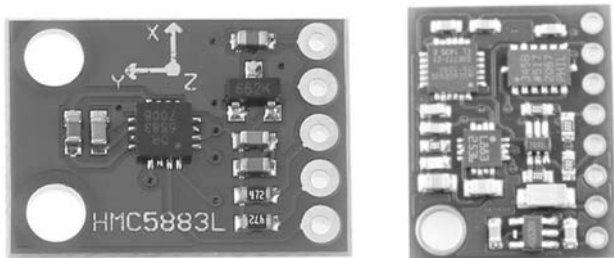


图 3.16 基于 HMC5883L 的模块和 GY-58 模块

GY-85 模块上的所有传感器都是 I^2C 总线，只需要占用微处理器的一个 I^2C 即可完成检测和通信功能。例如，将 GY-85 连接至树莓派开发板后，只需要使用 `i2cdetect` 命令检测

I²C 设备地址即可识别相应的传感器。如图 3.17 所示,其中,地址 68 对应 ITG3205 传感器,53 对应 ADXL345 传感器,1e 对应 HMC5883L 传感器。

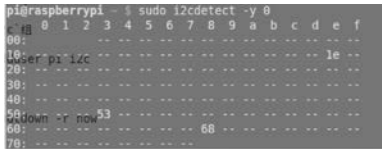


图 3.17 使用树莓派检测 GY-58 模块上的传感器

2. 倾角传感器

倾角传感器(inclinometer)在日常使用中往往被加速度传感器所替代,但在高精度要求场合,加速度传感器难以提供足够高的倾角测量性能。目前主要销售的倾角传感器是村田制作公司的 SCL3300,该传感器本质上也是加速度传感器,但在倾角测量方面进行了增强和优化,使该传感器具有了 $0.001^{\circ}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的超低噪声、 $0.0055^{\circ}/\text{LSB}$ 的角度输出分辨率,以及 $-40\sim+125^{\circ}\text{C}$ 工作温度、 1.2mA 的低工作电流和优越的机械阻尼特性,可以很好地抵御外界低频振动。因此该传感器主要应用在有较高稳定性需求的场合,如水平仪和各类机器人中。

在使用 SCL3300 传感器时,无须自行解算三轴的角度,直接读取内部寄存器并经过简单的换算即可,例如,读取 ANG_X 寄存器的值为 250F8825h,其各部分内容如表 3.4 所示。

表 3.4 ANG_X 寄存器的各段定义

OP[31:26]+RS[25:24]		Data[23:8]					CRC[7:0]
2	5	0	F	8	8	2	5

因此,OP=001001b,表示当前操作是读取 ANG_X 寄存器;RS=01b,表示当前返回的状态是无错误状态;Data=0F88h,根据传感器要求,该数据应先乘以 90,再除以 2^{14} ,即 $3976\text{d}\times 90/2^{14}=21.84^{\circ}$,CRC=25,表示 250F88h 的 CRC 校验值。

此外,SCL3300 内部还提供了读取加速度值和温度值的功能,例如:

(1) ACC_X=0500DC1Ch,其 Data=00DCh,即 220LSB,若灵敏度为 2700LSB/g ,则 X 轴上的加速度为 0.081g 。

(2) TEMPERATURE=15161E0Ah,其 Data=161Eh,即 5662d,则传感器的温度为 $-273+(5662/18.9)=26.6^{\circ}\text{C}$ 。

3. 加速度传感器

加速度传感器是一种用于测量加速度的传感器,常见的加速度传感器默认指线加速度传感器,包括电容式、电感式、应变式、压阻式、压电式等,加速度传感器广泛地应用在姿态测量和惯性导航等领域。

加速度传感器可以用来测量各类加速度,包括重力加速度和物体在运动过程中由于速度改变产生的加速度。以经典的 MEMS 加速度传感器 ADXL345 为例,该 13 位分辨率的低功耗 3 轴加速度传感器,加速度测量范围包括 $\pm 2\text{g}$ 、 $\pm 4\text{g}$ 、 $\pm 8\text{g}$ 或 $\pm 16\text{g}$,可通过 SPI 或 I²C 接口访问,最高分辨率可达 $4\text{mg}/\text{LSB}$,芯片体积仅 $3\text{mm}\times 5\text{mm}\times 1\text{mm}$,适合在各类移

动设备中使用,可以尽可能减小对设备运动的影响,如图 3.18 所示。

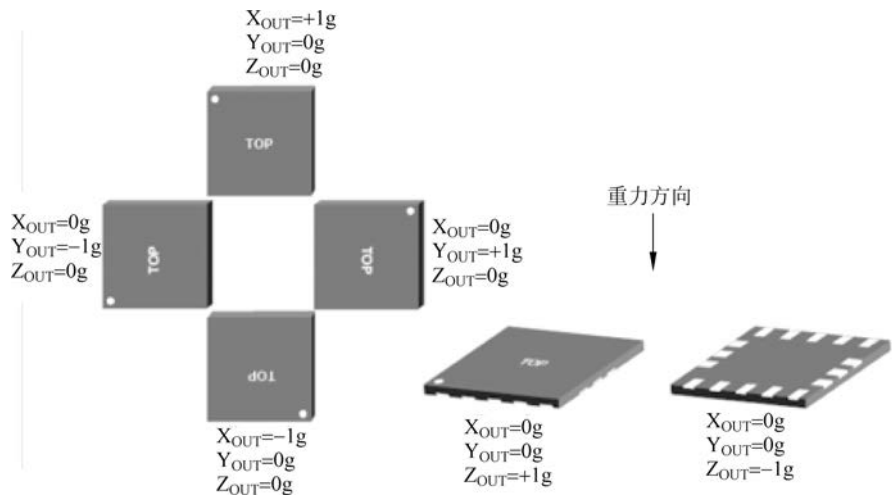


图 3.18 ADXL345 在不同姿态下由重力产生的加速度

4. 陀螺仪

陀螺仪又称角速度传感器,是一种利用高速回转体的动量矩敏感壳体相对惯性空间绕正交于自转轴的一个或两个轴的角运动检测装置。如图 3.19(a)经典陀螺仪动态原理图所示,陀螺仪中心转子在高速转动时,其旋转轴的方向在不受外力影响时不会发生改变,即保持原有方向。而万象坐标系则会随着外界设备姿态的变化而发生变化,检测旋转轴在万象坐标系中的姿态,即可获得外界设备的转动状态,目前民用设备所广泛使用的 MEMS 陀螺仪则在经典陀螺仪基础上利用科氏力的原理来实现角速度的检测。

如图 3.19(b)所示的 MPU6050 是一种经典的 6 轴运动处理传感器的 6 个测量轴,其内部集成了 3 轴 MEMS 加速度传感器和 3 轴 MEMS 陀螺仪,其陀螺仪部分测量范围有 $\pm 250\text{dps}$ 、 $\pm 500\text{dps}$ 、 $\pm 1000\text{dps}$ 或 $\pm 2000\text{dps}$,可通过 SPI 或 I²C 接口访问,工作电压为 2.375~3.46V,陀螺仪工作电流仅 3.6mA,芯片体积仅 4mm×4mm×0.9mm。

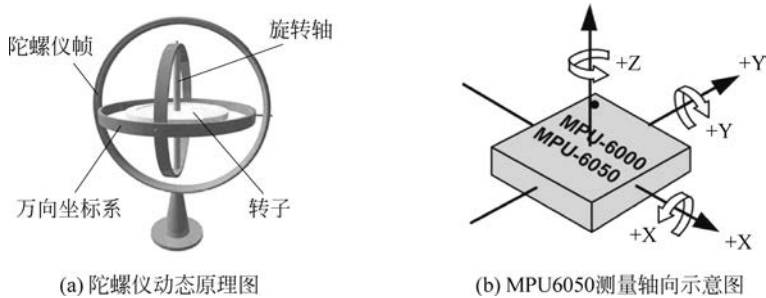


图 3.19 陀螺仪动态原理图和 MPU6050 示意图

下面以 MPU6050 为例,简要介绍其内部加速度和陀螺仪传感器的主要配置和输出寄存器的使用方法,如表 3.5~表 3.8 所示。

表 3.5 陀螺仪配置寄存器(0x1B)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
XG_ST	YG_ST	ZG_ST	FS_SEL[1:0]		—	—	—

其中,FS_SEL[1:0] 2b 用来设定陀螺仪的满量程范围。

0: 满量程±250dps。

1: 满量程±500dps。

2: 满量程±1000dps。

3: 满量程±2000dps。

表 3.6 加速度传感器配置寄存器(0x1C)

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
XA_ST	YA_ST	ZA_ST	AFS_SEL[1:0]		—	—	—

其中,AFS_SEL[1:0] 2b 用来设定加速度传感器的满量程范围。

0: 满量程±2g。

1: 满量程±4g。

2: 满量程±8g。

3: 满量程±16g。

表 3.7 陀螺仪数据输出寄存器

Register	BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
0x43	陀螺仪 X 轴输出高 8 位[15:8]							
0x44	陀螺仪 X 轴输出低 8 位[7:0]							
0x45	陀螺仪 Y 轴输出高 8 位[15:8]							
0x46	陀螺仪 Y 轴输出低 8 位[7:0]							
0x47	陀螺仪 Z 轴输出高 8 位[15:8]							
0x48	陀螺仪 Z 轴输出低 8 位[7:0]							

可见,陀螺仪输出的数值为 16 位,当 FS_SEL[1:0]设置为 3,即满量程范围为±2000dps 时,传感器的灵敏度为 $65\ 536/4000=16.4\text{LSB/dps}$ 。

表 3.8 加速度传感器数据输出寄存器

Register	BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
0x3B	加速度传感器 X 轴输出高 8 位[15:8]							
0x3C	加速度传感器 X 轴输出低 8 位[7:0]							
0x3D	加速度传感器 Y 轴输出高 8 位[15:8]							
0x3E	加速度传感器 Y 轴输出低 8 位[7:0]							
0x3F	加速度传感器 Z 轴输出高 8 位[15:8]							
0x40	加速度传感器 Z 轴输出低 8 位[7:0]							

可见,加速度传感器的输出数值也为 16 位,当 AFS_SEL[1:0]设置为 0,即满量程范围为±2g 时,传感器的灵敏度为 $65\ 536/4=16\ 384\text{LSB/g}$ 。

与加速度和陀螺仪相关的寄存器还包括电源管理寄存器(0x6B 和 0x6C)、陀螺仪采样率分频寄存器(0x19)和配置寄存器(0x1A)等。此外,MPU6050 内部还设置了温度传感器,其输出寄存器为高 8 位 0x41 和低 8 位 0x42,温度计算方法为

$$\text{Temperature} = 36.53 + \text{Output_Value} / 340$$

尽管 GY-58 模块集成了 3 轴电子罗盘、3 轴加速度传感器和 3 轴陀螺仪,构成了一种“9 轴传感器模块”,但其分立传感器总体积大、功耗高。目前已经有厂商推出了集成化的 9 轴传感器芯片,如 MPU9250、BMX055 等。其中,BMX055 的加速度测量量程有 $\pm 2g$ 、 $\pm 4g$ 、 $\pm 8g$ 和 $\pm 16g$ 四种级别、陀螺仪测量量程有 $\pm 125\text{dps}$ 、 $\pm 250\text{dps}$ 、 $\pm 500\text{dps}$ 、 $\pm 1000\text{dps}$ 和 $\pm 2000\text{dps}$ 五个级别、磁场测量 x 和 y 轴量程 $\pm 1300\mu\text{T}$ 、 z 轴量程 $\pm 2500\mu\text{T}$,工作电压 $2.4\sim 3.6\text{V}$,芯片体积仅 $3\text{mm}\times 4.5\text{mm}\times 0.95\text{mm}$ 。

3.2.3 触感和压力传感器

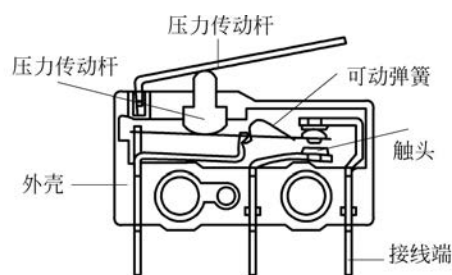
人类皮肤的感知都是定性却无法定量的。而触觉传感器可以模仿人类皮肤的接触功能,甚至可以把温度、湿度或压力等感觉用定量的方式表达出来,可以帮助残者获得失去的感知能力。触觉传感器的主要检测功能包括对操作对象的状态、操作对象的接触状态、操作对象的物理性质进行检测,而识别功能是在检测的基础上提取操作对象的形状、大小、刚度等特征,以进行分类和目标识别,这也是触觉的广义定义。而狭义的触觉的定义主要指接触和由于接触所产生的力。因此,现有的触觉传感器也主要以接触感知和接触后的压力等测量为主,如图 3.20(a)所示。

(1) 机器人触觉传感器。触觉传感器是一种用以判断机器人是否接触到外界物体或测量被接触物体的特征的传感器,包括微动开关式、导电橡胶式、含碳海绵式、碳素纤维式和气动复位式等。其中,微动开关式触觉传感器由弹簧和触头构成,触头接触外界物体后离开基板造成信号通路断开或闭合,从而测到与外界物体的接触,其原理如图 3.20(b)所示。

但各种触觉传感器只能表达接触状态的“是”或者“否”,从传感器的设计原理出发,其所实现的接触感知也需要一定压力才能够实现,压力不足时是无法检测到接触的,且触觉传感器无法测量接触所产生的压力大小。



(a) 通过触觉传感器感知吸管的机械手



(b) 微动开关的内部结构图

图 3.20 触觉传感器的应用和内部结构图

(2) 压觉传感器。相对于接触觉传感器,压觉传感器可以测量接触时所产生的压力和压力的分布,有助于机器人对接触对象的几何形状和硬度进行识别。

如图 3.21(a)所示是以压敏导电橡胶为基本材料的压觉传感器。在导电橡胶上面附有

柔性保护层,下部装有玻璃纤维保护环和金属电极。在外压力作用下,导电橡胶电阻发生变化,使基底电极电流相应变化,从而检测出与压力成一定关系的电信号及压力分布情况。通过改变导电橡胶的渗入成分可控制电阻的大小,例如,渗入石墨可加大电阻,渗碳、渗镍可减小电阻,通过合理选材和加工可制成高密度分布式压觉传感器。这种传感器可以测量细微的压力分布及其变化,故也被称为“人工皮肤”。

(3) 滑觉传感器。滑觉传感器用于检测在垂直于握持方向物体的位移、旋转和由重力引起的变形等,以达到修正受力值、防止滑动、进行多层次作业及测量物体重量和表面特性等。

滑觉传感器是用于检测物体接触面之间相对运动大小和方向的传感器,它用于检测物体的滑动。例如,利用滑觉传感器判断是否握住物体,以及应该使用多大的力等。当手指夹住物体时,物体在垂直于所加握力方向的平面内移动。如图 3.21(b)所示,该传感器将滑动转换成滚球和滚柱的旋转,用压敏元件和触针,检测滑动时的微小振动。检测出发生滑动时,手爪部分的变形和压力通过手爪载荷检测器,检测手爪的压力变化,从而推断出滑动的大小等。

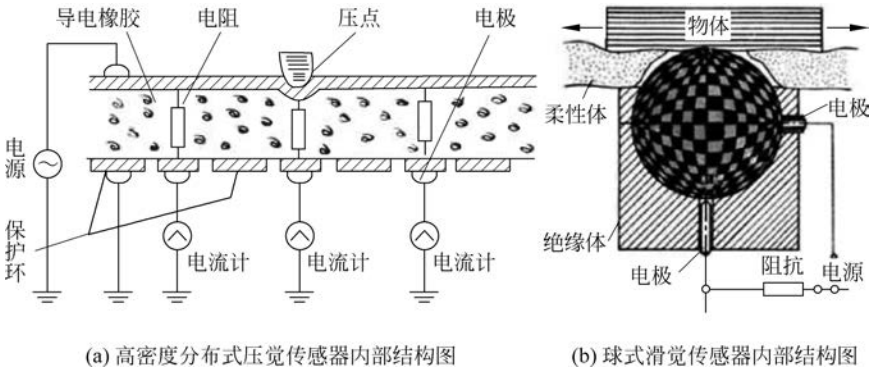


图 3.21 压觉传感器和球式滑动传感器内部结构图

(4) 薄膜式压力传感器。薄膜式压力传感器是一种厚度极薄、具有柔性,且可以根据被测量物体形状定制分布测量的测量工具。薄膜式压力传感器通常由两片很薄的聚酯薄膜组成,两片薄膜内表铺设导体及半导体。当外力作用到传感点上时,其阻值会随着外力成规律变化,压力为零时,阻值最大,压力越大,阻值越小。通过在不同的地方放置不同密度的传感器点,可以实现不同的空间分辨率,不同的传感器面积和空间分辨率可以满足各种不同的测量要求,如图 3.22 所示。

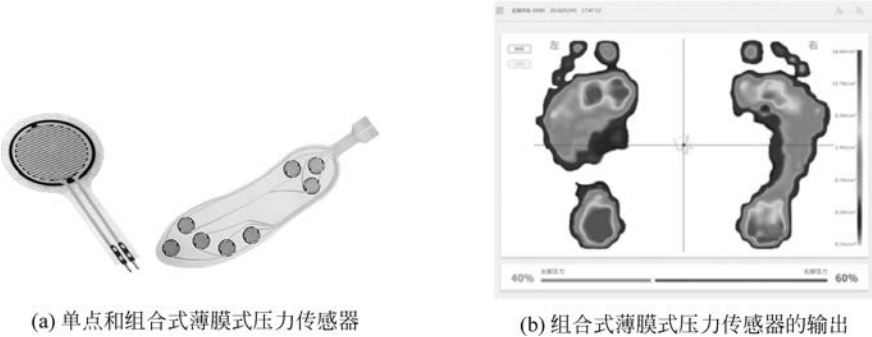


图 3.22 薄膜式压力传感器

(5) 压力传感器。薄膜式压力传感器受到结构和材料的限制,无法形成大量程的产品,而传统的压力传感器,包括圆柱形拉压传感器、S型拉压传感器和螺纹拉压传感器等,其量程范围可达数千牛。在使用时,根据测量形式、测量量程、测量精度和信号形式进行选择即可。

3.2.4 图像传感器

图像传感器包括各类以图像形式获取外界状态的设备,从图像传感器的感光技术上,可以分为 CCD(Charge Coupled Device,电荷耦合器件)和 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor,互补金属氧化物半导体)两类。CCD 传感器响应慢、功耗高、噪点低、均匀、画质高、ISO 较高,而 CMOS 响应快、功耗低、噪点高、不均匀、画质受噪声影响多、ISO 较小。两者主要特性对比如下。

(1) 信息读取方式。CCD 电荷耦合器存储的电荷信息需在同步信号控制下一位一位地实施转移后读取,电荷信息转移和读取输出需要有时钟控制电路和三组不同的电源相配合,整个电路较为复杂。而 CMOS 光电传感器经光电转换后直接产生电流(或电压)信号,信号读取方式简单。

(2) 速度。CCD 电荷耦合器需在同步时钟的控制下,以行为单位一位一位地输出信息,速度较慢;而 CMOS 光电传感器采集光信号的同时就可以取出电信号,还能同时处理各单元的图像信息,速度比 CCD 电荷耦合器快。

(3) 电源及耗电量。CCD 电荷耦合器大多需要三组电源供电,耗电量较大,而 CMOS 光电传感器只需使用一个电源,耗电量非常小,仅为 CCD 电荷耦合器的 $1/8 \sim 1/10$,CMOS 光电传感器在节能方面具有很大优势。

(4) 成像质量。CCD 电荷耦合器制作技术起步早,技术成熟,采用 PN 结或二氧化硅(SiO_2)隔离层隔离噪声,成像质量相对 CMOS 光电传感器有一定优势。而 CMOS 光电传感器集成度高,各光电传感元件、电路之间距离很近,相互之间的光、电、磁干扰较严重,噪声对图像质量影响很大。

若从摄像头的感光元件数量上进行分类,则可以分为各种单目摄像头、多目摄像头、线阵图像传感器,以及激光雷达等点阵类传感器。

1. 单目摄像头

日常生活的各类设备中所使用的各类摄像头通常都属于单目摄像头,包括笔记本电脑摄像头、安放监控摄像头,以及智能手机的前置摄像头和后置摄像头。尽管目前智能手机已经普遍安装了两个甚至两个以上的后置摄像头,但绝大多数手机所装配的是不同光圈或不同焦距摄像头,以实现不同的拍摄效果。单目摄像头系统拍摄时只采用一个摄像头进行拍摄,并非使用多个摄像头同时拍摄立体图像或具有景深信息的图像。

从普通单目摄像头可知,摄像头的常规通信接口包括常见的 USB 接口、有线网络接口、Wi-Fi、BNC 接口和各类面向微处理器系统的接口,如 MIPI(Mobile Industry Processor Interface,移动行业处理器接口)、DVP(Digital Video Port,数字视频端口)和 LVDS(Low Voltage Differential Signaling,低电压差分信号),以及基于 GPIO 的与微处理器和 MCU 相连接的各类接口等。

从传输信号的形式分类,主要有模拟信号和数字信号两种。模拟信号容易实现,但通信

信号在传输的过程中容易受到内部和外部的噪声干扰,且通信保密性能差,容易被窃听,而数字通信则可以避免上述问题。但是,信号形式一般与接口形式无关。例如,BNC 接口既可以传输 CVBS,又可以传输 HDTV 数字高清视频等信号。

微处理器或计算机系统在与各类摄像头连接时,只要遵循接口与协议相适配,即可获得相应的静态图像帧或视频流。以树莓派通过板载的 CSI 连接摄像头为例,如图 3.23 所示,安装好 CSI 接口摄像头模块后,使用 Raspberry Pi 配置工具开启 Camera 即可使用摄像头。



图 3.23 树莓派通过 CSI 接口连接摄像头及系统配置

使用树莓派在命令行模式下执行 `raspistill` 命令即可获取摄像头采集的静态图像:

```
# raspistill -o Desktop/image.jpg
```

执行后,即可弹出摄像头的预览画面,且在预览结束后拍摄一张静止图像,并保存在桌面上,名字为 `image.jpg`。

使用 `raspivid` 命令还可以获取摄像头的视频流:

```
# raspivid -o Desktop/video.mp4
```

执行后,将调用 `Camera Module` 模块将摄像头的视频流保存在桌面上,名字为 `video.mp4`,通过 `VLC` 等软件即可播放该视频。

2. 多目摄像头

多目摄像头指通过两个或两个以上的摄像头同时工作,形成立体视觉,从而在拍摄图像或视频的同时,输出更多的与真实世界环境相关的信息,尤其是目标物的深度信息,即测距功能。

以双目摄像头为例,其测距步骤包含相机标定、双目校正、双目匹配和计算深度信息四个步骤。

(1) 相机标定指为了消除光学透镜的径向成像畸变、传感器与光学镜头的装配误差导致的切向畸变问题,使用特定规格和图形的定标板(通常是黑白的实心圆阵排列图案或国际象棋棋盘图案)测量双目摄像头的参数,如将棋盘格的顶点与图像上的对应点建立对应关系,利用棋盘格的已知信息来求得相机模型的内外参数和畸变系数。

(2) 双目校正即利用标定后获得的内参数据和双目相对位置关系(旋转矩阵和平移向量),分别对左右视图进行消除畸变和行对准,使得左右视图的成像原点坐标一致。两摄像头光轴平行、左右成像平面共面、对极线行对齐。因此,同一幅图像上任意一点与其在另一

幅图像上的对应点必然具有相同的行号,只需在该行进行一维搜索即可匹配到对应点。

(3) 双目匹配指把同一场景在左右视图上对应的像点匹配起来,即可得到视差图。双目匹配被普遍认为是立体视觉中最困难也是最关键的问题,得到视差数据,通过上述原理中的公式就可以很容易地计算出深度信息。

双目视觉是模拟人类视觉原理,使用计算机被动感知距离的方法。从两个或者多个点观察一个物体,获取在不同视角下的图像,再根据图像之间像素的匹配关系,通过三角测量原理计算出像素之间的偏移来获取物体的三维信息。

树莓派系统也可以通过 StereoPi 连接双目摄像头实现双目拍摄和景深测量功能,如图 3.24 所示。



图 3.24 StereoPi 模块及输出信息

StereoPi 所连接的每个摄像头的分辨率为 $640 \times 480\text{px}$,因此通过 `raspistill` 命令拍摄双目图像应设定为:

```
# raspistill -3d sbs -w 1280 -h 480 -o Desktop/image.jpg
```

其中, `-w` 和 `-h` 参数指定了到桌面上的输出图片大小, `-3d sbs` 参数指输出双目立体图像 (stereoscopic)。

(3) 线阵摄像头。常用的摄像头属于面阵型,其输出图像的长宽比近似,如 $4:3$ 、 $16:9$ 或 $21:9$ 等。而线阵摄像头属于线阵型,其输出的图像呈线型,长度可达上千像素,宽度一般只有几个像素,线阵摄像头通常使用在需要极大视野且视野可被视为细长的带状的场合。

如图 3.25(a)所示是 Alphalas 公司生产的高速数字线阵 CCD 相机 CCD-S3600-D-UV,该传感器有效像素 3648px ,每个像素 $8\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$,传感器有效长度 $3648 \times 8\mu\text{m} = 29.184\text{mm}$;如图 3.25(b)所示的 S15351-2048 线阵传感器,该传感器有效像素 2048px ,每个像素 $14\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 。

(4) 激光雷达 (LiDAR)。激光雷达采用激光测距原理配合不同的移动方式对周围环境进行扫描,最终形成周围环境的点云图像。从该角度出发,激光雷达也属于一种不能够感知环境颜色和照度,但能感知环境距离的特殊图像传感器。

目前,激光雷达已经应用在 iPhone 和部分自动驾驶技术上。iPad Pro 2020 和 iPhone 12 上所集成的 LiDAR 能够在地图绘制、三维建模、体积测定等场景下进行高精度测量,还可以与摄像头图像进行结合,实现 AR 等功能,如图 3.26 所示,利用 iPhone 上的 LiDAR 和光

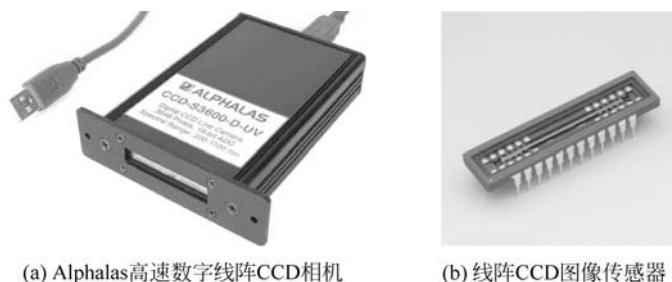


图 3.25 两种线阵 CCD

学摄像头联合生成关于汽车的三维模型信息, LiDAR 生成模型的景深信息、光学摄像头拍摄图像生成模型的颜色信息, 构成带有色彩的三维模型, 再将模型以 AR 的形式叠加在现实图像中, 图 3.26(b) 中间位置的汽车即为虚拟三维模型。

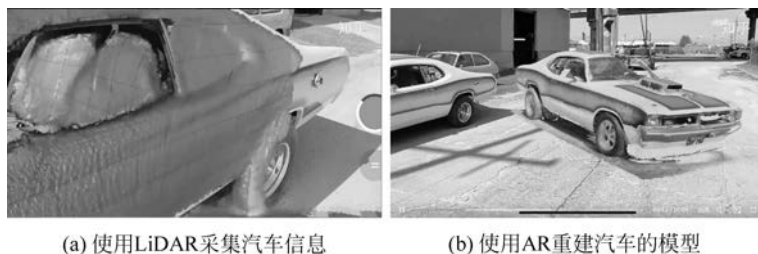


图 3.26 通过 iPhone 对汽车进行立体建模并复制

自动驾驶技术中的 LiDAR 则可以稠密且精确地获取汽车周围三维空间中物体的点云数据, 帮助车辆实现定位和障碍物的跟踪。LiDAR 也是一种实现完全自动驾驶的核心传感器, 如图 3.27 所示, 通过激光雷达可以构建周边环境信息。

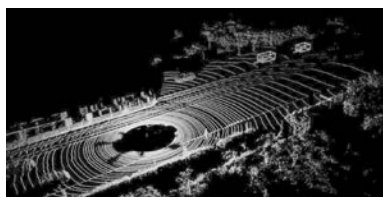


图 3.27 通过车顶激光雷达生成的环境点云图像以及目标识别标注

激光雷达所产生的三维点云数据的处理主要包括点云滤波、关键点提取、特征描述、点云匹配、点云分割与分类、SLAM 优化、目标识别和三维重建等, 此外还包括数据的存储等工作。

3.2.5 电路状态传感器

机器人系统中的电路状态传感器主要用于测量电路中的电压和电流, 以保证系统有足够的能量供应且不超出限定功率。其中, 电流检测部分已经在 1.3.3 节中进行了介绍, 如 Allegro MicroSystems 公司推出的 ACS714、ACS758 和 A1360 系列霍尔电流传感器, 即可用于检测系统中各个部件的工作电流。机器人系统的电压检测较为简单, 可采用电阻分压原理获取满足 AD 量程的电压值即可。

电路状态传感器也可以使用集成有电流和电压感知功能的集成芯片,如 INA226 等。INA226 是一款功率检测器,具有线电压检测、采样电阻电压检测、采样电阻电流检测和功率计算功能,通过 I²C 接口与微处理器通信。在使用 INA226 时,配置好配置寄存器(Configuration Register,地址 0x00,写入 0x4127 即可)后,即可通过读取对应地址的寄存器获得采样结果,其主要寄存器如下。

(1) 0x01: Shunt Register,采样电阻上的压降,满量程范围为 0~81.92mV,最小测量单位为 2.5 μ V。

(2) 0x02: Bus Voltage Register,线上电压,满量程范围为 0~40.96V,最小测量单位为 1.25mV。

(3) 0x03: Power Register,功率寄存器,最小计算单位 25mW。

(4) 0x04: Current Register,电流寄存器,最小测量单位 1mA。

3.2.6 其他传感器

除了上述介绍的距离传感器、姿态传感器和压力传感器等与机器人密切相关的传感器之外,机器人系统中还会使用其他各类传感器,主要包括如下几类。

1. 温度湿度传感器

机器人的电子设备在工作过程中会产生一定的热量,在使用外壳包裹的情况下热量会难以耗散,导致舱内温度过高或湿度过高,导致机器人稳定性下降等问题,因此必须要对机器人进行温度和湿度监控。

传统的温湿度监控往往采用热电偶的方式,但这种模拟电路需要大量的外围元件构成电路并输出模拟信号,占用了大量空间,稳定性也相对较差,而新型的数字传感器则可以在更小的体积、更简单的电路、更低的功耗下实现更简单的控制和测量。目前这一类集成的数字温湿度传感器类型较多,主要包括瑞士 Sensirion 的 SHT 系列产品、广州奥松电子的 DHT 和 AHT 系列产品等,部分产品的性能指标如表 3.9 所示。

表 3.9 常用温湿度传感器的基本参数

型 号	SHT20	DHT11	AHT10	Si7021-A20
工作电压	2.1~3.6V	3.3~5.5V	1.8~3.6V	1.9~3.6V
工作电流	300 μ A	1mA	23 μ A	150 μ A
湿度分辨率	0.04%RH	1%RH	0.024%RH	0.025%RH
湿度精度误差	$\pm 3\%$ RH	$\pm 5\%$ RH	$\pm 2\%$ RH	$\pm 2\%$ RH
湿度迟滞	$\pm 1.0\%$ RH	$\pm 0.3\%$ RH	$\pm 1.0\%$ RH	$\pm 1.0\%$ RH
湿度非线性	$<0.1\%$ RH	—	$<0.1\%$ RH	—
湿度响应时间	8s $\tau_{63\%}$	$<6s$ $\tau_{63\%}$	8s $\tau_{63\%}$	—
湿度量程	0%~100%RH	5%~95%RH	0%~100%RH	0%~100%RH
温度分辨率	0.01 $^{\circ}$ C	0.1 $^{\circ}$ C	0.01 $^{\circ}$ C	0.01 $^{\circ}$ C
温度精度误差	$\pm 0.3^{\circ}$ C	$\pm 2.0^{\circ}$ C	$\pm 0.3^{\circ}$ C	$\pm 0.3^{\circ}$ C
温度迟滞	—	$\pm 0.3^{\circ}$ C	$\pm 0.1^{\circ}$ C	—
温度响应时间	5~30s $\tau_{63\%}$	$<10s$ $\tau_{63\%}$	5~30s $\tau_{63\%}$	—
温度量程	-40~125 $^{\circ}$ C	-20~60 $^{\circ}$ C	-40~85 $^{\circ}$ C	-40~125 $^{\circ}$ C
通信接口	I ² C	单总线	I ² C	I ² C

各传感器外观或安装有传感器的模块如图 3.28 所示。

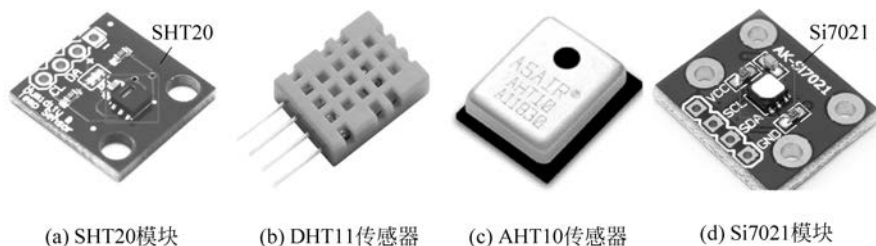


图 3.28 SHT20 模块、DHT11、AHT10 和 Si7021 模块外观

2. 光照度传感器

传统的光照传感器有光敏二极管、光敏三极管和光敏电阻,以及新型集成式全数字光照传感器。传统光照传感器需要依靠外部模拟电路对信号进行放大等预处理后才能进行 AD 转换,转换为数字信号提供给微处理,该过程所构建的外部电路容易受到外界干扰、器件精度和温度漂移的影响,且体积较大。

集成式全数字光照传感器则可以有效减少或避免上述问题,以常见的数字式光照传感器 BH1750FVI 为例,该传感器支持 2.4~3.6V 的低压供电、消耗功率仅 260mW、体积仅 3.0mm×1.8mm×0.75mm,甚至小于普通光敏二极管的体积,传感器支持 I²C 通信协议,测量量程 1~65 535lx,并可以抑制 50Hz 或 60Hz 的灯光频闪,支持两种精度和两种测量模式,在工作时也不需要额外元件辅助。

3. 气体传感器

气体传感器也可以分为模拟传感器和数字传感器两类。模拟传感器主要指常规的电化学传感器。电化学气体传感器(Electrochemical Gas Sensor)是把测量对象气体在电极处氧化或还原再测量电流,进而得出被测气体浓度的传感器,可测量的气体包括一氧化碳和二氧化碳等。这类传感器有两个或者两个以上与电解液接触的电极,电极由大表面积贵金属和多孔厌水膜组成,电极和电解液与周围空气接触,并由多孔膜监测,被监测气体通过多孔膜背面扩散入传感器的工作电极,在此气体会被氧化或还原,这种电化学反应引起流经外部线路的电流,电流经过放大和其他处理后对外输出,传感器之外的各类放大和处理电路都需要用户自行搭建和调试。

目前,国产电化学传感器主要有炜盛电子科技的 ME 系列传感器等,包括 MEu-2CO 一氧化碳气体传感器、MEu-H₂S 硫化氢气体传感器、ME3-ETO 环氧乙烷传感器、ME3-CL₂ 氯气传感器和 ME3-HF 氟化氢传感器等。以 MEu-H₂S 为例,该传感器满量程范围 0~100ppm、响应时间小于 15s,该传感器如图 3.29(a)所示。但与温湿度、光照和姿态等传感器不同,电化学类传感器会因为内部电解液的消耗导致传感器准确性降低或失效,因此这类传感器普遍会标注预期使用寿命和存储时间,如 MEu-H₂S 在空气中的预期使用寿命只有 2 年,在原包装中的储存时间也少于 6 个月,而且在使用前还需要进行不少于 48h 的老化操作,这些问题都严重限制了电化学传感器的应用范围和有效工作时间。

数字气体传感器则是基于各类非消耗测量方法进行工作的,目前主要是各种光学测量方法。以攀藤科技公司生产的 DS-CO₂-20 型二氧化碳传感器为例,该传感器的有效量程范围 0~3000ppm、分辨率可达 1ppm、平均无故障工作时间可达 3 年以上,使用时只需要供

电,就可以从传感器的串行通信口直接接收测量结果,该传感器如图 3.29(b)所示。除二氧化碳传感器之外,该公司还生产了 PMSx00x 系列 PM2.5 传感器、HOCO 甲醛传感器和 PQTS 多合一气体传感器模组(颗粒物、二氧化碳、甲醛、VOC 和温湿度)等,其通信协议也以串行通信口或 I²C 为主,可以方便地连接各类微处理器。



图 3.29 MEu-H2S 硫化氢气体传感器和 DS-CO2-20 型二氧化碳传感器

4. 霍尔传感器

霍尔传感器是根据霍尔效应制作的一种磁场传感器,霍尔效应是磁电效应的一种,本质上是运动的带电粒子在磁场中受洛仑兹力作用引起的偏转,当带电粒子(电子或空穴)被约束在固体材料中时,这种偏转就会导致在垂直磁场的方向上产生正负电荷的聚积,从而形成附加的横向电场,该电场经过放大和检测等处理后作为霍尔传感器的输出。

基于霍尔效应所制成的传感器主要有霍尔电流传感器和霍尔开关两类,前述介绍的 ACS712 就是一种霍尔电流传感器。霍尔开关属于一种接近开关,当磁性物件移近霍尔开关时,开关检测面上的霍尔元件因产生霍尔效应而使开关内部电路状态发生变化,以识别附近有磁性物体存在,进而控制开关的通或断,霍尔开关的检测对象必须是磁性物体。与其他接近开关的输出类似,霍尔开关的输出也分为 NPN、PNP、常开型、常闭型、锁存型(双极性)和双信号输出等。

3.3 传感器的信息融合技术



信息融合概念始于 20 世纪 70 年代,源于军事领域的 C3I(Command、Control、Communication and Intelligence)系统的需求,中文称为多源相关技术或传感器信息融合技术。早在 1983 年,美国国防高级研究计划局(DARPA)就已经在战略计算机计划中将多传感器信息融合列为重大研究课题。次年,美国国防部(DOD)成立数据融合专家组,负责指导、组织并协调有关这一国防关键技术的系统研究,1988 年又将其列入国防部 22 项关键技术之一。英、日、德以及欧共体等国家也在同期开展了相关研究。我国在信息融合领域的研究起步较晚,该技术在 1991 年海湾战争之后才引起国内专家和有关单位的高度重视,一些高校和科研院所陆续对信息融合的理论、系统框架和融合算法开展了大量研究,但在工程领域仍有大量关键技术亟待解决。

随着研究的深入和技术的发展,传感器信息融合技术已经形成成为一种信息综合处理技术,广泛地应用在机器人、智能检测、自动控制和智能医疗等诸多领域。该技术对于促进机

机器人技术的智能化发展、自主化进步有着重要的作用,是协调系统中多个传感器数据、消除传感器之间矛盾、弥补传感器部署不足、降低传感器数据不确定性、提升感知系统可靠性、获得系统感知一致性信息的重要技术,目前广泛地应用在导航、定位、环境识别等领域。

综上,多传感器信息融合技术(Multi-Sensor Information Fusion, MSIF)的定义如下:利用不同时间和空间的多个传感器的信息资源,采用计算机技术对信息在一定的准则下加以自动分析、综合、支配和使用,获得被测对象的一致性解释与描述,以完成所需的决策和估计任务,提升系统的感知性能。可见,传感器信息融合技术就像人的大脑综合处理信息的过程一样,将各种传感器进行多层次、多空间的信息互补和优化组合处理,最终产生对观测环境的一致性解释。在这个过程中要充分地利利用多源数据进行合理支配与使用,而信息融合的最终目标则是基于各传感器获得的分离观测信息,通过对信息多级别、多方面组合导出更多有用信息。该过程不仅可以利用多个传感器相互协同操作的优势,而且也可以使用其他信息源的数据来提高整个传感器系统的智能化水平。

传感器信息融合技术主要涉及如下概念。

(1) 硬件同步。使用同一种硬件同时发布触发采集命令,实现各传感器采集、测量的时间同步,做到多个传感器在同一时刻采集信息。

(2) 时间同步。通过统一的主机给各个传感器提供基准时间,各传感器根据已经校准后的各自时间为各自独立采集的数据加上时间戳信息,可以做到所有传感器时间戳同步,但由于各个传感器各自采集周期依然相互独立,难以保证同一时刻采集相同的信息。

(3) 空间同步。将不同传感器坐标系的测量值转换到同一个坐标系中,例如,LiDAR在高速移动的情况下需要考虑当前速度下的帧内位移校准问题。

按照传感器信息融合发生在信息传输过程中的位置,信息融合可以分为以下几种。

(1) 源端融合。源端融合又称感知融合,指数据在采集阶段即进行判断和识别,形成融合后的数据再输出。源端融合处理方法简单、待融合数据量小,因此源端融合的数据必须是同质数据、针对同一个物理现象进行的检测。

(2) 特征融合。特征融合又称中级融合,其融合的特点是对多传感器产生的数据进行特征提取,仅对兴趣特征进行融合处理。

(3) 决策融合。决策融合又称高级融合,不同类型的传感器对同一目标进行观测,每个传感器自身完成基本处理之后,将数据交由决策层进行关联处理等其他处理,得出联合判断的结果。

可见,对多个传感器的信息实施综合处理,可以获得准确、全面的结果。与单个信源的单独处理相比,多传感器信息融合具有如下显著优点。

(1) 提高系统的测量精度。对具有不同精度的多个独立的传感器采用合理的融合算法,能够显著地提高整个系统的测量精度。

(2) 改进探测性能,提高可信度。多传感器信息经融合后,估计精度提高明显,使探测更加有效。同时,由于多传感器提供信息的冗余性,使传感器之间信息可以相互得到确认,从而提高了探测信息的可信度。

(3) 增大系统的时间和空间范围。不同的传感器在不同时域、空域上的探测范围的互补性,经多传感器融合后能够扩大系统的时空覆盖范围。

(4) 使系统对态势的感知及推断的能力得到增强,同时提升响应速度。将多源或多传

传感器的信息进行综合后,能够得到关于整个态势的更具体、更详细的知识,从而有助于做出更合理的推断和更及时的响应。

(5) 增强系统的稳定性和可靠性,降低估计的不确定性。单传感器系统的稳定性一般较差,若该传感器出现故障将导致整个系统的性能降低或不能正常工作。而融合了多个信源的多传感器系统的稳定性,相比单传感器系统的要提高了很多。由于多源信息的冗余性,使得融合系统的故障容错的能力增强。另外,通过综合多传感器的信息,能够将一些没用的虚假的信息排除掉,从而降低了系统的不确定性。

(6) 使系统成本大大降低。可以使用许多个低成本的传感器,而不是采用少数的几个高成本传感器,构建融合系统,采用合适的融合算法就可以获得更高品质的信息,从而使系统的成本得到减小。

3.3.1 信息融合的关键方法

信息融合技术的关键在于数据转换、数据相关性分析和融合计算等,其中,融合计算是多传感器信息融合的核心技术,包括对多传感器信息进行验证、分析、补充、取舍、修改和状态跟踪估计,对新产生的信息进行分析与综合,以及生成综合态势并实时根据多传感器信息进行新的融合计算,修正态势预测。可见,信息融合可以视为一定条件下信息空间的一种非线性推理过程,该过程的输入条件是多传感器的检测信息构成的信息 M ,也是信息融合的数据空间,输出是决策空间的信息 N ,因此,信息融合过程可以表述为

$$f: M \sim N \quad (3.6)$$

可见,信息融合过程中,主要涉及两个重要的方面:信息融合系统模型和信息融合系统算法,两者共同完成该推理过程。信息融合系统的模型设计最为重要,常见的模型有三种:结构模型、功能模型和数学模型。其中,结构模型采用信息流向,主要描述融合系统的工作方式以及它和外部之间的信息交互的过程。功能模型则主要是说明整个融合系统的功能,以及它所包含的一些子模块的重要功能,还有各子模块之间的相互关系等。融合系统中所使用的融合算法以及综合的判断过程则主要由数学模型来体现。

1. 结构模型

一般来说,数据融合的结构有两种分类方法。一种是按实现目标估计级融合(对其他级别的融合,目前还没公认的结构模型)时常采用的处理结构进行分类的,可分为集中式、分布式和混合式。

(1) 集中式多传感器信息融合结构。这一融合结构直接对原始观测信息进行融合。它将各个传感器的信息送到融合处理中心,在融合中心完成数据的校验、关联以及预测跟踪,如图 3.30 所示为集中式融合结构。

该结构是理论上最好的融合方式,但在真实的应用环境中,属于同一个目标的观测信息不容易被区分,并且这种融合结构要求较大的存储空间,对融合处理器的要求也比较高,且系统的融合算法在中心融合处理器发生故障时就不能发挥作用了。因此这种融合方式的处理精度虽然较高,但其成本代价明显也高,并且融合系统的稳定度也差。

(2) 分布式多传感器信息融合结构。这种融合结构比集中式结构增加了局部预处理功能,首先将每个传感器的观测信息先分别进行局部预处理,然后再在融合中心进行综合处理,从而完成全局的估计,其结构如图 3.31 所示。

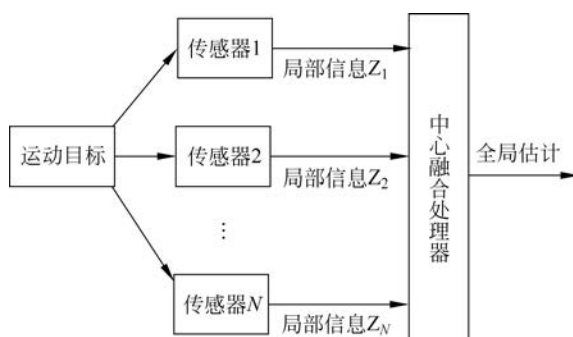


图 3.30 集中式融合结构

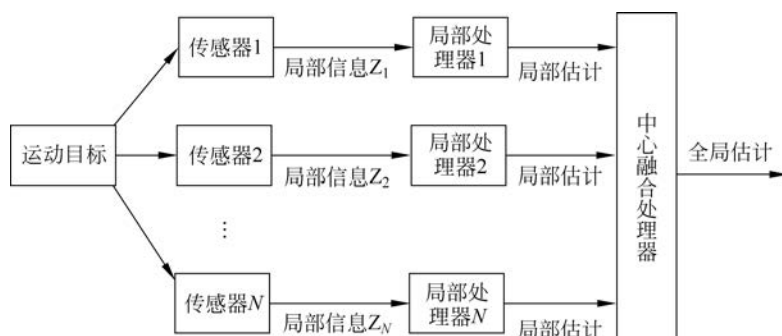


图 3.31 分布式融合结构

在分布式结构中,因有局部处理器对矢量数据进行了部分处理,故大大降低了融合中心的计算复杂度。这种融合结构具有能进行局部跟踪、系统开销小和稳定性好等特点,广泛应用于工程实践中。相比集中式结构,分布式结构减小了通信的压力。

(3) 混合式多传感器信息融合结构。这种融合结构如图 3.32 所示,它兼具集中式结构和分布式结构的优点。这种融合结构不仅可以对传感器的原始数据进行融合,而且也能融合经过局部预处理后的矢量数据。其适应性强,可以根据需要有效地进行数据融合或矢量融合,稳定性也比较好。但信息处理复杂,需要较高的传输速率,且在通信和计算上付出的代价较大。

实际工程应用中,选择哪种结构还需综合考虑系统的性能需求、计算负载、通信带宽、设备性能及所需资金和耗时等因素。

另一类是依据融合处理层次的分类方法,可分为像素级、特征级和决策级。像素级融合,有时也称信号级或数据级融合,其抽象程度最低。像素级融合一般常用于集中式融合结构中,它是对传感器的原始数据直接进行融合。如果待融合的数据是来自不同类型的传感器,则在处理时先要进行数据的配准。像素级融合能确保数据的完整性和最有效的融合结果,但由于数据量巨大,在通信信道的使用和数据处理的复杂性上要求较高。

特征级融合是对特征向量进行融合并依据融合结果进行身份判定。其中的特征向量是对传感器的观测数据进行特征抽取得到的。特征级融合不仅可以应用于集中式结构,还可应用于分布式结构中。特征级融合的处理效率、通信信道要求、信息处理的复杂性和数据损

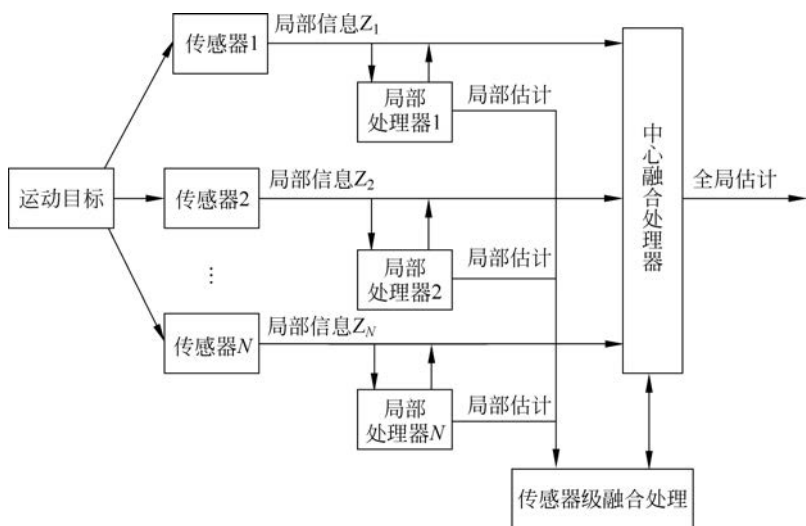


图 3.32 混合式融合结构

失介于三种级别融合的中间。

决策级融合是在判定级进行的融合,其融合对象是一些高级的推论及决策。这些高级的推论及决策是在对单个传感器分别进行单独处理后获得的。决策级融合在信息处理的复杂性、通信信道的使用上是最小的,但数据损失容易引起系统性能的降低。

2. 功能模型

多传感器信息融合系统的功能模型与实际应用有关。人们提出了多种信息融合的功能模型,如 JDL 及其修正模型、基于行为知识的信息融合模型、瀑布模型和混合模型等。为了获得和实际应用一致的模型,通常要对模型进行细化和修改。最受关注的就是 JDL 模型,最初的模型有 4 个模块,即对目标进行优化、对态势进行估计、对威胁进行估计和对过程的优化。随着信息融合技术的应用及其内涵的完善,JDL 模型几经修改,在 1992 年的修正版本中,第一次将对信息源进行预处理的模块引入其中,增加了信号检测及处理的功能。1999 年的版本(Steinberg 等推出的)在 1992 年版本的基础上将威胁估计修改为影响估计,从而使 JDL 模型不仅可以在军事领域应用,还可以扩宽到民用领域。同时在该版本中,出于对目标进行状态估计的需求,将对信息源的预处理修改为 0 级处理。2004 年,Bowman 提出修正版本,为了进一步明确信息融合的功能划分,同时尽量符合 JDL 模型的基本框架,提出一种推荐修正信息融合模型,该模型对各级别的融合功能从不同方面(如输入、输出数据类型、推理类型等)进行了区分。在该模型中,无须按融合级别顺序依次进行融合,任意级融合均可在满足自身输入条件下正常工作。

目前,随着信息融合技术的不断发展,其应用领域也越来越广泛,遇到的情况也越来越复杂。因此,完全依赖计算机进行的自动信息融合系统已不能满足当前信息融合形势的需求了。想要解决这些难题,必须借力的智能活动和行为,故在多源信息融合功能模型中增加人的认知优化功能,已成为众多专家的共识。

目前,我国工程界普遍认可的模型框架是信息融合专家赵宗贵从军事应用角度对 JDL 的论述,并对其具体化后的如图 3.33 所示的结构。

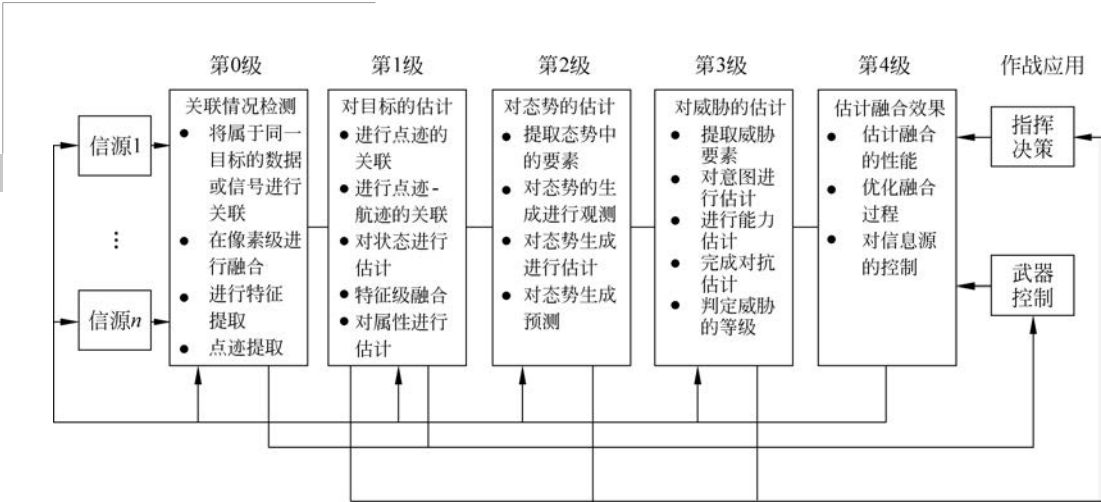


图 3.33 JDL 五级模型的军事应用实例

信息融合算法即信息融合的数学模型,模型中可能需要信号处理、概率统计、生物科学、控制理论、软件工程、信息论、计算智能等科学及相应的支持技术。针对信息融合需解决问题的复杂型和多样性,人们提出了许多信息融合的理论与方法。目前,关于信息融合的方法分类较多,按传感器类型可分为同类传感器信息融合和异类传感器信息融合;按对数据处理的方式可分为像素级融合、特征级融合和决策级融合。按技术原理可分为假设检验型、滤波跟踪型、聚类分析型、模式识别类型、人工智能型等信息融合。此外,大部分的数据融合及其研究目的多是基于 JDL 模型及其演化版本进行讨论的,这一类模型将数据融合分为两层:低级别处理层和高级别处理层。低级别处理层包括:直接数据处理、目标检测、分类与识别、目标跟踪等。高级别处理层包括:态势估计及对融合结果的进一步调整等。

在 JDL 模型及其演化版本中,第 1 级目标估计属于低级别处理层,通过这一层可以得到目标的航迹估计与目标识别信息,识别则包括从低到高的不同的层次,即检测、定位、分类和辨识。一般情况下,通过数据关联对传感器的输出进行融合,可获取感兴趣的物体、目标识别信息和目标位置估计及跟踪轨迹。且检测分类中所用融合算法不一定与航迹估计与预测中所用算法一样。由于目标估计级融合在多数融合系统均会涉及,因此本节将对第 1 级目标估计中的数据融合算法的分类进行简单介绍。

用于第 1 级目标估计中的数据融合算法可分为两类。第一类是用于检测、分类及识别的融合算法,如图 3.34 所示,这一类算法又可分为依据物理模型建立的算法、依赖于特征推理建立的算法和依据感知模型建立的算法。第二类是用于对状态进行估计与跟踪的数据融合算法。状态估计与跟踪算法的分类情况如图 3.35 所示,其目的是完成航迹与实测数据的关联处理。而关联部分的处理则主要包括:对数据的配准、将目标与数据关联起来以及对目标的位置、属性等给出相应的估计等。

此外,还可将信息融合的算法分为随机类及人工智能类这两类算法。其中,在各级融合中均可采用随机类融合方法,而一般情况下,则主要在较高层次融合中使用人工智能类方法。随机类融合算法包括:加权平均、Kalman 滤波、证据推理、产生式规则及贝叶斯推理等。两种算法的特征如下。

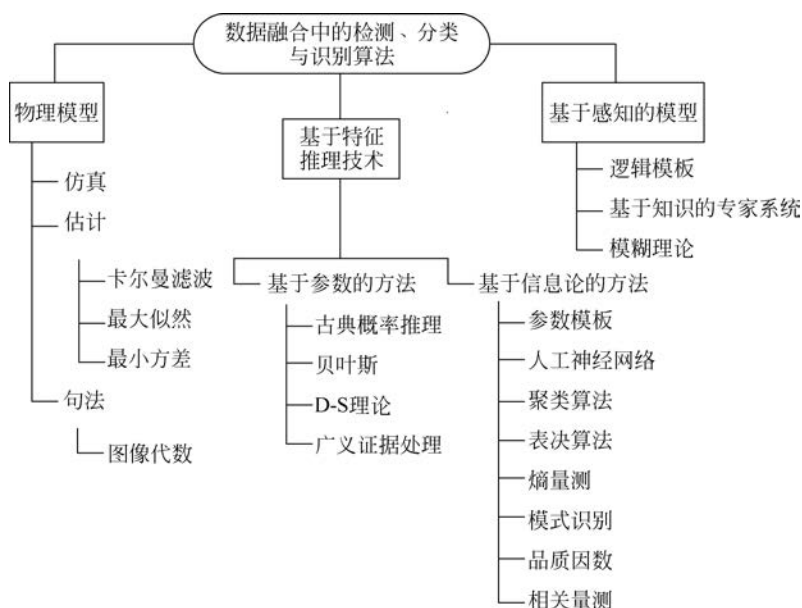


图 3.34 数据融合中常用的各种检测、分类、识别算法

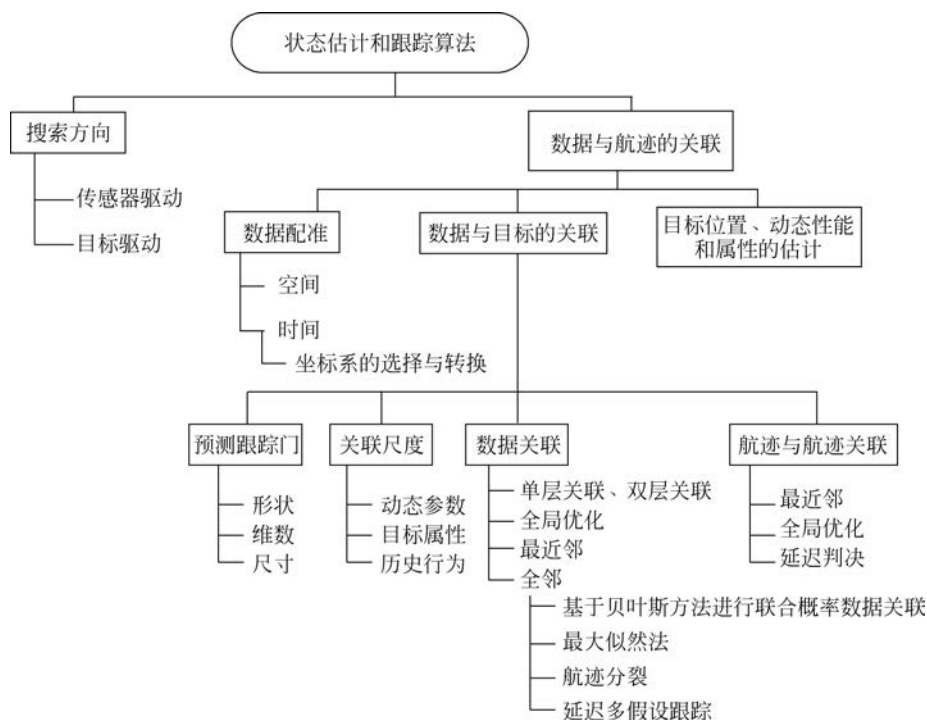


图 3.35 状态估计与跟踪算法的分类

(1) 随机类融合方法。

① 加权平均法。通过对多个传感器提供的冗余信息进行加权平均,以获得融合的结果。冗余的原始信息既可以是来自同一传感器不同时刻的采样值,也可为同类冗余传感器

在同一时刻的信息,这种融合方法简单、直观。该方法直接对数据源进行操作,可以对传感器的原始动态数据进行实时处理,能够消除偶然误差,但调整和设定权系数需花费大量时间且具有一定的主观性。

② Kalman 滤波。Kalman 滤波是一种最优估计方法,它能够根据测量噪声的统计特性,递推给出融合结果在统计意义下的估计。这种方法常用在对多传感器实测的带有冗余信息的数据,直接进行实时融合的场合。通常,在线性系统且假设系统噪声和传感器的噪声均为高斯白噪声的情况下,利用 Kalman 滤波就能获得被测信号的最优估计。由于递推的原因,Kalman 滤波法在滤波过程中无需过多的存储空间,因此可实时处理。

③ 贝叶斯推理。该方法常用在静态环境中,对多传感器数据直接进行融合。在该方法中,用概率分布来表述信息,适用于具有可加高斯噪声的不确定性信息。方法中基于各个传感器得到与之对应的贝叶斯估计器,可用来对多个独立的传感器的关联概率分布进行合成,使其成为一个联合的后验概率分布函数。最后,计算该联合的后验概率分布函数的似然函数的极小值,从而达到对信息的最终融合。该方法的缺点是定义先验似然函数比较困难。

④ 证据推理。证据推理法是贝叶斯推理法的扩展。证据推理用信任区间来表述传感器信息,能表示信息的已知性、未知性、确定性和不确定性。与贝叶斯推理比较,该方法拥有较多优点,贝叶斯推理需已知先验概率,而证据推理法是一种对不确定情况下推理的强有力方法,它能较好地解决贝叶斯推理需要先验概率的问题。

⑤ 产生式规则。在产生式规则中,引入了符号和置信因子。各个传感器信息与目标特征之间的联系用符号来表述。各个传感器信息的不确定性用与规则相联系的置信因子来表示。在同一个逻辑推理中,只有当联合规则形成时才产生融合,而由两个及两个以上的规则才能构成一个联合规则,但产生式规则融合应用中,当有新的传感器引入系统中时,还需增加一些对应的附加规则,这是因为在定义每个规则的置信因子时,还得兼顾它与其他规则的置信因子的关系。

(2) 人工智能类融合方法。

目前,有若干计算智能类的多传感器数据融合方法,如基于小波变换理论的、采用神经网络技术的、利用模糊集合理论的、使用粗糙集理论的以及应用支持向量机有关理论的融合方法等。

① 基于小波变换理论的融合方法。小波变换是一种时频分析方法,是目前图像融合中应用较多的一种多传感器信息融合方法。图像融合即将多幅图像合成为一幅图像的过程,这些多幅图像可能是来自不同模式的图像传感器获取的针对同一场景的多幅图像;还可能是来自同一个传感器在不同时刻获取的针对同一场景的多幅图像。通过将上述情况下的多幅图像采用基于小波变换的融合方法进行合成,得到一幅融合后的图像,能够达到更全面、更精确地描述待分析对象的目的。

基于小波变换的图像融合方法常包括三个步骤:首先,对获取的多幅原始图像分别进行小波多尺度分解;其次,对经过多尺度分解后获取的各幅图像在各个频率段的系数,依据一定的融合准则进行融合,获得融合后的各个频率段的系数;最后,经过小波重构获得融合结果图像。

② 基于模糊逻辑推理的方法。模糊逻辑是一种多值逻辑,它指定一个介于 $0\sim 1$ 的实数来表示其隶属度,并将不确定性直接表示在模糊推理过程中。模糊逻辑不用依据数学模

型,可对一些模型未知或很难获得精确模型的复杂系统进行处理。

③ 基于神经网络技术的方法。神经网络法是通过模拟人的大脑的神经元之间相互连接和相互作用进行信息处理的方法。由于信息的不确定性,因此对其进行融合也是一个不确定性的推理过程。而神经网络就是根据特定的学习方法来获取知识的一种不确定性的推理机制,它根据样本的相似性来分类,并给不同的类赋予不同的权重。神经网络模型与信息融合模型有较大的相似,用神经网络模型进行信息融合有显著的优势。神经网络具有很强的容错性能,能够模拟复杂的映射,并且它的自学习、自组织及自适应的能力也很强。此外,强大的非线性处理能力及并行、高速的计算能力,使其能够符合利用多传感器信息进行融合的需求,同时还能容易地完成实时识别的任务。

实际应用中,常根据具体应用来确定所使用的方法,鉴于各种方法之间具有互补性,多传感器数据融合常常是组合两种及以上的方法进行。

3.3.2 惯性导航与自动驾驶

尽管前述内容已经介绍过,地面和空中的开阔地区可以使用 GNSS 系统进行定位和导航、水下可以使用长基线等水声系统进行定位和导航。但是这些设备仍属于基础设施系统,在工作过程中需要依赖其他设备的辅助才能工作,如轨道上运行的卫星、水底的声学信标阵列等,限制了系统的应用范围。

1. 惯性导航系统原理

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)是一种不依赖于外部信息,也不向外部辐射能量的自主式导航系统。其工作环境不仅包括空中、地面,还可以在水下。其基本工作原理是以牛顿力学定律为基础,通过测量载体在惯性参考系的加速度,将其对时间进行积分,变换到导航坐标系中,就能够得到在导航坐标系中的速度、偏航角和位置等信息。

惯性导航系统属于推算导航方式,即从一已知点的位置根据连续测得的运动体航向角和速度推算出下一点的位置,因而可连续测出运动体的当前位置。陀螺仪和加速度计是惯性导航系统的核心传感器,被称为惯性测量单元或惯性传感器。陀螺仪用来形成一个导航坐标系,使加速度计的测量轴稳定在该坐标系中,并给出航向和姿态角;加速度计用来测量运动体的加速度,经过对时间的一次积分得到速度,速度再经过对时间的一次积分即可得到位移数据。

将导航体视为三维空间中的刚体,即导航体上每一个质点的运动状态相同,且运动状态可以分解为旋转与平移。因此,该过程可以使用导航体质心的运动状态代替整个导航体的运动。质心的空间位置可以用直角坐标系 (x, y, z) 来表示,对应着导航体的平移运动。导航体相对质心的旋转可以用广义欧拉角 (ψ, θ, γ) 来表示。其中,角坐标 ψ, θ, γ 是运载体以其质心为中心相对于导航坐标系的姿态角: ψ 为航向角,围绕 Z 轴旋转, θ 为俯仰角,围绕 Y 轴旋转, γ 为翻滚角,围绕 X 轴旋转,通过旋转产生的三个自由度,及平移运动产生的三个自由度,可以唯一确定三维空间中刚体的运动状态。

由于导航体在旋转运动时产生的科里奥利效应,在解算载体相对静态导航系的速度和加速度时,必须考虑科里奥利力对运动产生的影响。科里奥利定理,也称科氏定理,指将导航体在静态导航系下的加速度,即导航系下的加速度由旋转及平移两方面的影响叠加而成,数学表达如式(3.7)所示。

$$\left(\frac{d\vec{r}}{dt}\right)_i = \left(\frac{d\vec{r}}{dt}\right)_e + (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r})_i = \vec{v}_{ep} + \vec{\omega}_{ie} \times \vec{r} \quad (3.7)$$

其中, $\left(\frac{d\vec{r}}{dt}\right)_i$ 为绝对速度, 是在静参考系中的绝对运动, 包括地球自转以及载体与相对于地球的运动, $\left(\frac{d\vec{r}}{dt}\right)_e = \vec{v}_{ep}$ 为载体相对于地球惯性坐标系的相对速度。

使用质心近似地代表整个导航体的运动, 平台系的坐标原点就在导航体质心上。式(3.7)中, $\vec{v}_{ep}$ 是导航体的质心与地球系的相对速度, 下标 ep 表示平台随体坐标系相对于地球坐标系 e 的运动, 叉乘项则表示由旋转而引起的牵连运动, 牵连运动是在惯性坐标系所观测到的运动, 故此时地球自转则为牵连运动, 下标 i 表示惯性系, $\vec{\omega}_{ie}$ 是地球相对于惯性系的转动角速率矢量。

通过陀螺仪、加速度计及科里奥利定理得到了导航体在三维空间中运动的加速度后, 以加速度为出发点, 根据运动学和动力学原理列出运动学方程, 进而解算求得所需要的位姿、速度等信息。

对式(3.7)两边求导, 有:

$$\left(\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}\right)_i = \left(\frac{d\vec{v}_{ep}}{dt}\right)_i + \left(\frac{d}{dt}(\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r})\right)_i \quad (3.8)$$

利用科里奥利定理, 有:

$$\left(\frac{d\vec{v}_{ep}}{dt}\right)_i = \left(\frac{d\vec{v}_{ep}}{dt}\right)_e + \vec{\omega}_{ie} \times \vec{v}_{ep} \quad (3.9)$$

式中, $\left(\frac{d\vec{v}_{ep}}{dt}\right)_e$ 表示的是载体相对于地球的运动。相对运动会改变牵连运动的旋转半径。而由于旋转半径的变化, 引起附加的加速度 $\vec{\omega}_{ie} \times \vec{v}_{ep}$, 该项称为科里奥利项。式(3.8)中的 $\frac{d}{dt}(\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r})$ 项, 由于 $\vec{\omega}_{ie}$ 是常量, 对其求导结果为零, 因此由式(3.7)~式(3.9)推出载体相对于惯性坐标系的绝对加速度:

$$\left(\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}\right)_i = \left(\frac{d\vec{v}_{ep}}{dt}\right)_e + \vec{\omega}_{ie} \times (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r}) + 2\vec{\omega}_{ie} \times \vec{v}_{ep} \quad (3.10)$$

式(3.10)中左边表示载体相对于惯性系的绝对加速度, 右端第一项是载体相对于地球系的相对加速度, 右端第二项为牵连加速度, 右端第三项为科氏加速度。由于惯性导航的计算都是在地理系(t 系)下进行, 而式(3.10)中 $\left(\frac{d\vec{v}_{ep}}{dt}\right)_e$ 相对加速度是相对地心而言, 不便于使用, 需要将其转换到地理系下。在此处再使用一次科里奥利定理。则有:

$$\left(\frac{d\vec{v}_{et}}{dt}\right)_e = \left(\frac{d\vec{v}_{et}}{dt}\right)_t + \vec{\omega}_{et} \times \vec{v}_{et} \quad (3.11)$$

其中, 将平台系 p 替换成了地理系 t 。 $\vec{\omega}_{et} = \vec{\omega}_{ep}$ 将式(3.11)和式(3.10)联合, 将下标 p 替换为 t , 整理后得到:

$$\left(\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}\right)_i = \left(\frac{d\vec{v}_{et}}{dt}\right)_t + (2\vec{\omega}_{ie} + \vec{\omega}_{et}) \times \vec{v}_{et} + \vec{\omega}_{ie} \times (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r}) \quad (3.12)$$

由牛顿第二定律:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= m\vec{a} \\ \vec{a} &= \left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_i\end{aligned}\quad (3.13)$$

其中, m 为加速度计的质量, $\vec{F}$ 为作用在运载体的合外力, 该合力可由传感器直接检测; 加速度 $\vec{a}$ 可以表现为位置矢量 $\vec{r}$ 二次微分的形式。进而, 位置矢量和速度则都可以通过初始条件及加速度积分而来。

导航体的绝对加速度由引力加速度 $\vec{g}_e$ 和非引力加速度 $\vec{f}$ 组成, 有:

$$\left(\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \right)_i = \vec{f} + \vec{g}_e \quad (3.14)$$

即

$$\vec{f} + \vec{g}_e = \left(\frac{d\vec{v}_{et}}{dt} \right)_t + (2\vec{\omega}_{ie} + \vec{\omega}_{et}) \times \vec{v}_{et} + \vec{\omega}_{ie} \times (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r}) \quad (3.15)$$

令:

$$\vec{g} = \vec{g}_e - \vec{\omega}_{ie} \times (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r}) \quad (3.16)$$

将式(3.16)代入式(3.15), 则有:

$$\left(\frac{d\vec{v}_{et}}{dt} \right)_t = \vec{f} - (2\vec{\omega}_{ie} + \vec{\omega}_{et}) \times \vec{v}_{et} + \vec{g} \quad (3.17)$$

式(3.17)被称为惯性导航的基本方程, 适用于平台式惯导、捷联式惯导、车载、行人等任何惯性导航系统。

2. 无人驾驶技术中的姿态信息融合

由于涉及生命安全问题, 自动驾驶技术对于感知有严格的要求: 高速、高精度、高准确性和高可靠性, 如自动驾驶技术对于汽车的位置和姿态的极高要求、对于汽车周围环境障碍物的快速检测要求等。

例如, 自动驾驶汽车对位置和姿态的要求精度远远高于其他装置, 汽车在行驶过程中, 必须能实现车道级定位。除了精确地感知车辆的位置之外, 还需要精确感知车辆在当前车道中的位置。目前常用的定位定姿传感器根据原理方法不同可以分为基于无线电信号、航位推算和环境特征匹配三类, 与之对应且最具代表的传感器分别是 GNSS、惯性导航以及视觉/激光雷达, 这也是目前移动测量平台、无人机、移动机器人、自动驾驶汽车的标准配置, 如图 3.36 所示。

上述三类代表性的传感器具有很强的优势互补性。GNSS 建立起了一套全球范围内统一的时间和空间基准, 所有的信息都将在同一个绝对的时空基准下进行交互融合, 是唯一具备全球、全天候高精度绝对定位的系统。惯性导航系统通过感知刚体平动和转动, 由加速度和角速度进行航位推算, 获得载体丰富的导航信息, 包括位置、速度、姿态、加速度、角速度等, 因而可作为主滤波器融合任何其他定位定姿传感器的信息。它的优势是独立自主, 不与外界发生联系, 不受平台、环境的干扰影响, 采样率高、故障率低, 从而具备高可用、高可靠的优点。视觉传感器通过对环境特征信息的测量与匹配, 可实现 INS 一样的航位推算, 当有先验地图支持时, 也可实现 GNSS 一样的绝对定位。它的缺点是探测距离短, 而弱纹理、低光照、强曝光、运动模糊等因素会严重影响特征匹配, 但它很少受环境遮挡干扰的影响, 且误

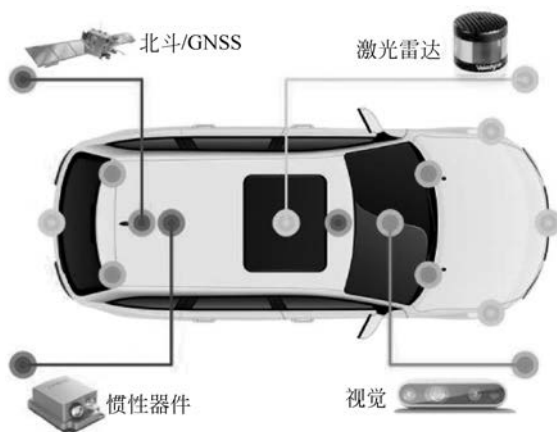


图 3.36 自动驾驶汽车的定位定姿传感器节点分布

差发散与行车距离呈线性关系,其性能介于 GNSS 和 INS 之间,是 GNSS/INS 组合系统的最佳补充。

视觉传感器通过感知、识别、跟踪周围环境的特征信息来实现自身载体位姿的估计,其硬件技术成熟度高、体积小、价格便宜,普遍集成于智能终端。并且还具有语义分割和场景理解,大范围建图等计算机视觉能力,具有广阔的应用前景和研究价值。

由于自动驾驶技术还在高速发展且该项技术尚未成熟,因此相关技术还在快速发展中,新技术、新方法、新器件和新数据不断诞生,使自动驾驶技术成为目前热门的技术领域,也使得数据的采集方式和融合方式不断更新,如激光雷达和视觉融合、高精度地图与 GNSS/INS 融合、多摄像头视频融合等,具体融合方式不在本书中介绍。

3.4 水下机器人的传感器系统

3.4.1 传感器系统组成

水下机器人的工作环境决定了其所使用的传感器类型与陆地设备有所不同。但从水下机器人的组成结构上看,水下机器人除了推进器和需要与水接触的传感器之外的电子部件都被包裹在防水耐压密封舱的内部,而舱内的环境与陆地环境几乎相同。因此,水下机器人常规使用的传感器主要包括温度湿度传感器等。水下机器人的大部分电子设备都安装在封闭的密封舱中,电子元件在工作过程中会产生一定的热量,在使用亚克力密封舱材料的情况下,热量会难以耗散,导致舱内温度过高、机器人稳定性下降的问题,若使用金属等导热性较好的密封舱,又可能导致密封舱内部结露问题,因此必须要对水下机器人密封舱内进行温度和湿度监控,必要的情况下还可通过热传导方式对环境水温监控。一般情况下,使用与陆地机器人相同或相近型号的传感器即可,温度湿度传感器的相关内容不再重复介绍。

除了温度湿度传感器之外,水下机器人中也可以用到 3.2 节中介绍的各类传感器,如电压传感器、电流传感器、图像传感器、地磁传感器、加速度计和陀螺仪等,甚至也可以安装 GNSS 系统或无线电台以便水下机器人在浮出水面时定位或通信。由于上述传感器与地面使用几乎无差异,因此相关内容不再重复介绍。

3.4.2 特殊应用传感器

在水中工作的特点给水下机器人提出了防水等其他的感知要求,因此水下机器人内部需要引入特定的传感器来实现感知要求,常规的包括漏水感知和深度感知两类。

(1) 漏水传感器。水下机器人依靠防水密封舱保护内部的电子设备不受水的腐蚀,一旦防水密封舱发生漏水,水下机器人就必须立刻上浮以阻止进一步损失。水下机器人的主要防水舱室一般都需要增加漏水检测功能(BlueROV2 和 OpenROV 的电池舱没有漏水检测),并需要在舱底部和水密接口处安装漏水探针,漏水检测主板在检测到任意一个漏水探针的告警信号后,都会以电平的形式通知主控板。漏水传感器是水下机器人各密封部件的重要必备功能,其组成结构如图 3.37 所示。

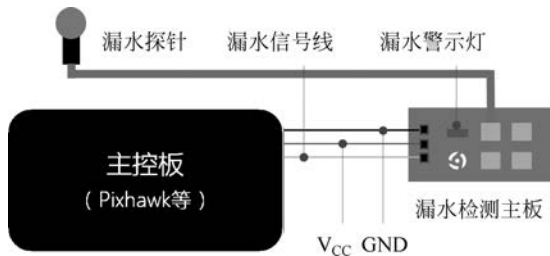
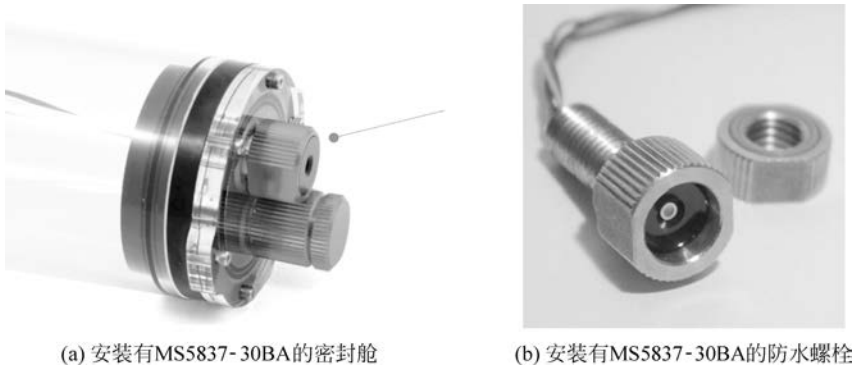


图 3.37 ROV 多探针漏水检测方案

(2) 水深传感器。水深传感器是根据机器人所处位置的水压来测量机器人所处深度的,目前作业深度小于 300m 的水下机器人主要使用的水深压力传感器是 MS5837-30BA,该传感器量程为 0~30bar,工作深度为 0~300m,工作电压为 1.5~3.6V,最高分辨率可达 0.002m 水深,工作温度为 $-20\sim 85^{\circ}\text{C}$,使用 I²C 通信接口,体积仅为 3.3mm×3.3mm×2.75mm,可以安装在防水螺栓内部使用,如图 3.38 所示。



(a) 安装有MS5837-30BA的密封舱

(b) 安装有MS5837-30BA的防水螺栓

图 3.38 安装有 MS5837-30BA 的密封舱和防水螺栓

除了上述传感器外,水下机器人往往还要装备独立于密封舱之外的摄像机。观测级 ROV 的摄像头一般是通过在普通摄像头机芯基础之上增加密封舱和电路构成的,根据摄像头机芯的信号类型和接口可以分为模拟机芯、USB 数字机芯、网络数字机芯等。由于密封舱的防护,摄像头外观难以区分,在使用时必须要根据接口区分,如图 3.39 所示。



图 3.39 难以分辨的模拟信号摄像头、USB 数字摄像头和网络数字摄像头外观照片

3.4.3 声呐系统

声呐是利用声波进行探测、定位和通信的电子设备,可用来进行水下生物、潜艇和地形等水下目标检测,如图 3.40 所示。声呐分为主动声呐和被动声呐两种,主动声呐通过发射信号,并检测信号的回波,分析回波的时间等特征来还原目标;而被动声呐则只能监听信号,不能发送信号,目前的民用声呐主要是主动声呐。

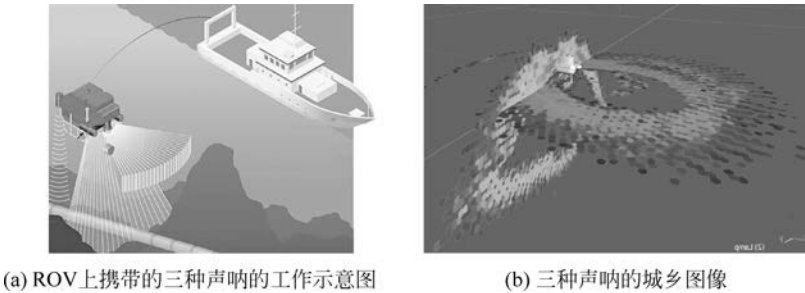


图 3.40 ROV 携带声呐作业的示意图和声呐波束示意图

主动声呐根据扫描和成像方式还可以分为成像声呐、剖面声呐和侧扫声呐三种。

(1) 成像声呐,又被称为前扫声呐。成像声呐的波束成扇形,以浅角度(与水平面夹角较小)扫描表面,主要用于目视解译,能够根据前方目标的回波强度产生类似于视觉图像的声呐成像,适用于水下机器人的避障使用,因此成像声呐一般安装在水下机器人的前部。

图 3.41 分别是声呐图像、Tritech 公司的 Micron 成像声呐外观,该声呐主要用于 ROV 目标避碰、识别和 AUV 导航领域,该声呐的主要参数如表 3.10 所示。

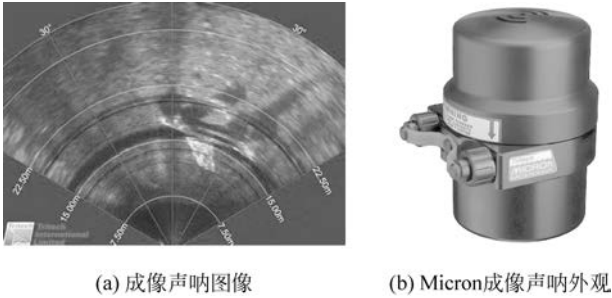


图 3.41 成像声呐图像和 Micron 成像声呐外观

表 3.10 Trittech 公司的 Micron 成像声呐主要参数

工作频率	700kHz
波束宽度	垂直 35°,水平 3°
扫描扇区	可调,最高 360°
最大工作距离	75m
最小工作距离	0.3m
扫描分辨率	0.45°,0.9°,0.18°
供电	V _{DC} 12~48
通信接口	RS232,RS485
控制方式	Tritech Seagnet Pro,Micron 或命令行协议
接口类型	RS232/RS485
重量	324g(空气中)/180g(水中)

(2) 剖面声呐。狭窄的锥形波束以一个陡峭的角度(通常是垂直平面)扫描表面,根据表面的回波强度等信息还原出特定点的位置信息,经过计算机处理后可以还原出线信息和 3D 信息,剖面声呐一般用于探测 ROV/AUV 下方的地形特征。剖面声呐技术目前不仅可以用于测量水底表面的状况,还可以测量水底底层一定深度的信息,构成地层剖面仪。

图 3.42(a)是剖面声呐的表层探测的 3D 还原模型,图 3.42(b)是 StrataBoxTM 浅水地层勘查仪的设备图和测试结果图,可见浅水地层勘查仪不仅可以勘测到表面回波,还可以根据海底地层的回波进行地表以下的地况重建,该设备的基本参数如表 3.11 所示。

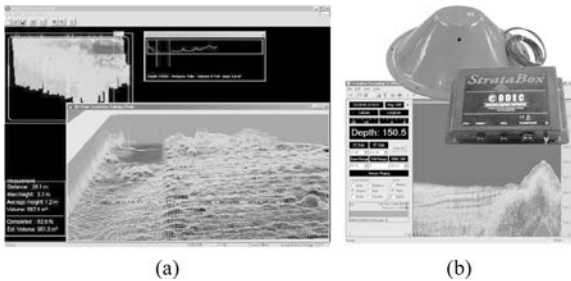


图 3.42 剖面声呐图像、StrataBox 浅地层剖面仪

表 3.11 StrataBox 浅水地层勘查仪主要参数

探测范围	0~5m,0~10m,0~20m,0~40m,0~80m,0~150m
变换范围	0~150m 内 1m 增量
地层分辨率	40m 地层穿透,6cm 分辨率
发射频率	10kHz
供电	V _{DC} 10~30,8W
通信接口	RS232,57.6kb/s
重量	0.9kg(空气中)

(3) 侧扫声呐。侧扫声呐主要用于探测物体和海底结构,通常是安装在拖鱼两侧的两个换能器发射和接收声波脉冲并将其数字化,从而获得海底图像。侧扫声呐能够呈现高度精细化的图像,不仅能显示物体的存在,同时还能反映物体的材质。侧扫声呐的工作示意图和声呐图像如图 3.43 所示。

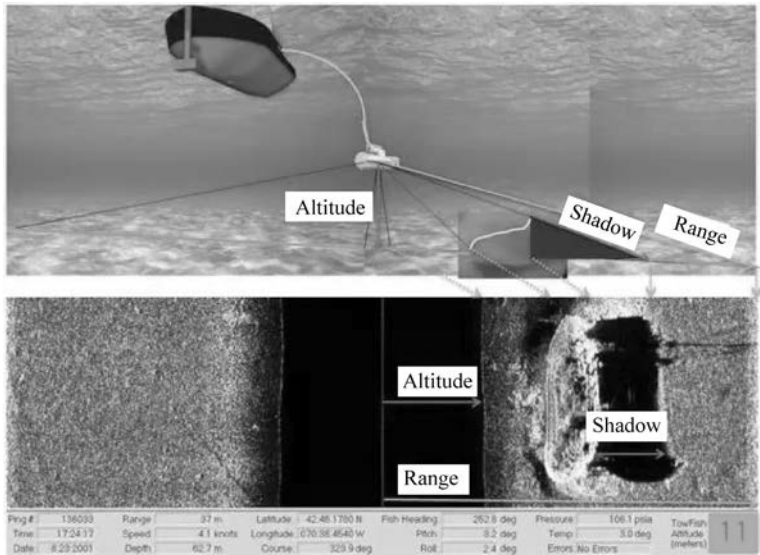


图 3.43 侧扫声呐扫描原理和声呐图像

侧扫声呐波束平面垂直于航行方向,沿航线方向束宽很窄,开角一般小于 2° ,以保证有较高分辨率。垂直于航线方向束宽较宽,开角约为 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$,以保证一定的扫描宽度。声呐工作时发射出的声波投射在海底的区域呈长条形,换能器阵接收来自照射区各点的反向散射信号,经放大、处理和记录后,还原出海底图像。侧扫声呐的工作频率,通常为数十 kHz 至数百 kHz,声脉冲持续时间小于 1ms,作用距离一般为 300~600m,拖曳体的工作航速为 3~6 节。

(4) 测深仪。测深仪可以理解为单波束的回声检测仪,用于在小型 ROV 上测量 ROV 距离海底的距离,其体积、重量和功耗等都远小于各类声呐。如 BlueROV2 可选搭载的 Ping Sonar,其参数如表 3.12 所示。

表 3.12 Ping Sonar 测深仪的主要参数

工作频率	115kHz
波束宽度	30°
最大测量深度	30m
波束直径	15cm@30m, 1cm@2m
最大工作电压	$V_{DC} 5.5$
工作电流	100mA
通信接口	TTL UART
重量	100g(空气中)/48g(水中)

尽管声呐可以为 ROV 提供更多的信息,但是声呐体积、重量和功耗等方面都超出了小型 ROV 的承载能力。而测深仪能够以简单的方式向 ROV 传递距离信息,也可以实现避障等功能。

小 结

传感器是机器人系统获取外界状态和自身状态的重要途径,是机器人连接外部环境的重要接口,是机器人迈向自主化、智能化的基础。本章介绍了机器人中传感器的类型、部署原则以及温度、湿度、摄像头和激光雷达等的工作原理。针对单一传感器信息维度低等缺点,本章介绍了传感器的信息融合技术,并以惯性导航系统和自动驾驶汽车进行了举例说明。最后,本章介绍了一些水下设备特有的传感器系统。第4章将介绍接收传感器数据、控制传感器工作、处理传感器数据的各类信息处理系统。

习 题

1. 机器人的传感器系统有哪些特殊要求?
2. 数字传感器系统通常由哪些部分组成?
3. 对比激光测距中,脉冲法、相位法和三角法的特性。
4. 激光雷达有哪些基本参数?
5. 水下机器人搭载的声呐有哪些种类?