

第 5 章 典型机器人应用

机器人发展到今天,产生了各种类型、各种形态、各种功能的机器人系统。本章将以工业机器人、移动机器人、拟人机器人、医用机器人和水下机器人为例,介绍这些典型机器人的特点、技术及其主要应用,从而对机器人有更具体深入的了解。

5.1 工业机器人

通常所说的工业机器人一般指在工业制造环境中,模拟人的手臂的部分动作,按照预定的程序、轨迹及其他要求,实现抓取、搬运工件或操纵工具的自动化装置。它是一种仿人操作、自动控制、可重复编程、能在三维空间完成各种作业的自动化生产设备,特别适合于多品种、变批量的柔性生产。对稳定、提高产品质量,提高生产效率,改善劳动条件和产品的快速更新换代起着十分重要的作用。如汽车制造、摩托车制造、舰船制造、家电生产、化工制备等行业自动化生产线中的点焊、弧焊、喷漆、切割、电子装配,及物流系统的搬运、包装、码垛等作业的机器人。

5.1.1 搬运机器人

搬运机器人(Transfer Robot)是主要从事自动化搬运作业的工业机器人。所谓搬运作业是指用一种设备握持工件,从一个加工位置移到另一个加工位置。工件搬运和机床上下料是工业机器人的一个重要应用领域,在工业机器人的构成比例中占有较大的比重。其中在机床上下料中的搬运机器人增长很快。近年来随着物流业的发展,特别是自动仓库的出现,加速了码垛搬运机器人的发展和广泛应用。目前世界上使用的搬运机器人超 10 万台,被广泛应用于机床上下料、冲压机自动化生产线、码垛、集装箱等的自动搬运。

1. 搬运机器人系统组成

搬运机器人系统由搬运机械手和周边设备组成。搬运机械手可用于搬运重达几千克

至一吨以上的负载。微型机械手可搬运轻至几克甚至几毫克的样品,用于传送超净实验室内的样品。周边设备包括工件自动识别、自动启动和自动传输装置等。搬运机器人可安装不同的末端执行器(如机械手爪、真空吸盘及电磁吸盘等)以完成各种不同形状和状态的工件搬运工作,大大减轻了人类繁重的体力劳动。

2. 搬运机器人的特点

采用机器人搬运物料具有抓取可靠、移动灵活和摆放整齐等特点,可以规范物料的放置空间,便于仓储管理,并且减轻了装卸工人的劳动强度,提高了装卸效率,减少了环境污染。

目前,国际上已产品化的搬运码垛机器人的型式主要分为三种:一种是直角坐标型;二是空间多关节型;三是平面关节型。直角坐标型机器人的特点是结构强度及刚度好、效率高、制造加工工艺简单、安装调试及维护方便、便于产品化,但占用空间大。空间多关节型机器人的特点是结构紧凑、机动性好、效率高,但结构强度及刚度较差,目前还缺乏有效的结构动态设计方法,而且制造加工工艺复杂,不便于产品化。平面关节型机器人分为垂直平面关节型和水平平面关节型机器人两种。垂直平面关节型机器人的特点与空间多关节机器人基本相同;水平平面关节型机器人是移动式与关节式结构的组合,受力条件差、效率低、制造加工工艺复杂、性能价格比低,但结构紧凑、占用空间最小。

3. 搬运机器人的主要应用

搬运机器人最早于 1960 年出现在美国,Versatran 和 Unimate 两种机器人首次用于搬运作业。20 世纪 80 年代以来,工业发达国家在推广搬运码垛的自动化、机器人化方面得到了显著的进展。日本、德国等国家在大批量生产如机械、家电、食品、水泥、化肥等行业广泛使用搬运机器人。日本安川公司的六轴 SK16 机器人不仅可以满足焊接和切屑需求,而且可以为机床或压力机上下料,其有效负荷为 16kg,最大工作半径为 1555mm,重复定位精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。松下自动化公司推出的 VR 系列材料搬运机器人可以进行原料搬运、机器装



图 5.1 FUJIACE 公司的码垛搬运机器人

卸和去毛刺等操作;日本研制机器人自动装卸机,由机器人和传送带装置结合,能在 13s 内装卸一件重量在 30kg 左右的货物。意大利 Procomac 公司开发出名为法努克的卸垛机器人,能一起搬运起托架及其上面的塑料瓶。日本 FUJIACE 公司生产的码垛搬运机器人,可将生产线上生产的袋装物料快速抓取,并码垛在托盘上。图 5.1 所示是 Motoman SK45 型机器人将一个大桶③从低处(工作台①)搬到高处

(工作台②)的实例。

目前,日本已产品化的搬运码垛机器人最大搬运重量可达 300kg,最大工作半径 2.5m,最大运动速度 0.2m/s,重负定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

我国在“七五”“八五”期间已有许多单位研制出搬运码垛机器人,如上海大学研制的用于银行金库的直角坐标型码垛搬运机器人,哈尔滨工业大学机器人研究所开发了由自动称重、自动包装和物料袋自动码垛等系统组成的气动搬运机器人自动生产线,完成袋装颗粒乙烯的自动搬运、排码成垛。北京科技大学成立了米袋搬运机器人工作站,对 5kg 和 10kg 的米袋进行定点搬运、码垛作业。

5.1.2 焊接机器人

焊接机器人是在工业机器人的末轴法兰上装接焊钳或焊(割)枪,使之能进行焊接、切割或热喷涂的机器人。由于对许多构件的焊接精度和速度等提出越来越高的要求,一般工人已难于胜任这一工作;此外,焊接时的火花及烟雾等,对人体造成危害。因此,焊接过程的完全自动化已成为重要的研究课题。其中,应用焊接机器人的研究和应用十分关键。目前焊接机器人是最大的工业机器人应用领域之一,占工业机器人总数的 25% 左右。

1. 焊接机器人系统组成

机器人仅是一个实现运动和姿态的操作机,要完成焊接作业必须依赖控制系统与辅助设备的支持和配合,一起组成焊接机器人系统。完整的焊接机器人系统一般由如下几部分组成:机械手、变位机、控制器、焊接系统(专用焊接电源、焊枪或焊钳等)、焊接传感器、中央控制计算机和相应的安全设备等。典型的焊接机器人系统组成如图 5.2 所示。

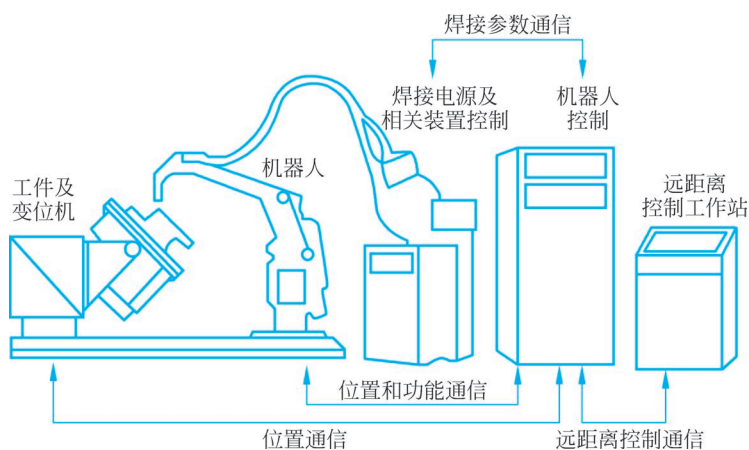


图 5.2 焊接机器人系统组成

机械手是焊接机器人系统的执行机构,它由驱动器、传动机构、连杆、关节以及内部传感器(编码盘)等组成。其任务是精确地保证末端执行器(焊枪)所要求的空间位置、姿态并实现其运动。由于具有6个旋转关节的关节式机器人已被证明能在机构尺寸相同情况下获得最大的工作空间,并且能以较高的位置精度和最优的路径达到指定位置,因而这种类型的机器人在焊接领域得到广泛的应用。

变位机作为机器人焊接生产线及焊接柔性加工单元的重要组成部分,其作用是将被焊接工件旋转(平移)到最佳的焊接位置。在焊接作业前和焊接过程中,变位机通过夹具来装卡和定位被焊工件,对工件的不同要求决定了变位机的负载能力及其运动方式。为了使机械手充分发挥效能,焊接机器人系统通常采用两台变位机,当其中一台进行焊接作业时,另一台则完成工件的装卸,从而提高整个系统的运行效率。

控制器是整个机器人系统的神经中枢,由计算机硬件、软件和一些专用电路组成。其软件包括控制器系统软件、机器人专用语言、机器人运动学及动力学软件、机器人控制软件、机器人自诊断及自保护软件等。控制器负责处理焊接机器人工作过程中的全部信息,并控制其全部动作。

焊接系统是焊接机器人完成作业的核心装备,由焊钳(点焊机器人)、焊枪(弧焊机器人)、焊接控制器及水、电、气等辅助部分组成。焊接控制器是焊接系统的控制装置,它根据预定的焊接监控程序,完成焊接参数输入、焊接程序控制及焊接系统故障自诊断,并实现与机器人控制器的通信联系。用于弧焊机器人的焊接电源及送丝设备由于参数选择的需要,必须由机器人控制器直接控制。

焊接传感器是焊接过程中(尤其是焊接大、厚工件时)不可缺少的设备。在焊接过程中,尽管机械手、变位机、装卡设备和工具等能达到很高的精度,但由于存在被焊工件几何尺寸和位置误差,以及焊接过程中产生的热引起工件的变形,传感器的任务是实现工件坡口的定位、跟踪以及焊缝熔透信息的获取。

中央控制计算机在工业机器人向系统化、PC化和网络化的发展过程中发挥着重要的作用。通过相应接口与机器人控制器相连接,中央控制计算机主要用于在同一层次或不同层次的计算机间形成通信网络,同时与传感器设备相配合,实现焊接路径和参数的离线编程、焊接专家系统的应用以及生产数据的管理。

安全设备是焊接机器人系统安全运行的重要保障,其主要包括驱动系统过热自断电保护、动作超限位自断电保护、机器人系统工作空间干涉自断电保护以及人工急停断电保护等,它们起到防止机器人伤人或损害周边设备的作用。在机器人的工作部位还装有各类触觉或接近觉传感器,可以使机器人在过分接近工件或发生碰撞时停止工作。

2. 焊接机器人的主要结构形式及性能

世界各国生产的焊接用机器人基本上都属关节式机器人,绝大部分有6个轴。其中,1、

2、3 轴可将末端工具送到不同的空间位置,而 4、5、6 轴解决工具姿态的不同要求。焊接机器人本体的机械结构(简称机构)主要有两种形式:一种为多关节型机构,一种为平行杆型机构。多关节型机构的主要优点是上、下臂的活动范围大,使机器人的工作空间几乎能达一个球体。因此,这种机器人可倒挂在机架上工作,以节省占地面积,方便地面物件的流动。但是这种机构形式的机器人,2、3 轴为悬臂结构,降低了机器人的刚度,一般适用于负载较小的机器人,常用于电弧焊、切割或喷涂。平行杆型机器人的工作空间能达到机器人的顶部、背部及底部,又不存在多关节型机器人的刚度问题,因而得到普遍的重视,不仅适合于轻型机器人,也适合于重型机器人。上述两种机器人各个轴都是做回转运动,故采用伺服电机通过摆线针轮(RV)减速器(1~3 轴)及谐波减速器(1~6 轴)驱动。在 20 世纪 80 年代中期以前,对于电驱动的机器人都是用直流伺服电机,而 80 年代后期以来,各国先后改用交流伺服电机。由于交流电机没有碳刷、动特性好,使新型机器人不仅事故率低,而且使免维修时间大为增长,加(减)速度也加快。一些负载 16kg 以下的新的轻型机器人工具中心点(TCP)的最高运动速度可达 3m/s 以上,定位准确、振动小;同时,机器人的控制柜也改用 32 位的微机和新的算法,使之具有自行优化路径的功能,运行轨迹更加贴近示教的轨迹,如图 5.3 所示。

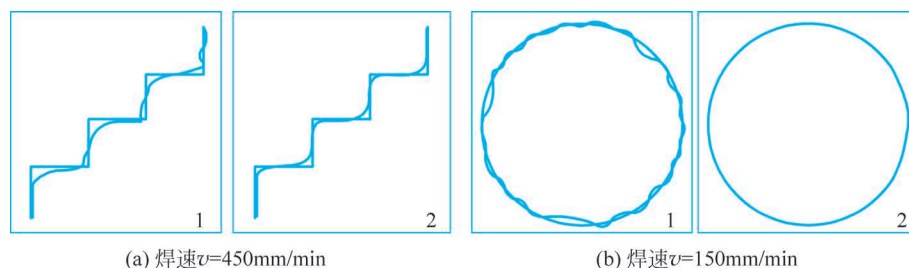


图 5.3 有无自动优化路径功能的机器人运动轨迹的对比

1—无优化功能; 2—有优化功能

3. 焊接机器人的主要应用

1) 点焊机器人

点焊机器人(Spot Welding Robot)是用于自动点焊作业的工业机器人。世界上第一台点焊机器人于 1965 年开始使用,是美国 Unimation 公司推出的 Unimate 机器人,中国于 1987 年自行研制成功第一台点焊机器人——华宇-I 型点焊机器人。

点焊机器人由机器人本体、计算机控制系统、示教盒和点焊焊接系统几部分组成,如图 5.4 所示。点焊机器人机械本体一般具有 6 个自由度:腰转、大臂转、小臂转、腕转、腕摆及腕捻。其驱动方式有两种:液压驱动、电气驱动,其中电气驱动应用更为广泛。

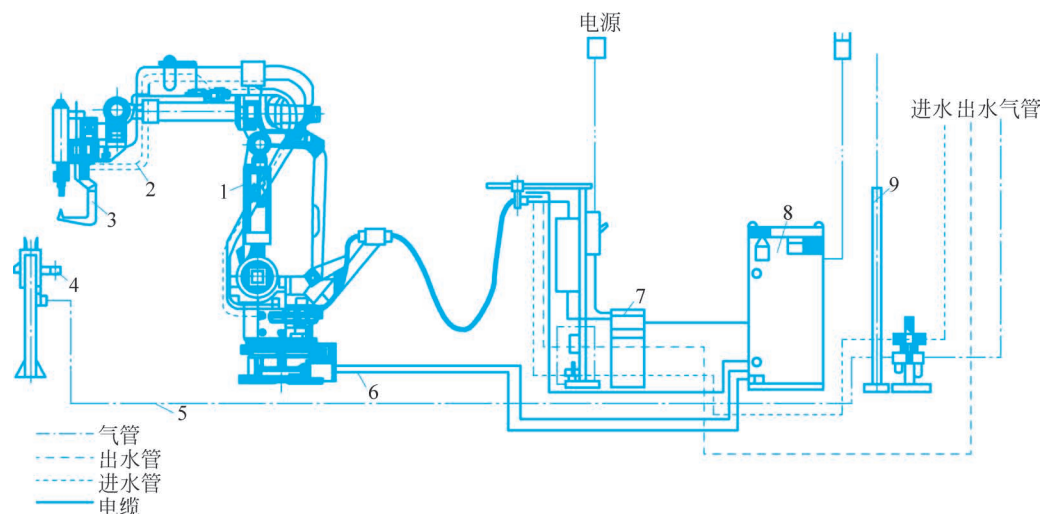


图 5.4 点焊机器人的组成

1—机械臂；2—进水、出水管线；3—焊钳；4—电极修整装置；5—气管；
6—控制电缆；7—点焊定时器；8—机器人控制柜；9—安全围栏

点焊机器人按照示教程序规定的动作、顺序和参数进行点焊作业，其过程是完全自动化的，并且具有与外部设备通信的接口，可以通过这一接口接受上一级主控与管理计算机的控制命令进行工作。

点焊作业对所用机器人的要求不是很高。因为点焊只需点位控制，至于焊钳在点与点之间的移动轨迹没有严格要求，这也是机器人最早只能用于点焊作业的原因。点焊机器人需要有足够的负载能力，而且在点与点之间移位时速度要快捷、动作要平稳、定位要准确，以减少移位的时间、提高工作效率。点焊机器人需要有多大的负载能力，取决于所用的焊钳形式。对于变压器分离的焊钳，30~45kg 负载的机器人就足够了。但是，这种焊钳一方面由于二次电缆线长、电能损耗大，不利于机器人将焊钳伸入工件内部焊接；另一方面电缆线随机人运动而不停摆动使其损坏较快。因此，目前逐渐采用一体式焊钳。这种焊钳连同变压器质量在 70kg 左右。考虑机器人要有足够的负载能力，能以较大的加速度将焊钳送到空间位置进行焊接，一般都选用 100~150kg 负载的重型点焊机器人。为了适应连续点焊时焊钳短距离快速移位的要求。新的重型机器人增加了可在 0.3s 内完成 50mm 位移的功能。这对电机的性能、计算机的运算速度和算法都提出更高的要求。

引入点焊机器人可以取代笨重、单调、重复的体力劳动；更好地保证焊点质量，可长时间重复工作，工作效率提高 30% 以上；可以组成柔性自动生产系统。点焊机器人特别适合新产品开发和多品种生产，增强企业应变能力。

在我国点焊机器人约占焊接机器人总数的 46%，主要应用在汽车、农机、摩托车制造等

行业。通常,装配一台汽车车身大约需要完成 4000~5000 个焊点,由点焊机器人完成 90% 以上的焊点,仅少数焊点因点焊机器人无法伸入车体内部而需手工完成。

目前,正在开发一种新的点焊机器人系统,该系统可把焊接技术与 CAD/CAM 技术完美地结合起来,提高生产准备工作的效率,缩短产品设计投产的周期,使整个机器人系统取得更高的效益。这种系统拥有关于汽车车身结构信息、焊接条件计算信息和机器人机构信息等数据库,CAD 系统利用该数据库可方便地进行焊钳选择和机器人配置方案设计;采用离线编程的方式规划路径;控制器具有很强的数据转换功能,能针对点焊机器人本身不同的精度和工件之间的相对集合误差及时进行补偿,以保证足够的工作精度。



图 5.5 Fanuc S-420 点焊机器人

图 5.5 所示是点焊机器人的应用实例。

2) 弧焊机器人

弧焊机器人(Arc Welding Robot)是用于进行自动弧焊的工业机器人。我国在 20 世纪 80 年代中期研制出了华宇-I 型弧焊机器人。

弧焊机器人一般由示教盒、控制盘、机器人本体及自动送丝装置、焊接电源等部分组成,如图 5.6 所示。弧焊机器人机械本体通常采用关节式机械手。虽然从理论上讲,有 5 个轴的机器人就可以用于电弧焊,但是对复杂形状的焊缝,需选用 6 轴弧焊机器人。其驱动方式多采用直流或交流伺服电机驱动。

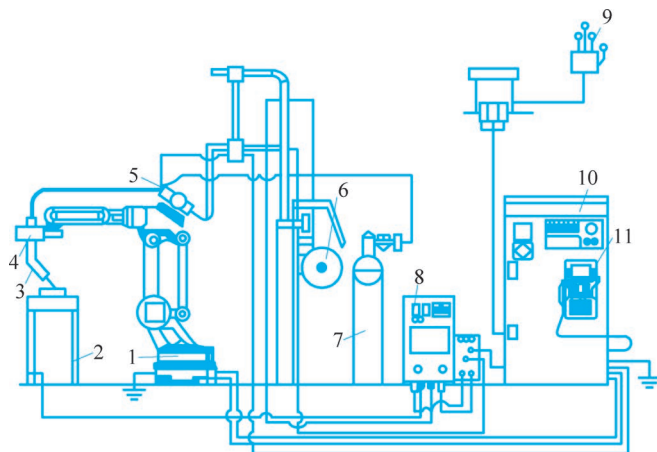


图 5.6 弧焊机器人组成

- 1—机械手; 2—工作台; 3—焊枪; 4—防撞传感器; 5—送丝机; 6—焊丝盘;
7—气瓶; 8—焊接电源; 9—电源; 10—机器人控制柜; 11—示教盒

弧焊过程比点焊过程要复杂得多,工具中心点(TCP),也就是焊丝端头的运动轨迹、焊枪姿态、焊接参数都要求精确控制。所以,弧焊机器人应能实现连续轨迹控制,并可以利用直线插补和圆弧插补功能焊接由直线及圆弧所组成的空间焊缝,同时具备可供编程时选用的不同摆动样式的软件功能,以便做摆动焊,而且摆动在每一周期中的停顿点处,弧焊机器人也应自动停止向前运动,以满足工艺要求。此外,还应有接触寻位、自动寻找焊缝起点位置、电弧跟踪及自动再引弧功能等。

弧焊机器人主要有熔化极(CO_2 、MAG/MIG、药芯焊丝电弧焊)焊接作业和非熔化极(TIG)焊接作业两种类型,具有可长期进行焊接作业,保证焊接作业的高生产率、高质量和高稳定性等特点。随着技术的发展,弧焊机器人正向着智能化的方向发展。

当前,作为焊接生产自动化的主要标志之一是焊接生产系统柔性化,其发展方向是以弧焊机器人为主体,配合多自由度变位机及相关的焊接传感控制设备、先进的弧焊电源,在计算机的综合控制下实现对空间焊缝的精确跟踪及焊接参数的在线调整,实现对熔池形状动态过程的智能控制。

弧焊机器人的应用范围很广,除了汽车行业之外,在通用机械、金属结构、航天航空、机车车辆及造船等行业都有应用。

国外军工企业,特别是坦克装甲战车焊接自动化程度较高,弧焊机器人应用也较广泛,德国、美国、英国、意大利及新加坡等国的坦克装甲战车车体和炮塔都已采用弧焊机器人进

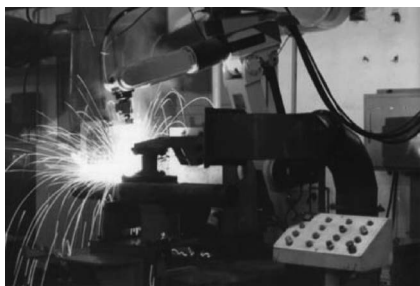


图 5.7 弧焊机器人实例

行熔化极保护焊接。美国某坦克厂采用四个机器人焊接工作站,9 台具有视觉导向功能的焊接机器人用于坦克车体和炮塔的自动化焊接工作。装甲战车的机器人焊接工艺也采用了高效、高速焊接工艺技术,其焊接速度与手工焊接相比总体提高十余倍。

我国弧焊机器人的应用主要集中在汽车、摩托车、工程机械、铁路机车等几个主要行业。汽车是弧焊机器人的最大用户也是最早用户。图 5.7 所示是

某弧焊机器人的应用实例。

5.1.3 装配机器人

装配机器人(Assembly Robot)是为完成装配作业而设计的工业机器人。装配作业的主要操作是:垂直向上抓起零部件,水平移动它,然后垂直放下插入。通常要求这些操作进行得既快又平稳,因此,一种能够沿着水平和垂直方向移动,并能对工作平面施加压力的机器人是最适于装配作业的。

装配机器人的大量作业是轴与孔的装配,为了在轴与孔存在误差的情况下进行装配,应使机器人具有柔顺性,即自动对准中心孔的能力。随着机器人智能程度的提高,有可能实现对复杂产品(如汽车发电机、电动机、电动打字机、收录机和电视机等)进行自动装配。柔顺运动概念的研究及其进展也有助于机械部件的自动装配工作。与一般工业机器人相比,装配机器人具有精度高、柔顺性好、工作范围小、与其他系统配套使用等特点,主要用于各种电器制造(包括家用电器,如电视机、录音机、洗衣机、电冰箱、吸尘器)、小型电机、汽车及其部件、计算机、玩具、机电产品及其组件的装配等方面。

1. 装配机器人的组成

装配机器人是柔性自动化装配系统的核心设备,由机器人操作机、控制器、末端执行器和传感系统组成。其中操作机的结构类型有水平关节型、直角坐标型、多关节型和圆柱坐标型等;控制器一般采用多 CPU 或多级计算机系统,实现运动控制和运动编程;末端执行器为适应不同的装配对象而设计成各种手爪和手腕等;传感系统用来获取装配机器人与环境和装配对象之间相互作用的信息。

2. 装配机器人的种类和特点

1) 水平多关节机器人

水平多关节机器人如图 5.23 所示,由连接在机座上的两个水平旋转关节(即大小臂)、沿升降方向运动的直线移动关节、末端手部旋转轴共 4 个自由度构成。它是特别为装配开发的专用机器人,其结构特点表现为沿升降方向的刚性高,水平旋转方向的刚性低,因此称为平面双关节型机器人(Selective Compliance Assembly Ro-bot Arm, SCARA)。它的作业空间与占地面积之比很大,使用起来很方便。

2) 直角坐标机器人

直角坐标机器人如图 5.24 所示,它具有 3 个直线移动关节。空间定位只需要 3 轴运动,末端姿态不发生变化。该机器人的种类繁多,从小型、廉价的桌面型到较大型应有尽有,而且可以设计成模块化结构以便加以组合,是一种很方便的机器人。它的缺点是尽管结构简单,便于与其他设备组合,但与其占地面积相比,工作空间较小。

3) 垂直多关节机器人

垂直多关节机器人如图 5.8 所示,它通常由转动和旋转轴构成 6 自由度机器人,它的工作空间与占地面积之比是所有机器人中最大的,控制 6 自由度就可以实现位置和姿态的定位,即在工作空间内可以实现任何姿态的动作。因此,垂直多关节机器人通常用于多方向的复杂装配作业,以及有三维轨迹要求的特种作业场景。关节结构比较容易密封,因此在 10 级左

右的洁净间内采用该类型机器人进行作业。装配机器人中垂直多关节机器人的手臂长度通常选 500(近似人的臂长)~1500mm。



图 5.8 装配机器人的类型

3. 装配机器人的主要应用

装配机器人系统用于汽车零件(发动机点火)的中、小批量生产。生产线如图 5.9 所示。该系统充分挖掘了装配机器人的功能,改善了设备的灵活性和可靠性,降低了生产成本,提高了设备利用率。装配机器人系统中机器人抓取前一道工序送来的工件,经过特定处理单元后送到下一道工序。各个单元都利用装配机器人的驱动力进行处理,因此整个系统结构十分简单。这样不但充分发挥了装配机器人本身的功能,而且降低了成本。采用标准处理单元能够大幅度地提高设备的使用率。

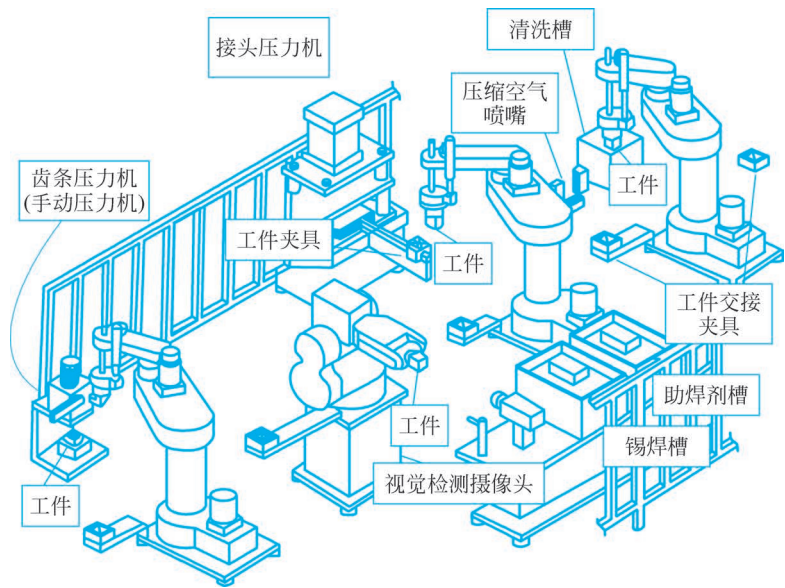


图 5.9 发动机点火部件

装配机器人系统由清洗、接头压入、锡焊、视觉检查、机壳压入等多道工序组成,下面分别给予简要的说明。

第一道工序为清洗。机器人从前一道工序的工件交接夹具中抓取出工件放入清洗槽内浸泡清洗,取出后再用压缩空气吹净工件上残留的切屑和清洗液。为了保证清洗效果,在机器人示教的时候,应该根据工件的形状选择最佳的浸泡部位和吹气方向。

在第二道工序中,机器人保持抓取工件的状态,同时推动工件交接夹具滑动,其结果使工件压入经接头压力机成形加工的接头中。此时,机器人运用位置检测功能能够实现接头压入力、深度、位置的调节。

第三道工序在嵌入后的工件接头上涂布助焊剂和锡焊。机器人抓取工件,将其浸泡在喷流槽中。为了获得高质量的锡焊,应该按照不同工件示教最佳浸泡条件。

在视觉检查工序中,用一台摄像机从多个方向检查工件。该系统的组成简单,检查可靠,还能适应于多种零件。

最后一道工序是借助于齿条压力机将机壳压入的工序。机器人具有力控制功能和位置检测功能,因此能够任意控制行程和压力,它不仅能给机壳施加给定的压力,而且还能检测加压过程中的异常情况,随时中断压入作业。

装配机器人系统具有以下特点:

- (1) 零件输送不靠传送带,降低了运输装置的成本;
- (2) 单元的动作均由机器人动作完成,节省了专用驱动器,降低了系统成本,提高了环境保护性能;
- (3) 借助机器人实现了适应工件形状、特征的最佳运动,有利于提高产品质量、增加多品种生产的柔性;
- (4) 充分挖掘了机器人的各种功能,节省了位置传感器、力传感器、尺寸测量仪等元器件,保证了作业质量。

装配机器人系统的投产得到以下效果:引入机器人,实现了作业的全自动化,大幅度提高了生产率;节省了约4名工人;通过发挥机器人的功能,优化运动示教,大幅度降低了废品率,实现了提高产量和稳定产品质量的目的;如果能够更换夹具,那么该系统除了能够适应同一尺寸外,还能够满足数十种型号产品的作业要求;使工人从焊接作业、目视检查作业等恶劣的作业环境解脱出来;与用传送带组成的自动化生产线相比,大约降低了40%的设备造价;在设备费比例中,可以节省50%的资金转作他用;系统简洁,与传统自动化生产线相比可以降低50%的设备停车时间。

装配工序引入装配机器人的优点如下。

(1) 设备的性能价格比高。

由于没有辊轮等移栽装置和搬运装置,因而缩短了设计和调试周期。机器人采用有标准产品,确保质量,提高了整套设备的可靠性。由此可知,通过充分挖掘机器人的功能,缩减周边设备,可以提高系统的性能价格比。

(2) 提高设备柔性。

由于机器人的程序和示教内容可以进行变更,修改动作方便,即使是在系统运行中,也可以对应产品设计的变更或工序的变更。

(3) 便于工艺改革。

引入装配机器人后,现场操作人员能够根据对机器人的动作观察,随时修改机器人程序,缩短了生产周期,降低了废品率,提高生产率。这一点专用设备组成的生产线难以达到,因为无论是变更夹具还是变更机械设备都很困难。

(4) 提高设备的运转率。

一般来说,产品模具的寿命到期后,专用设备也就报废了。但换成机器人后,它还可以重新构成其他设备。

综上所述,在装配工序引进机器人,除了让装配机器人发挥机器人本身的功能外,重要的是还要学习上面的例子,灵活运用,充分挖掘它的潜能。也就是说,对机器人的研究不局限在提高速度、精度、可靠性等基本性能方面,更要把精力放在提高关键性能的层面上,如发挥传感器、力控制、网络等功能。

5.1.4 激光加工机器人

激光加工机器人(Laser Robot)是将机器人技术应用于激光加工中,通过高精度工业机器人实现更加柔性的激光加工作业。对于激光加工机器人来说,是在激光技术和机器人技术两者之间充分融合而产生的。随着科学的进步,多个国家都致力于激光加工机器人的研发。

先进制造领域在智能化、自动化和信息化技术方面的不断进步促进了机器人技术与激光技术的结合,特别是汽车产业的发展需求,带动了激光加工机器人产业的形成与发展。从20世纪90年代开始,德国、美国、日本等发达国家先后投入大量人力物力进行研发激光加工机器人。进入2000年,德国KUKA、瑞士ABB、日本FANUC等机器人公司均开始研制激光焊接机器人和激光切割机器人的系列产品。目前在国内外汽车产业中,激光焊接机器人和激光切割机器人已成为最先进的制造技术,获得了广泛应用。德国大众汽车、美国通用汽车、日本丰田汽车等汽车装配生产线上,已大量采用激光焊接机器人代替传统的电阻点焊设备,不仅提高了产品质量和档次,而且减轻了汽车车身重量,节约了大量材料,使

企业获得更高的经济效益,提高了企业市场竞争力。在中国,一汽大众、上海大众汽车公司也引进了激光机器人焊接生产线。目前,有沈阳新松机器人公司涉足激光切割和焊接机器人制造领域。

1. 激光加工机器人系统组成

激光加工机器人是一项高度柔性的加工系统,基于这个原因,其组成激光机器人的各种激光器也要具备高度的柔性,现阶段,我国在研制过程中,所用的激光器都是可光纤传输的激光器。整个激光加工系统的组成包括很多零件,主要部件有 10 部分。首先是高功率可光纤传输激光器;其次是两个系统:传送系统和光学系统,要想使激光加工机器人正常工作,还要有一个机器人本体,其自由度一般是 6 自由度;数字控制系统主要设备有两个:控制器和示教盒;激光加工机器人的完成是建立在计算机技术基础之上的,因而还要具有计算机离线编程系统,它所用的设备主要包括计算机和软件;此外,为工作所需,在机器人系统中安装机器视觉体系是必不可少的;此外,还包括激光加工头、材料进给系统以及加工工作台等。图 5-10 所示为一种激光熔覆机器人,各部分为:①高功率可光纤传输激光器;②光纤耦合和传输系统;③激光光束变换光学系统;④6 自由度机器人本体;⑤机器人数字控制系统(控制器、示教盒);⑥计算机离线编程系统(计算机、软件);⑦机器视觉系统;⑧激光加工头;⑨材料进给系统(高压气体、送丝机、送粉器);⑩激光加工工作台。

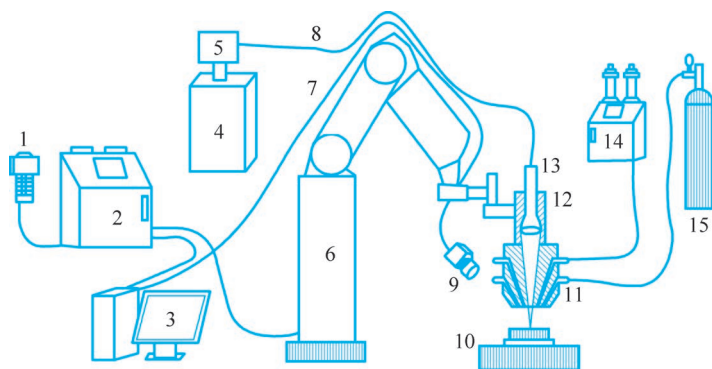


图 5.10 激光熔覆机器人组成示意图

2. 激光加工机器人类型

工业用途不同,激光机器人的种类也不尽相同,一般而言,可以将机器人分为两种类型:一类是框架式激光加工机器人,第二类是关节式激光加工机器人,两种激光加工机器人由于工作需求不尽相同,其构成的系统也不同,对于框架式激光加工机器人而言,其主要组成结构包括一个龙门框架、三个系统(控制系统、驱动系统、监测系统)、一个激光器等,这种

激光加工机器人的主要优势在于具有广泛的应用范围之外,对于一些精度较高的工业产品,也可以利用这种机器人进行生产,一般而言,其可适用于各种编程以及系统集成等,由于其性价比相对较高,价格较为划算,因而被广泛地推广应用。对于关节式激光加工机器人而言,它的组成结构和框架式类似,但是在此基础上多了一个机器人本体系统,和框架式激光加工机器人相比较,这种激光加工机器人的优势是活动空间较大,其动作也相对灵活,但是在价格上相对较贵,由于它具有优越的性能,因而也被广泛地应用于工业生产线上。

激光加工机器人的关键技术包括以下。

(1) 激光加工机器人结构优化设计技术:采用大范围框架式本体结构,在增大作业范围的同时,保证机器人精度;

(2) 机器人系统的误差补偿技术:针对一体化加工机器人工作空间大、精度高等要求,并结合其结构特点,采取非模型方法与模型方法相结合的混合机器人补偿方法,完成了几何参数误差和非几何参数误差的补偿。

(3) 高精度机器人检测技术:将三坐标测量技术和机器人技术相结合,实现了机器人高精度在线测量。

(4) 激光加工机器人专用语言实现技术:根据激光加工及机器人作业特点,完成激光加工机器人专用语言。

(5) 网络通信和离线编程技术:具有串口、CAN 等网络通信功能,实现对机器人生产线的监控和管理;并实现上位机对机器人的离线编程控制等。

3. 激光加工机器人技术的主要应用

1) 机器人激光焊接

焊接是流水线生产中常见的工序,需要大量的人工。焊接工作不仅对焊接精度有着较高的要求,而且对操作人员的身体、眼睛产生较大的伤害。同时人工操作受到施工环境和个人技术水平的限制,经常出现焊接点不牢靠、不美观等现象。汽车领域应用焊接技术最为普遍,是最早将机器人焊接技术引进流水线生产体系中工业生产单位,虽然较人工操作有较大的进步,但其效果较机器人激光焊接技术低。机器人激光焊接的优越性主要表现为:一是提高了焊接的速度和精度,进而提高了车身的刚度;二是为车身的性能和安全性提供了保障,提高了车辆的安全系数;三是激光焊接无需与车身直接接触,保证了车身线条的流畅性;四是网络技术的应用,机器人可以自行调节,同时从事多个工作内容,避免一个机器人只从事一项工作内容所造成的场地、资源、时间等方面的浪费。

2) 机器人激光切割

在工业生产中需要对零部件进行切割,进而制作出满足应用需求的零部件。机器人切割的速度不仅较快,同时精度更高,已经普遍地应用到汽车制造领域。现阶段在通用汽车公司、大众汽车公司的汽车生产线上,已经大批量地引进并应用机器人激光切割技术。采用机器人激光切割的方式来切割车身,使车身的线条更加流畅、自然,满足客户的需求。

3) 机器人激光再制造

机器人激光再制造技术的应用是由于现有的制作产品出现破损,对其进行修复,其应用的优点主要表现为受热范围小,在高能量的作用下有效地保护基体材料。由于机器人激光再制造技术所具有的优点,将其广泛地应用到汽车模具修复和冶金工业中。汽车模具是汽车生产的重要依据,模具不仅制作工艺复杂而且价格较高,为了减少模具对汽车生产的影响,所以要对其进行修复。采用常规的修复技术需要注入大量的热量,并且受到热量和修复技术的影响,模具在修复的过程中经常存在变形的现象。应用机器人激光再制造技术之后,修复模具的工作不仅简单容易,而且修复质量更高。在冶金工业中,轧辊受到工作环境的影响,经常出现损伤,使用周期较短,并且轧辊的价格较高的情况,增加了生产成本,而利用机器人激光再制造技术对其进行修复,降低了生产成本。

4) 机器人激光直接制造

激光机器人自身所具有的特点和优越性能,能够满足生产和制造等多个领域的需求,机器人激光技术不仅可以应用到再制造领域中,对模具和机械设备进行修复,保证生产的顺利进行,同时也可以应用到直接制造的过程中。在直接制造领域,激光加工机器人比传统的机器人自由度更高,能够较好地调整生产空间的曲面,并且处理曲面上复杂的程序和部分。在生产过程中直接应用激光加工机器人,不仅生产效率提升,而且其产品质量较高,为社会提供更多高质量的产品。

5.2 移动机器人

通常所说的移动机器人是指一种由传感器、遥控操作器和自动控制的移动载体组成的采用遥控、自主或半自主等方式由人类对其进行控制的一类机器人。移动机器人因比一般机器人有更大的机动性、灵活性,故通常工作在劳动强度大、人类无法进入或对人类有危害的场景中,代替人类进行工作。移动机器人除用于宇宙探测外,在核工业设备的维护与检修、消防、爆炸物的处理、防爆、排雷、军事侦察、矿井维护与采矿、隧道凿岩、等方面也有广泛的应用。

移动机器人随其应用环境和移动方式的不同,研究内容也有很大差别。其共同的基本技术有传感器技术、移动技术、操作器技术、控制技术、人工智能等方面。它有相当于人的眼、耳、皮肤的视觉传感器、听觉传感器和触觉传感器。移动机构有轮式(如四轮式、两轮式、全方向式、履带式)、足式(如6足、4足、2足)、混合式(用轮子和足)、特殊式(如吸附式、轨道式、蛇式)等类型。轮子适于平坦的路面,足式移动机构适于山岳地带和凹凸不平的环境。移动机器人的控制方式从遥控、监控向自治控制发展,综合应用机器视觉、问题求解、专家系统等人工智能技术研制自制型移动机器人。

5.2.1 移动机器人的发展历程

20世纪60年代以来,机械加工、弧焊点焊、喷涂、装配、检测等各种类型的机器人相继出现并迅速在工业生产中实践应用,这大大提高了各种产品的一致性和质量。然而,随着机器人的不断发展,人们发现,这些固定于某一位置操作的机器人并不能完全满足各方面的需要。因此,20世纪80年代后期,许多国家有计划地开展了移动机器人技术的研究。所谓移动机器人,就是一种具有高度自规划、自组织、自适应能力,适合于在复杂的非结构化环境中工作的机器人。自主式移动机器人的目标是在没有人为干预且无须对环境作任何规定和改变的条件下,有目的地移动和完成相应的任务。在自主式移动机器人相关技术的研究中,导航技术是其研究核心,也是移动机器人实现智能化及完全自主的关键技术。导航研究的目标就是:在没有人干预下使机器人有目的地移动并完成特定任务,进行特定操作。机器人通过装配的信息获取手段,获得外部环境信息,实现自我定位、判定自身状态,规划并执行下一步的动作。因此单从系统硬件层次上讲,移动机器人必须具有丰富的传感器、功能强大的计算机以及灵活和精确的驱动系统。

60年代后期,美国和苏联为完成月球探测计划,研制并应用了移动机器人。美国“探测者”3号,其操作器在地面的遥控下,完成了在月球上挖沟并执行了其他任务。苏联的“登月者”20号在无人驾驶的情况下降落在月球表面,操作器在月球表面钻削岩石,把土壤和岩石样品装进回收容器并送回地球。

从20世纪80年代开始,美国国防高级研究计划局(DARPA)专门立项,制定了地面无人作战平台的战略计划。从此,在全世界掀起了全面研究移动机器人的序幕,如DARPA的“战略计算机”计划中的自主地面车辆(ALV)计划(1983—1990),能源部制定的为期10年的机器人和智能系统计划(RIPS,1986—1995),以及后来的空间机器人计划;日本通产省组织的极限环境下作业的机器人计划;欧洲尤里卡中心的机器人计划等。

20世纪90年代初期德国研制了一种轮椅机器人,并在乌尔梅市中心车站的客流高峰

期的环境中和 1998 年汉诺威工业商品博览会的展览大厅环境中进行了实地现场表演。该轮椅机器人在公共场所拥挤的有大量乘客的环境中,经历了超过 36 个小时的考验,所表现出的性能是其他现存的轮椅机器人或移动机器人不可匹敌的。

此外,国外还出现了一种独轮机器人,它与静态稳定性的多轮机器人相比,具有更好的动态稳定性、对姿态干扰的不敏感性、高度可操作性、低的滚动阻力、跌倒的恢复能力和水陆两用性。

我国在移动机器人的研究起步较晚,但也取得了一系列的成果。清华大学智能移动机器人于 1994 年通过鉴定。涉及五个方面的关键技术:基于地图的全局路径规划技术研究(准结构道路网环境下的全局路径规划,具有障碍物越野环境下的全局路径规划,自然地形环境下的全局路径规划);基于传感器信息的局部路径规划技术研究(基于多种传感器信息的“感知-动作”行为,基于环境势场法的“感知-动作”行为,基于模糊控制的局部路径规划与导航控制);路径规划的仿真技术研究(基于地图的全局路径规划系统的仿真模拟,室外移动机器人规划系统的仿真模拟,室内移动机器人局部路径规划系统的仿真模拟);传感技术、信息融合技术研究(差分全球卫星定位系统、磁罗盘和光码盘定位系统、超声测距系统、视觉处理技术、信息融合技术);智能移动机器人的设计和实现(智能移动机器人 THMR-III 的体系结构、高效快速的数据传输技术、自动驾驶系统)。另外,香港城市大学智能设计、自动化及制造研究中心的自动导航车和服务机器人;中国科学院沈阳自动化研究所的 AGV 和防爆机器人;中国科学院自动化所自行设计、制造的全方位移动式机器人视觉导航系统等均为我国移动机器人领域重要成果。

5.2.2 移动机器人的基本组成

移动机器人可以从不同的角度进行分类。如从工作环境分为室内和室外机器人;从移动方式分为轮式、履带式、步行、蛇形、爬行机器人;从作业空间分为陆地、水下、空间机器人;从功能和用途可分为医疗、军用、助残、清洁机器人等。无论哪种机器人,通常都可以认为由驱动系统、控制系统、传感系统三大最基本的部分组成。

1. 驱动系统

驱动系统在移动机器人中的作用相当于人体的肌肉和骨骼,如果把连杆以及关节想象为机器人的骨骼,那么驱动器就起着肌肉的作用,它们共同构成了机器人的驱动系统。移动机器人在运动过程中通过驱动器来驱动自身的运动,到达不同的地点执行任务。通过移动或转动连杆来改变机器人的构型,从而完成相应的操作任务。

对于移动机器人来说,无论是轮式、足式还是混合式的移动机构,其运动时都离不开驱动器的驱动,如驱动部分采用了坦克的行走方式的机器人,左右两侧的履带分别由两台电机驱动。两台电机同步旋转时,机器人直线前进;两台电机的转速不同时,机器人转弯。因此驱动器必须有足够的功率对连杆进行加/减速并带动负载;同时,驱动器自身必须轻便、经济、精确、灵敏、可靠且便于维护。

目前已有许多实用的驱动器。毫无疑问,今后还将有更多的驱动器。目前常用的驱动器有:电动机、伺服电机、步进电机、直接驱动电动机、液压驱动器、气动驱动器、形状记忆金属驱动器、磁致伸缩驱动器等。

电动机尤其是伺服电机是最常用的移动机器人驱动器。在工业机器人中,液压系统使用非常普遍,现在在许多场景仍然常见,但在新的移动机器人中已不再常用了。而直接驱动电动机、形状记忆金属驱动器以及其他类似的驱动器目前还主要处于研究和发展阶段,在不远的将来会变得非常有用。

2. 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完成固定的运动和功能。移动机器人的控制系统是以计算机控制技术为核心的实时控制系统,它的任务就是根据移动机器人所要完成的功能,结合移动机器人的本体结构和运动方式,完成机器人的既定任务。控制系统是移动机器人的大脑,它的优劣决定了机器人的智能水平、工作柔性及灵巧性,也决定了移动机器人使用的方便程度和系统的开放性。

移动机器人的控制系统是由机器人所要达到的功能、机器人的本体结构和机器人的控制方式决定的。从机器人控制算法的处理方式来看,控制系统结构如图 5.11 所示。

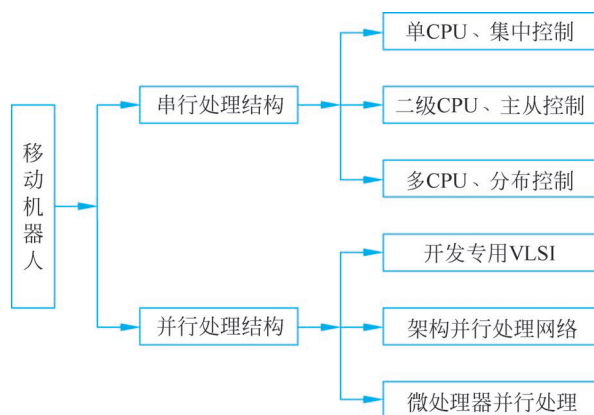


图 5.11 移动机器人的控制系统结构

除控制算法外,移动机器人的控制系统还包括硬件结构。目前,移动机器人的控制系统普遍采用上、下位机二级分布式结构:上位机负责整个系统的管理以及运动学计算、轨迹规划等;下位机由多 CPU 组成,每个 CPU 控制一个关节运动,这些 CPU 和主控机是通过总线联系的。

典型的移动机器人的控制系统硬件组成结构图,如图 5.12 所示。

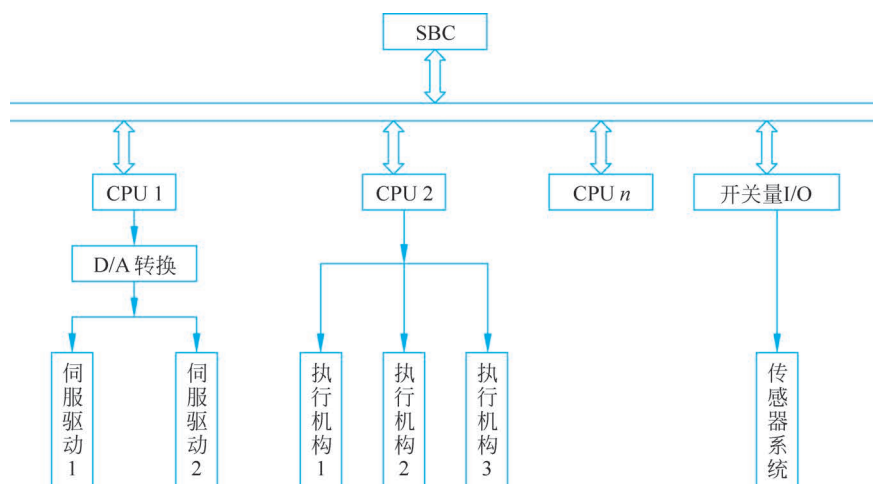


图 5.12 控制系统硬件组成

3. 传感系统

研究移动机器人的目的,就是为使其能替代人类的劳动去完成一些工作,故研究机器人,首先从模仿人类开始。首先,人数在运动的过程中可以感觉到自己身体的状况,如通过前庭及小脑的功能来感受自己身体是否站得稳,并通过神经系统来感受自己肌肉的状态,这是对人體自身信息的一个反馈。除此之外,人们是通过五官(视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉)来接收外界信息的。这是人类对外部环境状态的反馈。

同样地,如果希望机器代替人类劳动,就必须使机器人具有感知自身内部状态和外部环境状态的能力。传感器处于连接外界环境与机器人的接口位置,是机器人获取信息的窗口。通过位置传感器、速度传感器、加速度传感器、倾角传感器等来获得移动机器人自身的信息,并将这些信息反馈回来由控制系统来控制移动机器人的自身状态。而通过接近觉传感器、触觉传感器、滑觉传感器、视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器,电磁感知传感器等感知外部环境,与外部交流,可以实现目标识别、避障和路径规划等。

移动机器人所用的传感器分类与工业机器人所不同的是,工业机器人大多数仅采用内部传感器,用于对机器人运动、位置及姿态进行精确控制。而移动机器人因其任务不同,除采用内部传感器对自身的姿态进行控制外,还需采用大量的外部传感器获得自身的定位及

外部环境的适应能力。如为了感觉是否有目标物体接近和接近的距离而采用的接近觉传感器等。

5.2.3 轮式移动机器人

1. 轮式移动机构设计

轮式移动机器人的设计重点聚焦在其车轮上,通过车轮的滚动来实现工作任务,达到“移动”的目的。该类机器人车轮的形状或结构形式取决于地面性质和车辆承载能力。不同的车轮形式有其不同的应用场景,比如在轨道上运行的移动机器人多采用实心钢轮,而用于室外路面行驶的机器人则采用充气轮胎,对于工作在室内平坦地面上的则可采用实心轮胎等。

图 5.13、图 5.14 和图 5.15 分别给出了传统的车轮形状和球轮等的形状示意图。

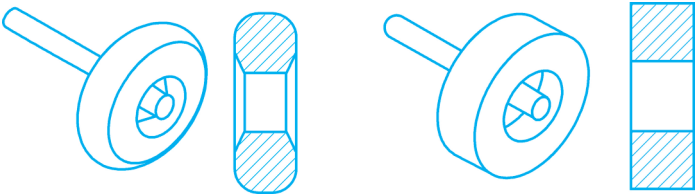


图 5.13 传统的车轮形状



图 5.14 球轮、充气球轮和锥形轮

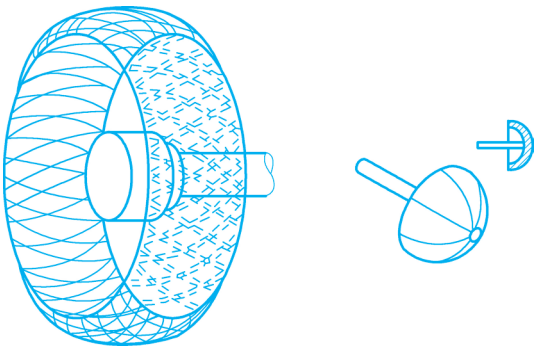


图 5.15 超轻金属线编织轮、半球形轮

在以上图中所列出的一列车轮类型中,传统的车轮形状比较适合于平坦的坚硬路面。充气球轮比实心车轮弹性好,能吸收因路面不平而引起的冲击和振动。此外充气球轮与地面的接触面积较大,特别适合于沙丘地形。超轻金属线编织轮、半球形轮这两种轮是为火星表面移动车辆开发而研制的,其中超轻金属线编织轮主要用来减轻移动机构的重量,减少升空时的发射功耗和运行功耗。

移动机器人车轮形式设计要考虑的一个重要部分是全方位移动机构的实现,全方位移动机构能够在保持机体方位不变的前提下沿平面上任意方向移动。更进一步地,有些全方位车轮机构除具备全方位移动能力外,还可以像普通车辆那样改变机体方位。由于这种机构的灵活操控性能,所以特别适合于窄小空间(通道)中的移动作业。

全轮偏转式全方位移动机构的原理如图 5.16 所示。

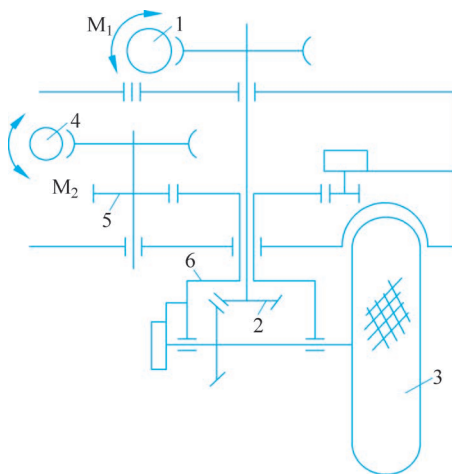


图 5.16 全轮偏转式全方位移动机构

1—蜗轮蜗杆副; 2—锥齿轮副; 3—车轮; 4—蜗轮蜗杆副; 5—齿轮副; 6—车轮支架

在全轮偏转式全方位移动机构中,行走电动机 M_1 运转时,通过蜗轮蜗杆副 1 和锥齿轮副 2 带动车轮 3 转动。当转向电动机 M_2 运转时,通过另一对蜗轮蜗杆副 4、齿轮副 5 带动车轮支架 6 适当偏转。当各车轮采取不同的偏转组合,并配以相应的车轮速度后,便能够实现前轮操舵、4 轮操舵、全方位方式和原地回转等转动方式。

一种典型的能实现全方位移动的车轮形式称为麦卡纳姆轮,其结构如图 5.17 所示。

麦卡纳姆轮是一种全方位 4 轮移动机构。这种车轮由两部分组成,即主动的轮毂和沿轮毂外缘按一定方向均匀分布着的多个从动轮子。当车轮旋转时,轮心相对于地面的速度是轮毂速度与轮子滚动速的合成,两个夹角间有一个偏离角。由于每个车轮均有这个特点,经适当组合后就可以实现车体的全方位移动和原地转向运动。

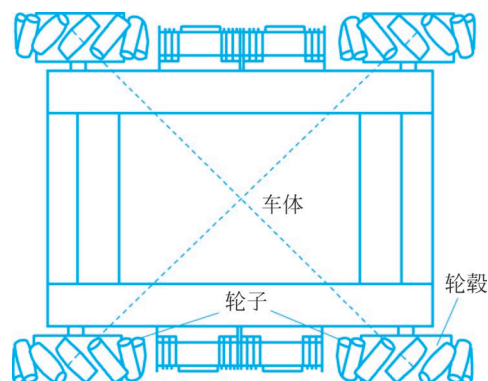


图 5.17 麦卡纳姆轮

轮式移动机构依据车轮的多少分为 1 轮式移动机构、2 轮式移动机构、3 轮式移动机构、4 轮式移动机构以及多轮式全方位移动车。

(1) 1 轮式移动机构。

虽然独轮车作为机器人移动机构几乎没有实用性。但为了达到教学效果,现在还在试制。原理上不仅在平地行走,也可能在不平整地面和倾斜地面等上面行走。车体的回转可以利用陀螺仪加速、减速产生的反力矩实现。

(2) 2 轮式移动机构。

人们把非常简单、便宜的自行车或 2 轮摩托车用在机器人上的试验很早就进行了。但是人们很容易就认识到 2 轮车的速度、倾斜等物理量稍度不高,如进行机器人化,引进简单、便宜、可靠性高的传感器也有难度。此外,2 轮车制动时以及低速行走时也极不稳定,目前正在行使其稳定化的试验。图 5.18 是利用陀螺仪的 2 轮车。人们在驾驶 2 轮车时,依靠手的操作和体重的移动力求稳定行走,这种陀螺 2 轮车,把与车体倾斜成比例的力矩作用在轴系上,利用陀螺效果使车体稳定。

1 轮式和 2 轮式移动机构在实现上的主要障碍是稳定性问题。目前已有人致力于单轮直立控制研究和双轮稳定行驶试验等工作。比如南洋理工大学研制的 Segbot 双轮机器人,该机器人配置了笔记本电脑控制器、二维激光探测器、差分 GPS 天线、无线 MODEM、CCD 摄像机等,实现了稳定行走。

(3) 3 轮式移动机构。

3 轮移动机构是车轮型机器人的基本移动机构。目前,作为移动机器人的移动机构用的 3 轮机构的原理如图 5.19 所示。

图 5.19(a)是后轮用 2 轮独立驱动,前轮用小脚轮构成的辅助轮组合而成。这种机构的特点是机构组成简单,而且旋转半径可从 D 到无限大任意设定。但是它的旋转中心是在连接两驱动轴的直线上,所以旋转半径即使是零,旋转中心也与车体的中心不一致。

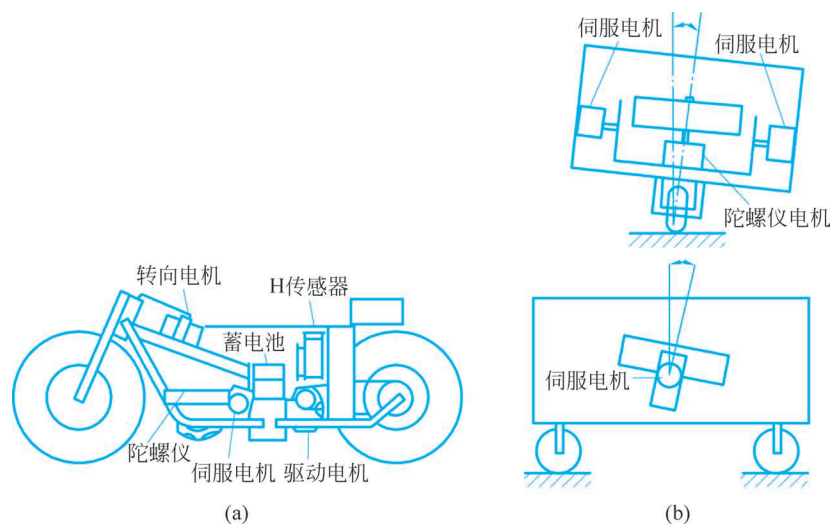


图 5.18 利用陀螺仪的 2 轮车

图 5.19(b)中前轮由操舵机构和驱动机构合并而成。与图 5.19(a)相比,操舵和驱动的驱动器都集中在前轮部分,所以机构复杂。在这种场合,旋转半径可以从零到无限大连续变化。

图 5.19(c)是为避免图 5.19(b)机构的缺点,通过差动齿轮进行驱动的方式。近年来不再用差动齿轮,而采用左右轮分别独立驱动的方法。

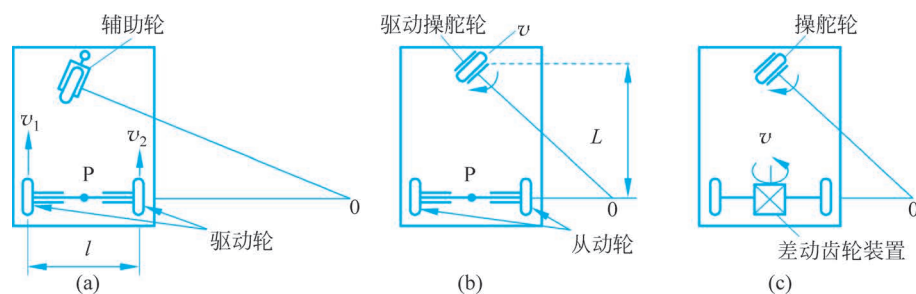


图 5.19 3 轮车型移动机器人的结构

(4) 4 轮式移动机构。

4 轮车的驱动机构和运动基本上与 3 轮车相同。图 5.20(a)是两轮独立驱动,前后带有辅助轮的方式。与图 5.19(a)相比,当旋转半径为零时,由于能绕车体中心旋转,所以有利于在狭窄场所改变方向。图 5.20(b)是所谓汽车方式,适合于高速行驶,但用于低速的运输搬运时,由于费用不合算,所以小型机器人少有采用。

还有依据使用目的,使用 6 轮驱动车和车轮直径不同的轮胎车,也有的提出利用具有柔性机构车辆的方案。图 5.21 是火星探测用的小漫游车的例子。

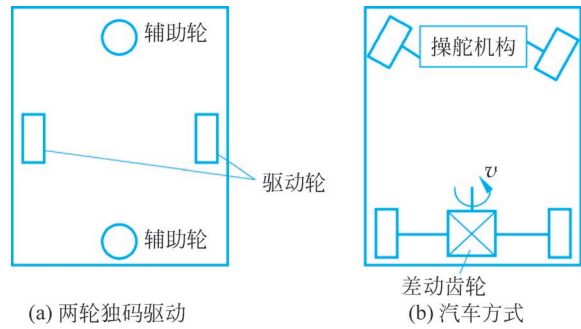


图 5.20 4 轮车的驱动机构和运动

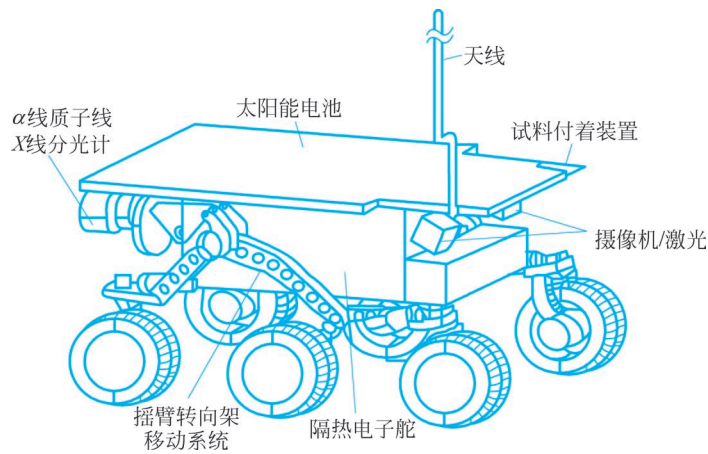


图 5.21 火星探测漫游车

实际应用的轮式移动机构多为 3 轮或 4 轮。3 轮式移动机构具有一定的稳定性,要解决的主要问题是移动方向和速度的控制,代表性车轮配置方式是 1 个前轮,2 个后轮。2 个后轮独立驱动,前轮仅起支承作用。靠后 2 轮的转速差实现转向。也有采用前轮驱动前轮转向的方式,或后轮差动急速器驱动前轮转向的方式。对于 2 后轮独立驱动的机构,当 2 轮转速大小相等方向相反时,可以实现整车灵活的零半径回转;但是如果沿比较长的直线移动时,因两驱动轮的直径差和转速误差会影响到前轮的偏转,这时候采用前轮转向方式更合适。至于 4 轮移动机构,它的应用则更为广泛。因为 4 轮机构可采用不同的方式实现驱动和转向。

(5) 全方位移动车。

过去的车轮式移动机构基本上是 2 自由度的,因此不可能简单地实现任意的定位和定向。机器人的定位,用 4 轮构成的车可通过控制各轮的转向角来实现。自由度多,能简单设定机器人所需位置及方向的移动车称为全方位移动车。图 5.22 是表示全方位移动车移动方式的各车轮的转向角。

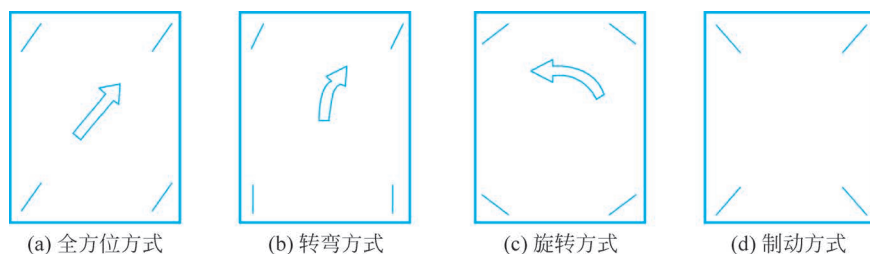


图 5.22 全方位移动车的移动方式

2. 轮式排爆机器人

正如移动机器人的发展初衷是代替人类去危险的场所工作一样,轮式排爆机器人是对爆炸物品、有嫌疑的不明物品进行现场侦查、排爆或者转移爆炸物品的移动机器人。

目前有代表性的轮式排爆机器人主要有 ABP 公司的以下三种:

1) 野牛中型排爆机器人

野牛中型排爆机器人可无线遥控或采用一个便携式装置通过光纤操作。它装有 4 轮驱动防滑转向装置,具有很高的机动性和负载能力(可携带 100kg 物品),结实耐用、性能可靠、操作简单。并且配备有一个改良的 MK8 式手推车武器包。由于其设计标准,还能轻易安装各种附件(包括热成像摄像机、传感器等)。



图 5.23 野牛中型排爆机器人

2) 土拨鼠排爆机器人

土拨鼠排爆机器人可遥控距离达 1km,自身质量 35kg,在桅杆上装有 2 台摄像机,有助于前进及倒车。它的关节式机械手的高度可达 2m,在水平及倾斜头上装有一台彩色变焦摄像机,用来对爆炸物识别和定位。它主要用于对未爆炸的和临时放置的爆炸装置进行定位和鉴定。

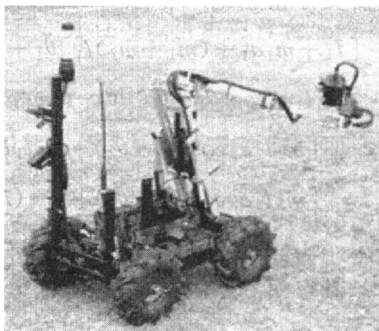


图 5.24 土拨鼠排爆机器人

这种土拨鼠排爆机器人在伊拉克战场上得到了广泛的应用,大大减少了排爆士兵的伤亡人数。

3) 独眼龙排爆机器人

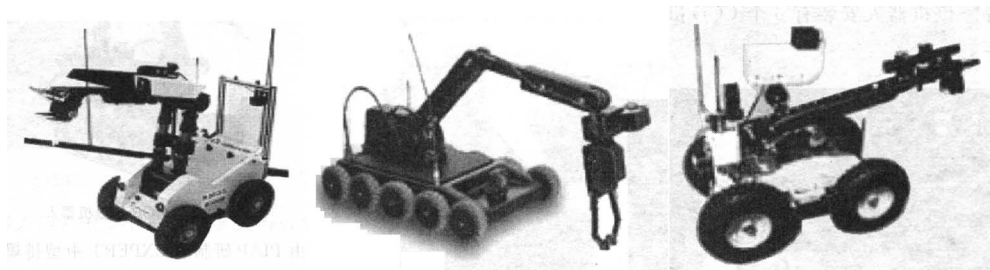
独眼龙排爆机器人有 6 个轮子,并有一个用胶链连接的平台。平台可以安装各种设备,包括聚光灯、爆炸物排除手臂,及借助激光指示器瞄准的半自动猎枪和用于化学探测的设备。



图 5.25 独眼龙排爆机器人

独眼龙排爆机器人由可充电的电池驱动,可以连续工作 3h。独眼龙排爆机器人的质量约为 30kg,可通过无线遥控或通过光纤进行操作。它主要用于拆卸未爆炸装置和常规武器,或其他存在高风险的危险领域。

此外,轮式排爆机器人还有法国 DM Development 公司研制的 RM35 型爆炸物处理机器人,如图 5.26(a)所示;加拿大 Pedasco 公司研制的 MURV-100 小型排爆机器人,如图 5.26(b)所示。加拿大 Pedasco 公司研制的 RMI-10 中型排爆机器人,如图 5.26(c)所示。



(a) RM35型爆炸物处理机器人 (b) MURV-100小型排爆机器人 (c) RMI-10中型排爆机器人

图 5.26 其他轮式排爆机器人

5.2.4 履带式移动机器人

履带式机构称为无限轨道方式,履带式移动机器人是轮式移动机构的拓展,其最大特征是将圆环状的无限轨道履带(Crawler Befit)卷绕在多个车轮上,使车轮不直接与路面接触。适合在未加工的天然路面上行走,因为履带本身起着给车轮连续铺路的作用。

履带式移动机器人与轮式移动机构相比具有如下特点。

- (1) 支承面积大,接地比压小,路面保持力强,适合于松软或泥泞场地作业,下陷度小,滚动阻力小,通过性能较好,能登上较高的台阶;
- (2) 越野机动性好,爬坡、越沟等性能均优于轮式移动机构。重心低,较稳定,并且能够原地旋转;
- (3) 履带支承面上有履齿、不易打滑,牵引附着性能好,有利于发挥较大的牵引力;
- (4) 结构复杂,重量大,运动惯性大,减振性能差,零件易损坏。

如图 5.27 所示是 TEODOR 型履带式移动机器人。

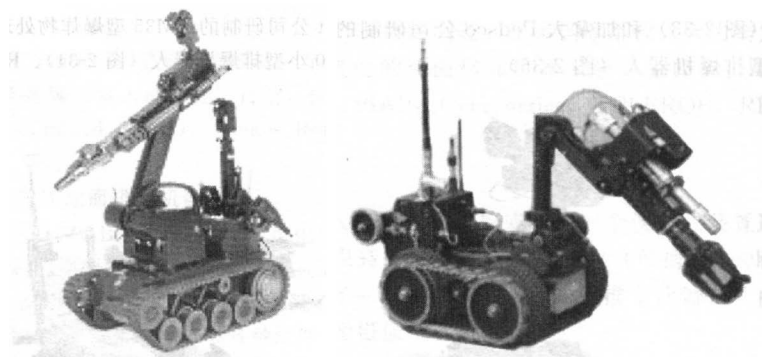
正是由于履带式移动机器人与轮式机器人相比支承面积大、接地比压小、路面保持力强,适合于松软或泥泞场地作业;下陷度小、滚动阻力小、通过性能较好,能登上较高的台阶;履带式排爆机器人更适合于复杂条件下的工作,因此,履带式排爆机器人得到了较大的发展。下面介绍几种常见的履带排爆机器人。

(1) 法国 Cybernetics 公司的 TEODOR 排爆机器人,如图 5.28(a)所示。

这种机器人是为与用户紧密结合而设计的,装有内置望远镜的机械臂长达 2.8m,有效载荷 30kg。该系统采用了全履带式底盘,具有极好的越野能力,驱动机械臂的电动机采用的是四象限控制系统,可以在前进和后退的过程中进行各种操作。



图 5.27 TEODOR 型履带式移动机器人



(a) TEODOR排爆机器人

(b) CASTOR小型排爆机器人

图 5.28 排爆机器人

(2) 法国 Cybernetics 公司的 CASTOR 小型排爆机器人,如图 5.28(b)所示。

这种机器人可以实现敌方侦察和干预功能,用来处理和销毁爆炸物,同时也适用于核放射或生化污染环境。由于其体积小,可以通过汽车或者直升机运载,配备的电池组可以实现持续工作 24h,且该电池组可以在 10s 内更换。

(3) PIAP 公司的 EXPERT 中型排爆机器人。

这种机器人可以在飞机、汽车和火车等有限空间内执行任务,机械臂的最远触及长度接近 3m,可以伸直部分难以进入的空间抓取爆炸装置。因此在反恐行动中应用非常广泛。

(4) TELEROB 公司的 TEL600 型爆炸处理车,如图 5.30(a)所示。

(5) TELEROB 公司的 POLYFIMOS 3000 型防爆机器人,如图 5.30(b)所示。

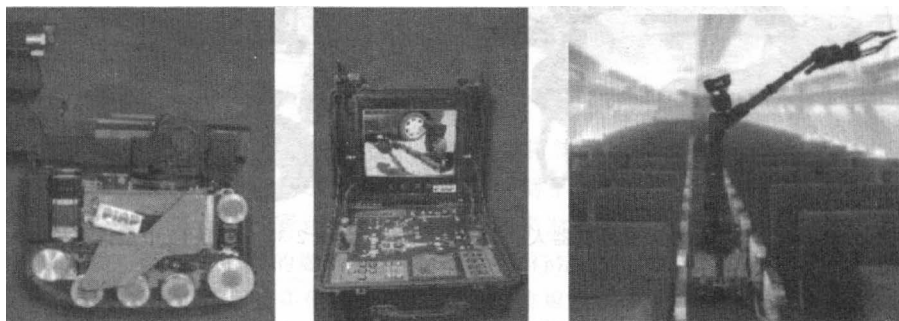
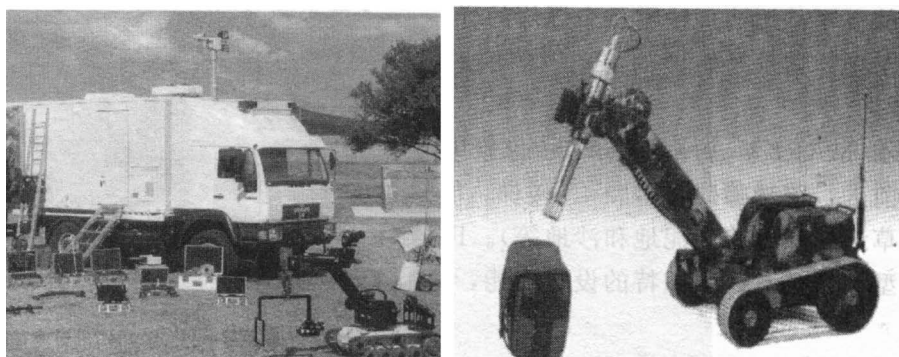


图 5.29 EXPERT 中型排爆机器人



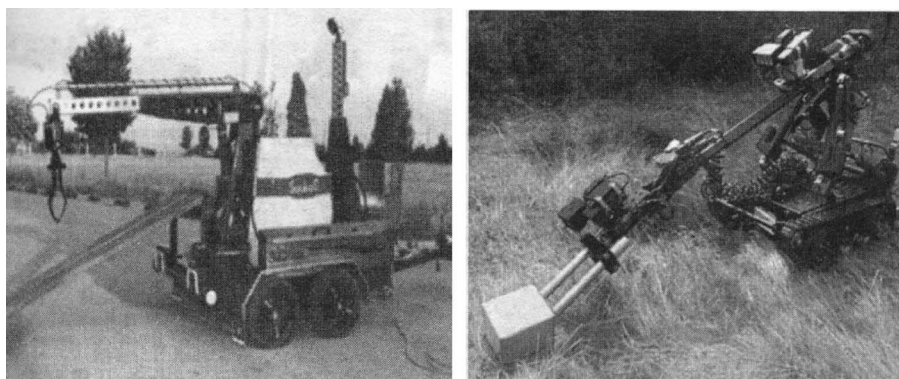
(a) TEL600型爆炸处理斗

(b) POLYFIMOS 3000型防爆机器人

图 5.30

(6) Soukos Robots S. A. 的机器人坦克,如图 5.31(a)所示。

(7) 英国的 MK7 系列最新改进 SUPER M 手推机器人,如图 5.31(b)所示。



(a) 机器人坦克

(b) 改进SUPER M手推机器人

图 5.31

除了以上常见的履带式移动机器人外,还有轮履复合式排爆机器人。如美国 Remotec 公司 Andros Mark VIA 系列 F6A 机器人(如图 5.32(a)所示)及最新设计的 Mini-Andros II 机器人(如图 5.32(b)所示)。

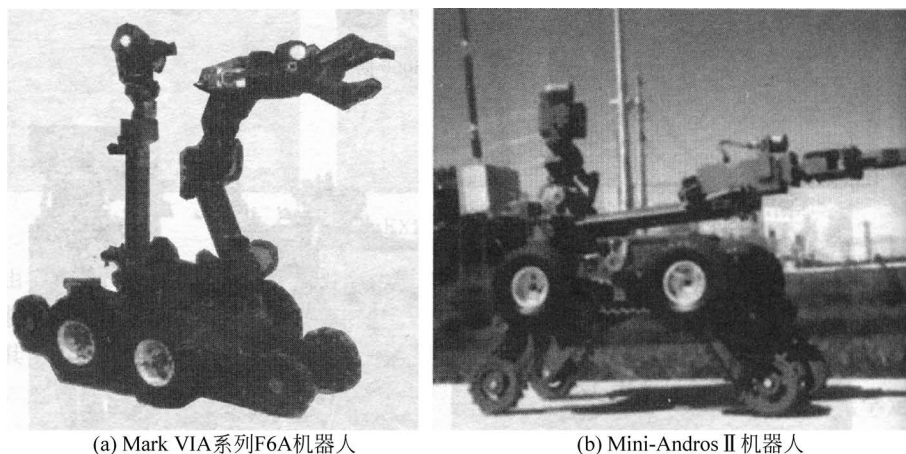


图 5.32 机器人

5.3 拟人机器人

拟人机器人是模仿人的形态和行为而设计制造的一种外形近似人类的机器人,是真正字面意义上或狭义的机器人。由于拟人机器人集机械、电子、计算机、材料、传感器、控制技术等多门学科于一体,是一个国家高科技实力和发展水平的重要标志,因此世界上发达国家都不惜投入巨资进行开发研究。其中以日本和美国的研究最为深入,日本方面侧重于外形仿真,美国则侧重于开发计算机模拟人脑的研究。

5.3.1 拟人机器人的发展历史

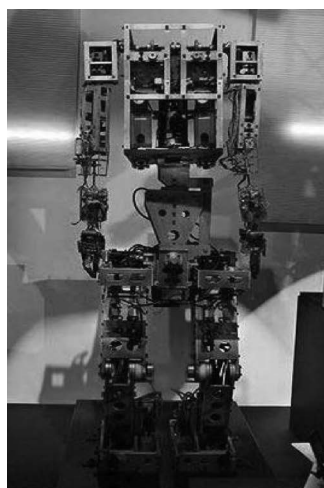
拟人机器人的研制开始于 20 世纪 60 年代末,距今只有三十多年的历史。然而,拟人机器人的研究工作进展迅速,如今已成为机器人技术领域的主要研究方向之一。

1968 年,美国的 R. Smosher(通用电气)公司试制了一台叫“Rig”的操纵型双足步行机器人机械,从而揭开了拟人机器人研制的序幕。

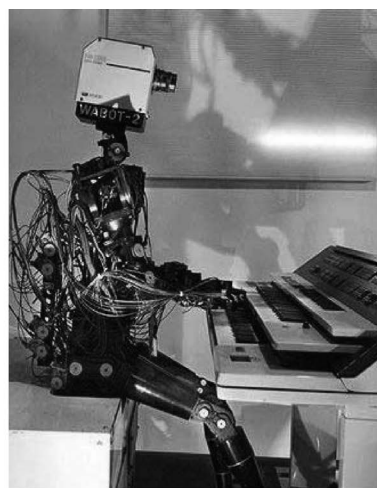
1968 年,早稻田大学加藤一郎教授在日本首先开展了双足机器人的研制工作。1969 年研制出了 WAP-1(Waseda Automatic Pedipulator)平面自由度步行机。该机器人具有 6 个自由度,每条腿有髋、膝、踝 3 个关节。利用人造橡胶肌肉为关节,通过注气、排气引起肌肉收缩牵引关节转动从而迈步。由于气体的可伸缩性,使该机器人行走不稳定。1971 年,加藤一郎教授又研制出了 WAP-3 型双足机器人,仍采用人造肌肉驱动,能在平地、斜坡和阶梯上行走,具有 11 个自由度。1971 年,加藤一郎教授及所有实验室研制出了 WL-5 双足步行机器人,该机器人采用液压驱动,具有 11 个自由度,下肢做三维运动,上躯体左右摆动

以实现双足机器人重心的左右移动。该机器人重 130kg,高 0.9m,可载荷 30kg,实现步幅 15cm,每步 45s 的静态步行。

1973 年,加藤一郎等在 WL-5 的基础上配置机械手及人工视觉、听觉装置组成自主式机器人 WABOT-1,如图 5.33(a)所示。WABOT-1 由足、手、视觉、声音应答 4 个系统组成,它所具有的功能包括通过人造嘴与人进行简单的日语对话,人造耳、眼作为远程接收装置识别对象、测定距离和方向,以两足步行方式(每步 45s 的静态步行)进行移动,带触觉,能用双手抓握、移动物体等。如果将这些功能与人相比,该机器人的机能相当于 1 岁左右的婴儿。



(a) WABOT-1 自主式机器人



(b) WABOT-2 自主式机器人

图 5.33 早稻田大学的拟人机器人

为了判断能否握住目标、判断是否已经抓握或正在搜索目标,WABOT-1 机器人的双手均安装了微型开关作为触觉传感器。为了测量与目标之间的距离,它的躯干安装了两台摄像头。

在腿部,双腿各包括足底关节处的横摇轴,踝关节处、膝关节处、髋关节处的俯仰轴,腰关节处的偏转轴等,共计 10 个自由度;在它的上身部分,有横摇轴 1 个自由度;在手臂部分,两臂各有肩部摆动、上臂旋转、肘部摆动、手腕旋转、手腕上下摆动共计 6 个自由度。另外,其手指部分,十根手指中五根手指为 1 个自由度。全部共计有 25 个自由度。结构材料主要使用了高强度的铝合金材料。

加藤一郎等于 1980 年又推出了 WL-9DR(Dynam's Refined)双足机器人。该型机器人采用预先设计步行方式的程序控制方法,用步行运动分析及重复实验设计步态轨迹,用以控制机器人的步行运动。该机器人采用以单脚支撑期为静态,双脚切换期为动态的准动态步行方案,实现了步幅 45cm,每步 9s 的准动态步行。

1984 年,加藤实验室又研制出采用踝关节力矩控制的 WL-10RD 双足机器人,实现了步幅 40cm,每步 1.5s 的平稳动态步行。1985 年加藤研究室在日本筑波科学博览会上公开

展示了能演奏钢琴的拟人机器人 WABOT-2。该机器人能与人对话,用眼睛扫描乐谱,演奏键盘乐器,WABOT-2 的外观如图 5.33(b)所示。1986 年,加藤实验室又研制成功了 WL-12(R)步行机器人,该机器人通过躯体运动来补偿下肢的任意运动,在躯体的平衡作用下,实现了步行步幅 30cm,每步 1.3s 的平地动态步行。加藤一郎由于长期致力于研究拟人机器人,被誉为“拟人机器人之父”。

1993 年,日本东京大学研究小组发表了小型拟人机器人系列(有脑但不能行走的两足两臂机器人,即远程大脑拟人机器人(RBHs))。此次研究开发的主要目标是机器人的软件部分,旨在将机器人的身体与控制软件的头部从物理层面上分开了。

该远程大脑研究,首先试做了两台小型拟人机器人。其中,一台小型拟人机器人的腿部部分两足各有俯仰轴的 3 个自由度,两足合计 6 个自由度。手臂部分也同样,两臂各有俯仰轴的 3 个自由度,合计共 6 个自由度。这个具有 12 个自由度的小型拟人机器人身高 330mm,体重约为 2kg。另一台小型拟人机器人的腿部部分两足各有俯仰轴的 3 个自由度,足底的横摇轴为 1 个自由度,两足合计 8 个自由度。手臂部分则为两臂各有俯仰轴的 3 个自由度,肩部偏转轴为 1 个自由度,合计共 8 个自由度。这个具有 16 个自由度的机器人身高 360mm,体重为 2.3kg。

这种小型拟人机器人的重心位置比较低,头部均安装有内置图像传输电路的黑白摄像头,在腿部和背部分别安装了驱动伺服电机与摄像头电源,在各个关节处则采用了航模用的伺服模块。

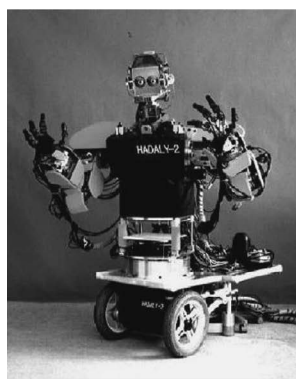
按照类似的方式,又开发了各种各样功能的小型拟人机器人。虽然有关步行动作的研究是主要围绕静力学研究(基于重心)展开的,但仍然探讨了很多实现拟人机器人各种全身动作的先驱性的实验研究,如基于视觉的步行动作、搬运动作、摇摆动作、腿部协调动作、诱导型运动、拥抱动作、单腿站立时的全身平衡、调动全身的物体传接动作,以及借助于接触传感器的落座动作等。

另外随着老龄社会的临近,对能辅助人类的机器人的需求增长很快。在这种情况下,1992 年早稻田大学的研究小组启动了一项由政府、产业界、科研院所共同进行的计划项目“拟人型”。1995 年,该项目被新能源/产业技术综合开发机构(NEDO)的 1995 年度最前端领域研究开发方案招标研究计划所采纳,由此而开发的拟人机器人就是 Hadaly-2 机器人和 WABIAN(WAseda Bipedal humANoid)机器人。

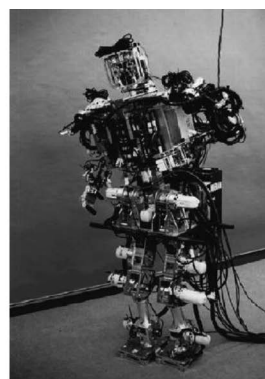
Hadaly-2 是轮式拟人机器人,如图 5.34(a)所示。在集成基于视觉的环境识别和对话功能(语音识别/合成)、姿态动作等功能的基础上,它能与人进行直接交流,并具有一些安全且对人类友好的动作的物理交互功能。该机器人的高度为 1.7m,躯干宽度约为 40cm,整体长度约为 130cm。

Hadaly-2 机器人的自由度构成详细情况为：头部具有能绕水平轴、上下轴转动的两个眼球,以及为跟踪深度方向的视觉目标所必需的 4 个自由度的颈部。这样对于移动目标,能实现逼近人类的视觉跟踪动作。手指部分有 4 根手指,共计 13 个自由度,其中大拇指为 4 个自由度,其他 3 根手指各有 3 个自由度。各根手指的根部装有力觉反馈用的 6 自由度压力传感器。手臂部分各有 7 个自由度。在各个关节处安装了能机械调整柔性的被动柔性调节机构(MIA)。该机构的作用是在机器人与人类协同作业时调节操作力度,以确保人的安全。手臂部分各个关节的驱动装置为用于肩部的 AC 电机、用于手腕部的 DC 电机、用于柔性调节的 DC 电机、用于黏性调节的电磁制动器,而且每个关节都用了 3 个驱动器。手部的移动速度则参考了成年男性的一般动作速度,设计约为 1.0m/s。移动机构为轮式,通过控制、驱动两个前轮,可以实现前、后以及原地转动。据发表的资料显示,其最大移动速度约为 6km/h。躯干部具有偏转自由度,移动机构停止后,它的上身可以扭动。

WABIAN 机器人更具人形,它与人等高,具有躯干自由度,两足能实现动态行走。该机器人跟人一样,能手持物体进行行走,由于当时的设计要求考虑了在家内使用的背景,因此它还具有情绪交互功能和通过 ISDN 的远程操作功能。该机器人直立静止状态的身高为 1660mm,总重量为 107kg,肩部可搬重量为 30kg(单肩为 15kg),手部重 1.5kg。它的头部安装有获取视觉和听觉信息的机构,除电源以外所有的控制装置都搭载在机器人身上,如图 5.34(b)所示。



(a) Hadaly-2 机器人



(b) WABIAN 机器人

图 5.34 早稻田大学拟人机器人

WABIAN 的自由度构成情况为：眼球部与颈部各有横摇轴与俯仰轴 2 个自由度,手腕部与人一样各有 7 个自由度,双手部分各有 3 个自由度,躯干部有横摇轴、俯仰轴、偏转轴各 1 个自由度,腿部的足关节、膝关节以及髋关节各有俯仰轴的 1 个自由度,足底部有缓冲机构与被动自由度 4 个,合计为 43 个自由度。各个关节的驱动方式为：在髋关节处采用了在较大范围内可以改变关节刚性的非线性弹簧机构的差动驱动方式；其他关节处则采用了

1个自由度配1个驱动器的直接驱动方式。腰部的构件材料为YKK公司生产的高强度超微晶铝合金“GIGAS”,其他部分则采用了超硬铝材料。在控制系统方面,控制机器人的计算机安置在腰部后面,电机驱动电路安装在躯干上部,各个关节按 $0.5\sim 1\text{ms}$ 的周期实施控制。另外,在腿部关节处还安装了两套状态检测器,提高了安全性。该机器人还具有Ethernet通信功能,可以连接外部的信息处理装置等。

WABIAN机器人后来被不断地进行各种各样的模块化部件的开发以及控制装置的改进开发,还开展了全身运动、与人在物理层面进行交互的研究,以及生成全身运动模式的软件研究等具有开创性的研究工作。

日本本田技研工业公司从1986年至今已经推出了P系列1、2、3型机器人。P1型是本田公司最初研制的行走机器人,主要是对双足步行机器人进行基础性的研究工作。

P2型于1996年12月推出,是世界上首台能用双足稳定步行的拟人机器人,相对P1而言,更加拟人化,如图5.35(a)所示。其身高1820mm,重量为210kg,使用Ni-Zi电池供电,以无线化为目标,将计算机、电机驱动器、电池、无线装置等所必需的器件都内藏于躯干内部,由无线方式通过自动控制使其能够完成诸如速度为 3km/h 的动态行走、上下楼梯、推运物体和用扳手拧螺丝等动作。虽然长得笨头笨脑,但行动起来灵活机动,上台极为平稳。P2型机器人通过重力感应器和脚底的触觉感应器把地面的信息传给机器人的大脑(电脑),机器人再根据情况进行判断,进而平衡身体、稳步前进。P2的问世将双足步行机器人的研究工作推向了高潮,掀开了拟人机器人的新纪元,使本田公司在此领域处于世界绝对的领先地位,甚至MIT的G. A. Partt教授曾一度认为今后在双足步行机器人领域已经没有什么工作可以再做了。

1997年12月本田公司又推出了P3型双足步行机器人,基本上与P2型相似,只是改善了零部件的材料(使用了新型的镁材料),对其进行了小型化、轻量化改进,使它的尺寸设计更接近人类生活的环境,并采用分散式控制。P3身高1600mm,重量为130kg,其自由度构成如下:肩关节3个自由度、肘关节1个自由度、手腕关节3个自由度,因此左、右手臂各有7个自由度,合计为14个自由度;手部各有1个自由度,合计为2个自由度;腿部的髋关节3个自由度、膝关节1个自由度、脚腕关节2个自由度,即左、右各有6个自由度,共计12个自由度。据发表的资料显示,其最大步行速度为 2km/h 。P3的外观如图5.35(b)所示。

2000年11月20日本田公司又推出了新一代的拟人机器人阿西莫ASIMO(Advanced Step in Innovative Mobility)。ASIMO与P3相比,进一步缩小了尺寸,减轻了重量,其身高1200mm,体重43kg,实现了小型轻量化,使其更容易适合人类的生活空间。其驱动部分由伺服电机、谐波减速器、驱动单元组成;控制部分由步行/动作控制单元、无线通信单元组成,通过提高双脚步行技术使其更接近人类的步行方式;传感器部分,在脚部装有6轴力传

感器,在躯干部装有陀螺与加速度传感器;操作部分则包括工作站及便携式控制器,使用便携式控制器操作步行方向和关节及手的动作。ASIMO 自由度的构成如下:手臂部分的肩关节处为 3 个自由度,肘关节、手腕关节处各有 1 个自由度(旋转),即左、右各 5 个自由度,合计为 10 个自由度;手部左、右各 1 个自由度,合计为 2 个自由度;腿部与 P2、P3 一样,左、右腿各 6 个自由度,合计为 12 个自由度。据发表的资料显示,其最大步行速度为 1.6km/h。

ASIMO 在双脚步行方面,采用了新开发的技术“I-WALK (Intelligent Realtime Flexible Walking)”,可以更加自由的步行。I-WALK 是在过去的双脚步行技术的基础上组合了新的“预测运动控制”功能。它可以实时预测以后的动作,并且据此事先移动重心来改变步调。过去由于不能进行预测运动控制,因此当从直行改为转弯时,必须先停止直行动作后才可以转弯。而 ASIMO 通过事先预测“下面转弯以后重心向外侧倾斜多少”等重心变化,可以使得从直行改为转弯时的步行动作变得连续流畅。ASIMO 被认为是世界上最“聪明”的机器人,它有和人类相似的形貌,可模仿人类的情绪表情,诸如啼哭、欢喜、惊讶等,还能识别主人的指令,感知障碍物,作出相应的动作,比如行走、跳舞等。最为奇特的是,ASIMO 会根据自己的存储内容,辨貌识人,接待客人并主动和熟悉的人打招呼。ASIMO 的外观如图 5.35(c)所示。

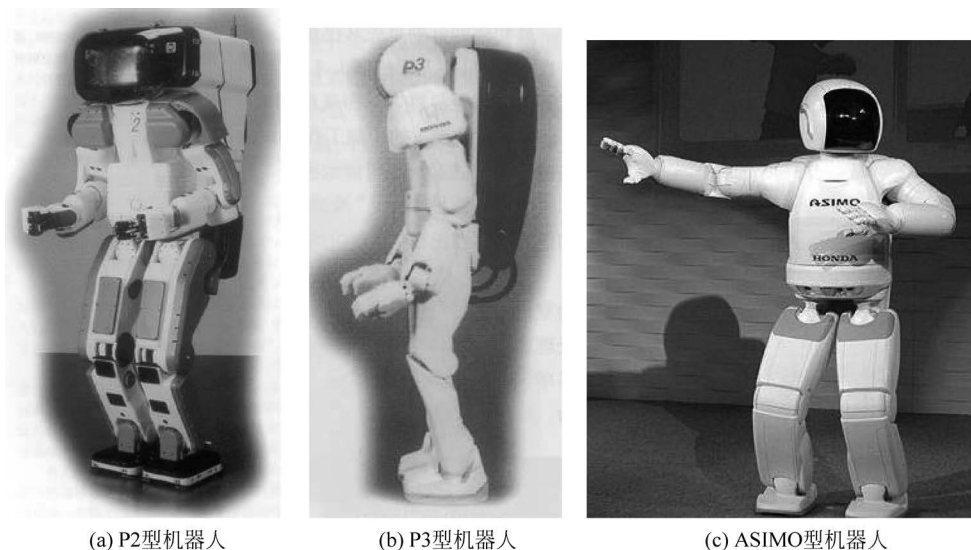


图 5.35 本田的拟人机器人

本田技研工业公司研发的 P2 的问世及其性能激起了人们极大的兴趣,从 1998 年至今,人们开展了许多关于拟人机器人方面的研究。

东京大学的研究小组研究的 H4(1998 年)、H5(1998 年)、H6(2000 年)、H7(2001 年)项目得到了日本学术振兴会未来开拓推进事业“关于微机械电子与软机械电子综合集成的高级活体功能机械的研究(JSPS-RFTF96P00801)”的资助。

其中,H4 是作为一个研究平台而被开发的,其目的主要是为了研究实际环境中机器人与人类共同工作时的安全问题,它的全身分布着不可缺少的触觉传感器,而且覆盖着柔软的皮肤。

H5 身高 1270mm,总重量 35kg,是一个具有 30 个可控自由度的两足拟人步行机器人,如图 5.36(a)所示。它的所有关节的驱动装置都是由带编码器的 DC 电机以及减速机构组成的。

H5 各个部分的自由度构成情况如下。

手臂部分,每个手臂均为肩 3 个自由度、肘 2 个自由度、手腕 1 个自由度,合计 6 个自由度。为了减少手部的位置误差,在靠近躯干部的关节处采用了无间隙的谐波减速器,在肘偏转轴至手部关节处采用了行星齿轮减速器。抓握部分由 3 根靠金属丝驱动的双关节手指组成,由一个电机同时控制 3 根手指的开合。

H5 腿部的每一条腿均包括髋关节 3 个自由度、膝关节 1 个自由度、踝关节 2 个自由度。所有的关节都是经过同步带将电机动力传递给谐波减速器的输入轴,而且谐波减速器的输出轴又与邻近的连杆直接相连,由此既能提高电机的安装自由度,还能确保具有无间隙性。脚底采用两块铝制平板夹住抗震纤维材料的结构设计。在抗震纤维材料与铝材相接触的部位,配置了压感式电阻元件。这样,就可以测量出作用于脚底的力分布及零力矩点(Zero Moment Point,ZMP)。

其头部有两只眼,共计有 4 个自由度,能分别驱动两个摄像头的直立轴,并同时控制两只眼的上下左右转动。

为了降低成本,其结构材料主要采用了铝板,在腹部则装入工业 PC 和输入/输出板卡,以完成包括电机的软件伺服在内的整个机器人的控制。由于装载了无线 LAN 以及图像发射器,因此它与外部连接的缆线只有电源线。此外,利用无线 LAN,可以通过外部终端对它进行控制或动作监控。

1999 年,东京大学相继发表了 H5 机器人的动态步行研究报告、有关视觉联动型迈步动作的研究报告及有关上腿部协调型的起立动作的研究报告等。

为了开展在实际环境中全身配合的动作研究,又开启了 H6 的开发工作,如图 5.36(b)所示。H6 是在 H5 的基础上,追加了自由度(颈部横摇轴、手部俯仰轴),提高了手臂的输出力量,增大了髋关节的可动范围。在此基础上,东京大学发表了该机器人有关环境识别的研究报告及有关步行目标轨迹的在线生成研究报告等。

H6 的身高为 1325mm,宽为 586mm,厚为 267mm,重量为 55kg。其自由度构成包括腿部双侧各 6 个自由度、手臂双侧各 7 个自由度,再加上可开闭手部各 1 个自由度的,头部 5 个自由度,共计 33 个自由度。H6 的电源为两个 12V、5A 的铅蓄电池,也可以借用外部电源。

H7 为 H6 的运动改良型模型,如图 5.36(c)所示。在借鉴 H6 的经验基础上,它改造了电机驱动器,并调整了自由度构成(废除了眼部的 3 个自由度和各个手腕部的横摇轴,追加

了各指尖的 1 个自由度)。其身高为 1468mm、宽 604mm、厚 255mm、重量为 58kg。

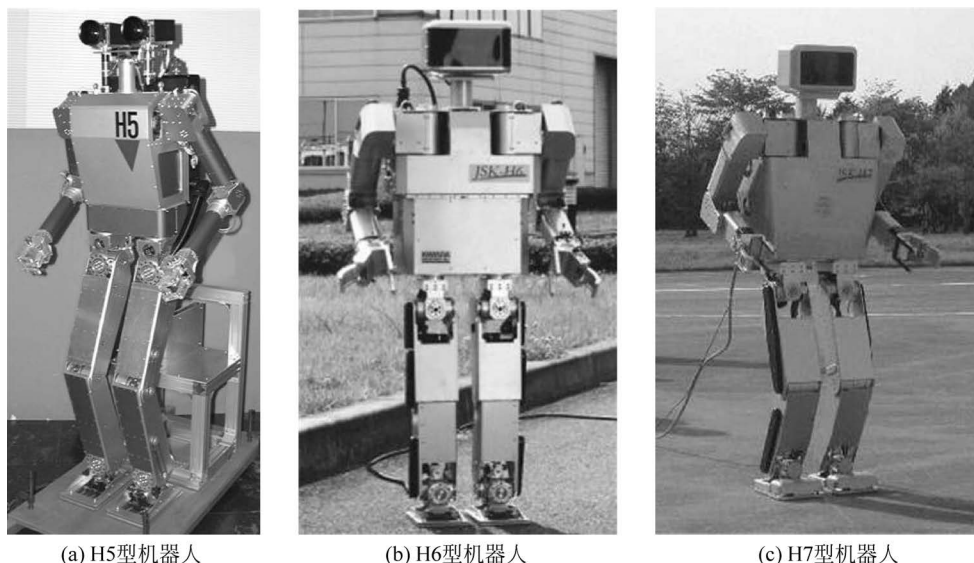


图 5.36 东京大学的拟人机器人

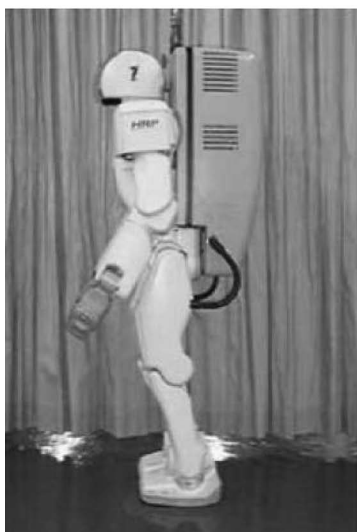
H7 自由度的构成为：两侧腿部各 7 个自由度、手臂各 6 个自由度，另外可开闭手部各有 1 个自由度，头部 2 个自由度，共计 30 个自由度。将 4 个 12V、2A 的铅蓄电池串联作为电源（也可借用外部电源）。其研究结果包括在线步行动作生成和利用三维视觉的抓取动作生成等。

1998 年，日本经济产业省启动一项为期 5 年的关于“与人类协调、共存型机器人系统的研究开发”的国家计划项目（Human-oid Robotics Project, HRP）。HRP 以“在人类的工作、生活环境中，能与人类协调、共存，进行复杂工作的拟人机器人系统的开发”为目的。作为成果，项目开发出了 HRP-1（1999 年）、HRP-1S（2001 年）、HRP-2P（2002 年）拟人机器人及小型的验证用模型（1999 年）。

HRP-1 拟人机器人的身高为 1600mm、宽为 600mm、最大厚度为 595mm、躯体重量为 99kg，电池重量为 17kg，躯体背面装载了带 6 个插槽的 VME 机箱，如图 5.37(a)。该机器人平台和软件均由本田技研工业公司开发。它的自由度构成包括两侧手臂各 7 个自由度、开合式手部 1 个自由度，两侧腿部各 6 个自由度，共计 28 个自由度。由于该机器人是以远程操作控制作业为前提进行设计的，因此其腿部由步行命令控制，而手臂和头部则受控于远程操作装置操作员的控制动作。

在 HRP-1 拟人机器人的基础上，由本田技研工业公司开发了 HRP-1S 拟人机器人的机器人平台。该机器人能够以 5ms 为周期独立、同时控制所有的关节，是否完成更高难动作的机器人模型。

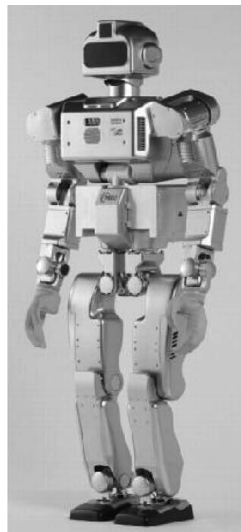
HRP-2P 拟人机器人是日本产业技术综合研究所与川田工业公司、安川电机公司、清水建设公司共同开发的拟人机器人,如图 5.37(b)。其身高为 1540mm、宽为 600mm、最大厚度为 340mm、重量约为 60kg。其自由度构成为头部 2 个自由度,腰部 2 个自由度,两侧手臂各 6 个自由度、开合式手部 1 个自由度,两侧腿部各 6 个自由度,共计 30 个自由度。随后又开发了 HRP-3P 拟人机器人如图 5.37(c)所示。



(a) HRP-1拟人机器人



(b) HRP-2P拟人机器人



(c) HRP-3P拟人机器人

图 5.37 日本产业技术综合研究所的拟人机器人

2000 年,除上述的 ASIMO 拟人机器人和 H6 拟人机器人之外,又相继发布了不少小型的拟人机器人。日本索尼公司于 2000 年 11 月推出了拟人型娱乐型机器人“Sony Dream Robot-3X”(SDR-3X),如图 5.38(a)所示,其身高 500mm,重量为 5kg。SDR-3X 拟人机器人分别在头部、躯干、每个手臂、下肢和足部安装了共计 24 个配置了驱动机构的“关节”,这些关节通过 2 个 64bit RISC 微处理器进行实时控制。实时操作系统为索尼独自开发的“Aperios”。根据所发表的 SDR-3X 技术资料,SDR-3X 可以完成最高速度为 15m/min 的前进/后退/左右横行、在前进过程中左右转身、由俯卧/仰卧状态起立、单腿站立、在凹凸不平的路面上行走、踢球、舞蹈等动作,另外还可以识别 20 种声音,并且可以讲由声音合成的 20 种语言,同时对颜色也可以识别。例如,通过语音指示来识别颜色球,并接近它,然后识别球门,将球踢进去。

2000 年 11 月,在日本的 PACIFIC 横滨展示大厅举办了世界上首次个人机器人展览会“ROBODEX2000”。

2002 年 3 月,索尼公司又开发出运动性能更好、交流能力更强的 SDR-4X,如图 5.38(b)、(c)所示,其身高 580mm、重量 6.5kg。除了与 SDR-3X 相同的配置以外,另外装备有 2 个 CCD 相机,可以利用两个相机的视差测量出自己与被拍摄物体之间的距离,并识别立体物

体,还能通过 CCD 相机来识别障碍物,并自行设计避开这些障碍物的路线前进。内置驱动装置的“关节”也由 SDR-3X 的 24 个增加到了 38 个。根据所发表的技术资料,SDR-4X 能完成各种动作,包括路面上的步行,在地板、榻榻米、绒毯混合路面上的步行,适应外力的动作,摔倒时的对应动作,摔倒后的起身动作等,在水平、平坦路面上最快每分钟行走 20m,在不平坦地面最快每分钟行走 6m。还能进行交互式表演,包括人脸的检测、识别、学习、连续语音识别、未知语句获取、短期记忆、长期记忆、对话行动控制、带感情的声音合成等,甚至四台机器人可实现无伴奏合唱表演,由四台机器人独立生成四声部歌声,进行发声并同步生成运动,如边改变队形边进行快节奏舞蹈表演等。SDR-4X 同 SDR-3X 相比,SDR-4X 对周围环境的把握能力和根据周围状况做出动作的能力均有所提高,而可以自动避开障碍物行走,且很不容易跌倒。即使遇到意外情况跌倒,它也可以自己站起来。



图 5.38 索尼公司的拟人机器人

日本还有许多其他科研机构 and 高等院校从事拟人机器人的研制和理论研究工作,如松下电工、富士通、川崎重工、法拉科、日立制作所公司等单位。他们都在拟人机器人的研制和理论研究方面做了大量的工作,并取得了一定的成就。

美国 Ohio 大学的 Y. F. Zheng 等于 1990 年提出用神经网络来实现双足步行机器人动态步行,并在 SD-1 双足步行机器人中得以实现。人脑控制步行时有三种功能:即随意步行、非随意步行和学习步行。为了将神经网络控制策略应用在双足步行机器人中,他们首先研究了神经网络步态综合器,它由轨迹综合器、自适应单元、知识库和联想单元组成。轨迹综合器根据从知识库中提取的初始位置产生各个关节的运动模式的信号,在双足步行机器人随意运动的情况下,自适应单元可不接入,否则自适应单元接入,并开始修正步态模式,实现平衡步行。其次,他们还研究了两种学习方法,静态学习和动态学习。静态学习是神经网络的学习发生在步行过程中特定时刻,而动态学习则是指在双足步行机器人步行过程中神经网络的持续的学习。同时,他们所采用的神经网络模型是由多层神经网络单元组成,包括 4 个关节神经元和 16 个方向神经元,用强化学习方法来训练网络,强化学习信号既

可以是描述地域条件的传感器信号,也可以是描述机器人性能的人工输入信号。

MIT 的 G. A. Pratt 和 J. E. Pratt 等在 Spring Turkey 和 Spring Flamingo 双足机器人的控制中提出了虚模型控制策略。采用虚模型控制,可以有效地避免烦琐的机器人逆运动学和动力学的计算。在机械结构设计上,与上述的控制策略的指导思想结合,采用与常规关节驱动方式不同的一种新的关节驱动方式,从而使其具有良好的弹性和阻尼特性。在步态规划的过程中参考人类行走的被动特性,将一个行走步态周期分为支撑、脚尖立地、摆动和伸直四个阶段,更有效地利用了机械势能使脚被动地完成摆动过程。基于简单双足步行机器人的物理模型,提出了三种使用平面型双足步行机器人的控制方法,其一是采用简单的策略控制机器人的行走;其二是讨论了膝盖、柔顺踝关节及被动摆动腿的自然动态特性;其三是为了使摆动腿尽快地行走,摆动腿应尽快地摆动。所提出的控制策略用于 Spring Flamingo 的控制中。在前向平面的动态和侧向平面动态解耦基础上,可以将平面型双足机器人控制推广到 3D 空间内的控制研究中。所采用的方法是在平面型双足步行机器人控制的基础上加上前向平衡控制。

法国 BIP2000 计划是由法国 de Mecanique des Soloders de Poitiers 实验室和 INRIA 机构共同开发的一种具有 15 个自由度的双足步行机器人。其目的就是建立一整套具有适应未知条件行走的双足机器人系统。为了使控制系统设计简化,他们采用了复杂系统控制中广泛采用的分层递阶控制结构。控制系统中的最高级是全局规划层,在一些传感器信息的指导下,根据一些初始的条件来获得一些步态规划时的参数;中间级根据特定的任务进行平滑的行走步态的规划;控制级根据中间层所发出的步态规划的信号来生成激励的信号;最低级别一层是所谓的反馈层,用来处理突发事件。按照这些控制及规划方法,可以使双足机器人实现站立、行走、爬坡和上下楼梯等。

此外,美国、英国、苏联、南斯拉夫、加拿大、意大利、德国、韩国等国家许多学者在行走机器人的力学、模型和型号研制方面也获得了相应的成果。如英国于 1970 年研制成功的“Witt”型双足机器人;苏联研制出的两轮双足行走机器人;南斯拉夫的 Minor、Vokobratovic 在 *Legged Locomotion Robots* 一书中利用数学模型对类人型双足步行机器人的步行进行了全面的分析,为双足步行机器人的研究奠定了理论基础。

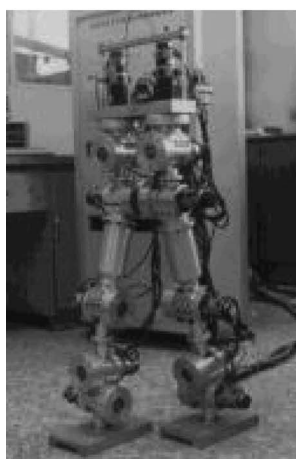
我国拟人机器人的研制工作起步较晚。1985 年以来,相继有几所高校进行了这方面的研究,并取得了一定的成果。其中以哈尔滨工业大学和国防科技大学最为典型。

哈尔滨工业大学自 1985 年开始研制双足步行机器人,迄今为止已经完成了三个型号的研制工作:第一个型号 HIT-I 具有 10 个自由度,重量为 100kg,高度为 1200mm,关节由直流伺服电机驱动,属于静态步行;第二个型号 HIT-II 具有 12 个自由度,该机器人髋关节和腿部结构采用了平行四边形结构;第三个型号 HIT-III 具有 12 个自由度,踝关节采用两电

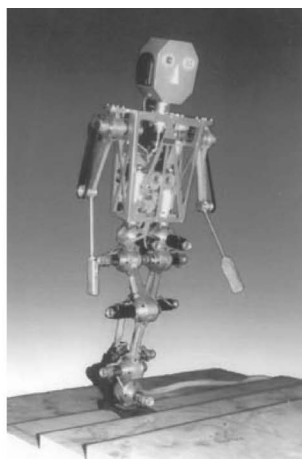
机交叉结构,同时实现两个自由度,腿部结构采用了圆筒形结构。HIT-III实现了静态步行和动态步行,能够完成前/后行、侧行、转弯、上下台阶及上斜坡等动作,其外形如图 5.39(a)所示。目前,哈尔滨工业大学机器人研究所与机械电子工程教研室合作,致力于功能更齐全的拟人机器人 HIT-IV 的研制工作。该机器人包括行走机构、上身及臂部执行机构,初步设定 32 个自由度。

国防科技大学于 1988 年 2 月研制成功了 6 关节平面运动型双足步行机器人,随后于 1990 年又先后研制成功了 10 关节、12 关节的空间运动型机器人系统,并实现了平地前进、后退、左右侧行、左右转弯、上下台阶、上下斜坡和跨越障碍等人类所具备的基本行走功能。经过十年攻关,国防科技大学于 2001 年 12 月研制成功我国第一台拟人机器人——“先行者”,实现了机器人技术的重大突破。“先行者”有人一样的身躯、头颅、眼睛、双臂和双足,有一定的语言功能,可以动态步行,如图 5.39(b)所示。

清华大学、上海交通大学、北京航空航天大学等高等院校和研究机构也在近几年投入了相当的人力、物力,进行智能拟人机器人的研制工作。图 5.39(c)所示是清华大学开发的拟人机器人 THBIP-I。



(a) 哈工大HIT-III拟人机器人



(b) 国防科大“先行者”拟人机器人



(c) 清华大学THBIP-I拟人机器人

图 5.39 中国的拟人机器人

5.3.2 拟人机器人的基本结构

拟人机器人在外形上模仿人类,即由头部、四肢和躯干三部分组成。

1. 拟人机器人的头部

拟人机器人的头部用来实现各种表情,表达机器人的内在情感状态,最终使机器人通

过丰富生动的表情与人进行自然流畅的情感交流。所以,拟人机器人头部一般具有以下特点:

- (1) 外观从相当程度上符合人类的审美观点,能给人以亲切感和可信任感;
- (2) 其整体乃至局部的尺寸,以及每个器官所能运动的幅度都要与人类的头部相接近,也就是说,在接近人脑这个有限的空间内,要放置眼、耳、鼻、口、眉等器官以及相应的驱动部件和传动机构;
- (3) 整体机构的动作要协调,要符合人类头、面部的运动规律,要求运动传递要准确,不能失真,这样才能准确地控制每一个运动单元达到要求的位置,实现总体的协调;
- (4) 因为考虑实际制造时要为机器人加上摄像头、微型麦克甚至力觉等传感器,所以必须留出必要的空间。

也就是说,拟人机器人的头部具有空间狭窄、运动范围小、动作准确、负载小的特点。

拟人机器人的头部一般具有横摇轴和俯仰轴 2 个自由度,可以实现头部的俯仰、回转运动,完成点头、摇头等基本动作;另外,有的拟人机器人头部有两只眼睛,能实现上下和左右转动,即具有 4 个自由度。有的拟人机器人不具有头部自由度,如本田的 P2、P3、ASIMO 等;有的拟人机器人只具有眼部自由度,如东京大学的 H5 拟人机器人,具有能绕水平轴和垂直轴转动的两个眼球,共 4 个自由度,如图 5.40 所示;有的拟人机器人头部和脸部具有多达 15 个自由度,能实现各种各样的表情,如美国麻省理工学院 AI 实验室开发的拟人机器人 Kismet,如图 5.41 所示。

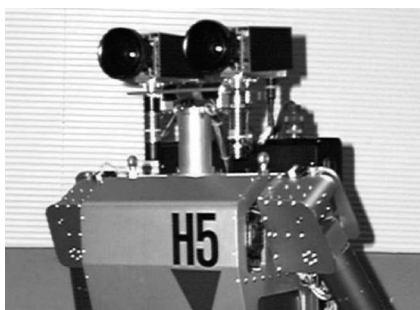


图 5.40 H5 拟人机器人的头部

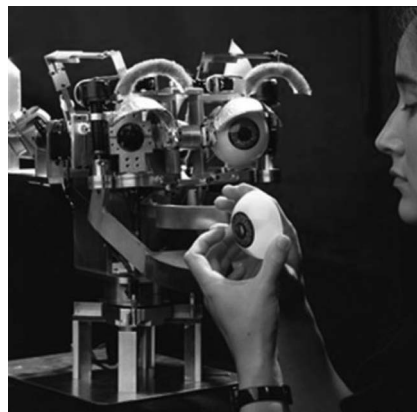


图 5.41 MIT 拟人机器人 Kismet 的头部

拟人机器人的头部除了能实现各种表情之外,还需要能感觉周围的环境信息。其感觉器官包括眼睛和耳朵。

拟人机器人的眼睛是用来识别物体信息的,如形状、大小、位置、颜色等。它由视觉器官和相应的视觉传输控制系统组成。视觉器官就是视觉传感器,有光学传感系统和超声波

传感系统。光学传感系统用摄像头或三维图像数据处理系统采集环境中物体的各项数据，并将这些数据传输到机器人的控制系统中去；超声波系统利用发射和接收的超声波所需时间等信息进行准确定位，利用接收到的反射波的波形数据（波峰和波谷情况等），判断物体的形态和类别。

拟人机器人的耳朵就是语音识别系统，首先它将接受的语音通过模数转换器，转换为二进制数字信息。然后对这些语音信息进行必要的加工，计算出它们特参量的正规矢量。最后求出正规矢量，将它与机器人大脑中存储的语音标准值相比较，进而理解语音中的信息。

2. 拟人机器人的四肢

拟人机器人的四肢包括下肢、手臂和手部机构。

1) 拟人机器人的下肢

拟人机器人的下肢就是机器人的腿脚，用以支撑机器人的身体、移动机器人。

拟人机器人的下肢设计主要涉及以下几方面的研究：运用 7 杆模型来描述其腿部的各个关节的自由度，但是实际的自由度少于理论自由度，比较成熟的是 6 自由度模型；腿部关节驱动模式主要有两种不同的方式：谐波减速齿轮和滚动丝杠连杆机构；驱动电机的选择对整个腿部结构和质量有显著的影响；对腿部结构提出新的要求，要求适应更多的行走步态。

(1) 拟人机器人下肢的自由度。

从国内外研究的较为成熟的拟人机器人来看，几乎所有的拟人机器人腿部都选择 6 自由度的方式，其分配方式为：髋关节 3 个自由度、膝关节 1 个自由度、踝关节 2 个自由度。其分配方式如图 5.42 所示。由于踝关节缺少了一个旋转自由度，当机器人行走中进行转弯时，只能依靠大腿与上身连接处的旋转来实现，需要先决定转过的角度，并且需要更多的步数来完成行走、转弯这个动作。但是这样的设计可以降低踝关节的设计复杂程度，有利于踝关节的机构布置，从而减小机构的空间体积，减轻下肢的重量。这是拟人机器人下肢在设计中的一个矛盾点，它影响机器人行走灵活程度和腿部结构的繁简。

(2) 拟人机器人下肢结构和驱动方式。

拟人机器人下肢自由度的确定仅解决了拟人机器人双足行走的可能性，要实现真正的行走还需要动力单元的配置以驱动各个关节协调运动。所以下肢机构是拟人机器人

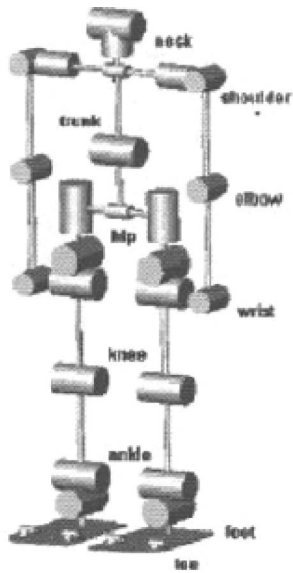


图 5.42 腿部 6 个自由度的分配

能否实现仿人行走及步行质量好坏的关键所在。它对整个机器人的功能、重量和效率都具有很大的影响。

早稻田大学研究的 WL 系列是最早的双足拟人行走机器人。WL-1 拟人机器人在结构上模仿了人体的下肢,通过双腿模拟实验研究出行走的基本参数。WL-3 拟人机器人通过电动液压伺服系统驱动下肢关节的运动可以基本实现类似人类的走和坐的动作。WL-5 拟人机器人作了进一步改进,使双腿各具有 5 个自由度,可以通过程序控制它行走方向的改变。WL-9RD 拟人机器人仍然采用液压驱动,但是通过 16 位机的控制第一次真正实现了拟人行走。如图 5.43 所示。WABOT-1 拟人机器人是第一个完全按照人的比例研制的,通过液压驱动的双腿,可以实现拖行行走。WL-10R 拟人机器人是在以前研制的基础上采用了碳纤维高强度塑料盒盘式旋转伺服电动机驱动,可以实现向前向后和平面的转弯。WL-10RD 拟人机器人是在 WL-10R 拟人机器人的基础上增加了程序控制从而实现平坦路面 1.3 秒/步,阶梯路面 2.5 秒/步的行走速度。WL12 拟人机器人以及其改进型 WL-12RDIII 拟人机器人,在腰部增加了两个自由度,通过控制躯干的运动来平衡下肢的运动,可以完成在位置路面情况下的行走,基本实现机器人下肢的拟人行走的自主控制,如图 5.44 所示。

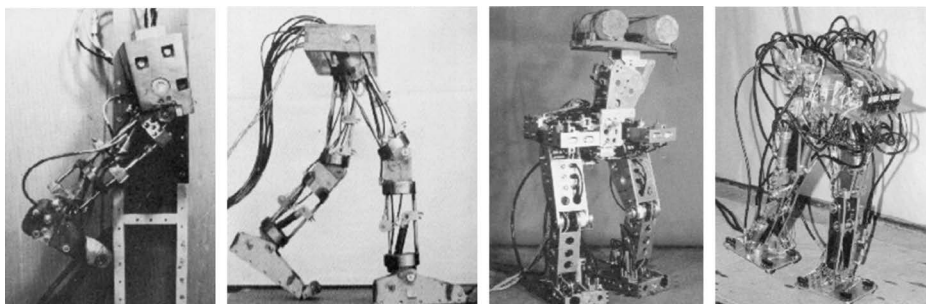


图 5.43 由左向右: WL-1、WL-3、WL-5、WL-9DR 拟人机器人

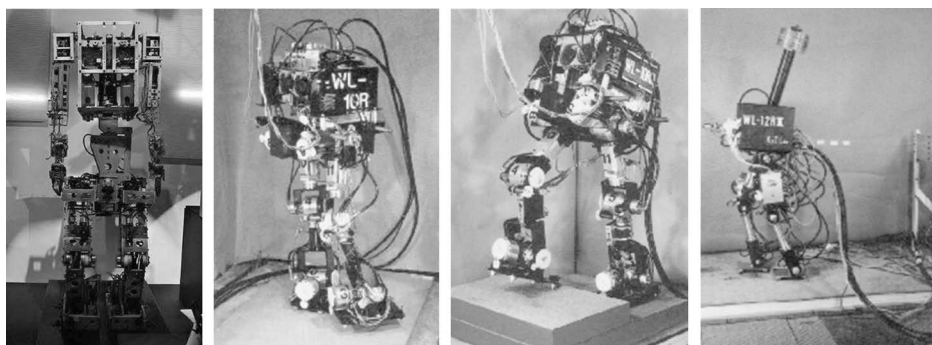


图 5.44 由左向右: WABOT、WL-10R、WL-10RD、WL-12RDIII 拟人机器人

从 WL 拟人机器人系列的研究进展来看,腿部的驱动最早使用的是液压动力系统,液压驱动具有稳定和承受转矩大等特点,符合机器人行走过程中需要较大的动力和缓冲的要

求。但是,随着机器人研究的不断深入,拟人机器人的独立行走和自主控制显得越来越重要,液压驱动时需要的油缸以及液压管路给其他元件布置所留下的空间就比较有限,也增加了系统的重量。所以,液压驱动在拟人机器人中的应用就显得很有限。

目前世界上所研制的拟人机器人下肢的驱动以日本的 ASIMO、HRP-2 拟人机器人,法国的 BIP2000 拟人机器人和美国 MIT 的 M2 拟人机器人最为典型。从表 5-1 可以看出,ASIMO 拟人机器人采用了伺服电机、同步带和谐波减速齿轮,其中 HRP-2 拟人机器人在设计上对驱动轮盘和齿轮进行了优化,从而减小了以往齿轮在轴向的尺寸,降低了机器人的重量和体积,而 BIP2000 除了髋关节上的 Roll 和 Yaw 方向的旋转以外,都采用了丝杠连杆结构。

表 5-1 几种拟人机器人下肢关节驱动

机器人名称	驱动装置	机器人质量	动力源
ASIMO	伺服电机、谐波减速齿轮	43kg	38V/10A·h 电池
HRP-2	伺服电机、谐波减速齿轮	58kg	48V/18A·h 电池
WABIAN	直流伺服电机	50kg	Ni-H 电池
BIP2000	直流电机、滚动丝杠连杆结构	40kg	不详
M2	直流电机、平行弹簧阻尼滚动丝杠结构	不详	不详
THBIP-1	直流电机、滚珠丝杠和曲柄连杆减速机构	不详	Ni-MH 蓄电池

拟人机器人向着自主化和能够在开阔空间自由活动方向发展。鉴于这个特点,日本的 HRP-2 拟人机器人在设计上虽然仍运用了谐波减速齿轮和同步带的传动,但是在设计上有所改进,为了避免谐波减速齿轮的定减速比所造成的传动误差,特别运用了调速带。对于最终输出轴的谐波齿轮进行优化,减小了尺寸,比普通齿轮重量降低 35%,从而减轻整机的重量和空间占用。在结构上 HRP-2 拟人机器人的髋关节处采用了悬臂式布置,如图 5.45 所示,这种结构具有两个优点:一方面可以给机器人的腿部提供更大的活动空间,通过对腿部形成的支撑多边形的调整,可以在机器人摔倒时,承受两倍的力量,甚至实现机器人的跳跃。另一方面可以实现机器人的直线行走,这是其他拟人机器人难以完成的行走步态。

M2 拟人机器人的设计采用了滚动丝杠和连杆机构,但是空间布置有很大的差异。M2 拟人机器人将丝杠布置在大腿和小腿后部的两侧,分别实现了两个方向的自由度,如图 5.46 所示。这样的布置是模拟人腿部肌肉的收缩来驱动腿部的运动,为实现腿部的柔性运动创造了条件。另外,这个结构既利用了腿部空间又给滚动丝杆以极大的布置空间,这给电机的选型和机构的实现,以及传感器的布置都提供了方便。但是由于丝杆连杆机构的衔接部分占用了膝关节的旋转空间,从而使得膝关节的运动角度很有限。

法国的 BIP2000 拟人机器人的下肢驱动主要运用了滚动丝杠作为驱动方式,如图 5.47 所示。BIP2000 拟人机器人在膝关节的驱动采用了滚动丝杠曲轴连杆机构。它通过螺栓将滚动丝杠固定在膝关节的中间。四周由 4 个能沿直线移动的滚轴引导。丝杠的旋转产生滑

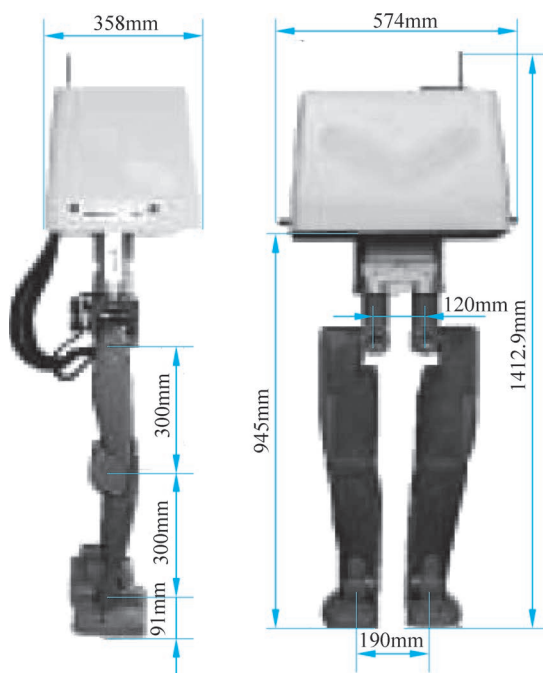
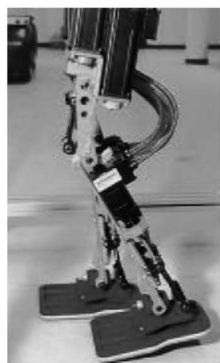


图 5.45 HRP-2 拟人机器人的下肢结构

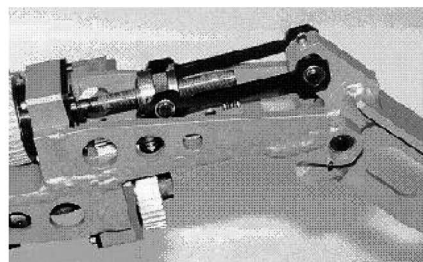


图 5.46 M2 拟人机器人的下肢结构

块的滑动,这个滑块本身又推动与之临近的一条臂上的拉杆。该系统具有高精度度和低摩擦的特点,可以通过对电机的控制实现膝关节的运动。但是由于膝关节处的空间有限,要求滚动丝杠的驱动力矩相对要大,但是结构又要求紧凑,这给设计和制造带来很大的难度。



(a) BIP2000拟人机器人的腿部



(b) BIP2000拟人机器人的膝关节



(c) BIP2000拟人机器人的踝关节

图 5.47 BIP2000 拟人机器人的下肢结构

(3) 拟人机器人的手臂。

拟人机器人在具备双足行走能力的同时,还需要具备完成与人类相似的复杂的上肢动作能力,这就需要多自由度、灵巧的手臂机构。

拟人机器人手臂的自由度。

拟人机器人的手臂类似人的胳膊,其形态与结构基本上是关节型的,由肩、肘、腕关节等部分组成。拟人机器人的每个手臂一般具有 6 个自由度,其分配方式为:肩关节由一个前向关节和一个侧向关节正交组合而成,可以实现大臂的前后摆动和侧摆;肘关节由一个前向关节和一个转向关节正交组合而成,可以实现小臂的前后摆动和转动;腕关节由一个侧向关节和一个转向关节正交组合而成,可以实现手腕的左右摆动和转动。

拟人机器人手臂的结构形式。

根据驱动器和构件的位置关系,可以将拟人机器人的手臂结构大体分为外骨骼型和内骨骼型。图 5.48 和图 5.49 分别列举出了外骨骼型和内骨骼型两种结构。

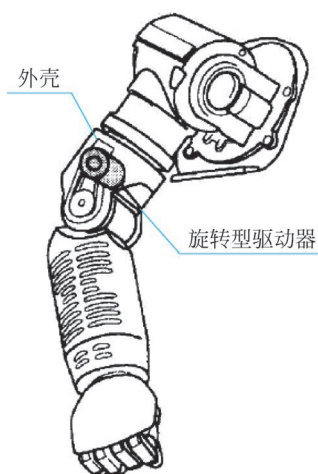


图 5.48 外骨骼结构手臂

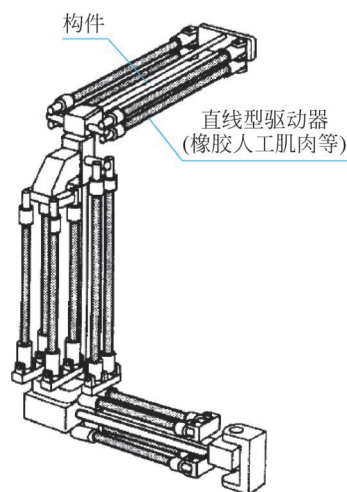


图 5.49 内骨骼结构手臂

外骨骼型利用驱动器或减速器作关节,外侧配置外壳,将构件串接而成。它的驱动器往往采用旋转型电机,也有的关节被设计成被动阻力形式来近似肌肉的黏弹性机构。外骨骼结构的设计跟一般机械手的设计相同,因此很多拟机器人都采用这种设计。

外骨骼型结构并没有正确反映人体胳膊的结构原理。如果采用更像人体结构的设计,那就是内骨骼结构。内骨骼结构是在构件与关节的外侧安装直线型驱动器或金属丝的方法。人体胳膊上的肌肉、腱、骨骼连接部分分别对应于直线型驱动器或球面关节等。液压缸、气压缸、橡胶人造肌肉、弹簧和金属丝做成的腱均可以用作驱动器。关于球面关节可以有多种结构。图 5.50 就是其中的一种,它具有正交的 3 个轴。由于集成了 3 个独立的驱动

器和2个万向联轴节,该机构能实现绕俯仰轴和偏转轴 180° ,横摇轴 360° 的大范围转动。

表皮的存在会对手臂的功能产生影响。这是因为表皮承担着通过身体特征发布信息,与周围环境产生物理的和信息的相互作用的接口功能。表皮覆盖层多半采用与手臂分离的设计,以便实现这些功能。图5.51给出了在外骨骼结构的手臂上安装内置力觉传感器和触觉传感器的缓冲覆盖层的例子。设计覆盖层要注意几点:从外表看不到与关节运动在结构上的干涉现象,在材料的选择方面要顾及周围环境及接触状况,以及传感器的配置、金属丝/绳的选用等。

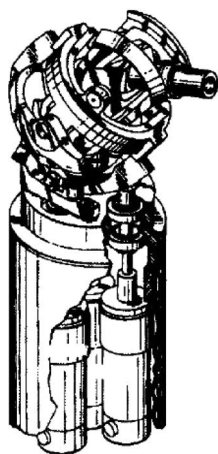


图 5.50 采用球面关节的手关节



图 5.51 装有表皮覆盖层的手臂

此外,拟人机器人手臂还受到重量及消耗能量等方面的限制。因为手臂的前提条件是被装载在躯干或腿部上面,如果有必要,实际上也允许省略一部分功能。

拟人机器人的手。

拟人手是拟人机器人在外形和功能上拟人的必要组成部分和重要环节。手的主要功能是抓握物体、身体媒介、触觉感应,它可以对周围环境进行物理的、信息的操作和相互作用,并能够与人交流。跟手臂相比,手的主要特点是,它不仅与功能之间有密切的关联性,而且各个功能是由诸多复杂的子任务组成。即拟人机器人的手必须具备能同时且高水准地实现这些功能的综合性能。拟人机器人的手的设计方法之所以与工业机器人末端器(随作业的不同加以更换)的设计方法不同,正是源于此。

同人类类似,拟人机器人需要依靠手来对物体进行操作。人手很灵巧,模仿很困难,另外,拟人机器人的电源系统、驱动及控制系统、传感及信息处理系统等完全由自身携带,这些对拟人机器人手的设计提出了非常严格的要求。

拟人机器人的手从功能方面来说很大程度上受形态的制约,而且必须安装在手臂的前端,因此对其体积和重量也有严格的限制。手的构成方法可以按照手指数量与配置方法、

指关节的自由度配置和驱动方法(腔驱动和减速机驱动这类间接驱动方式居多)、传感器的种类与配置方法等进行分类。图 5.52 所示是拟人机器人几类具有代表性的手机构。

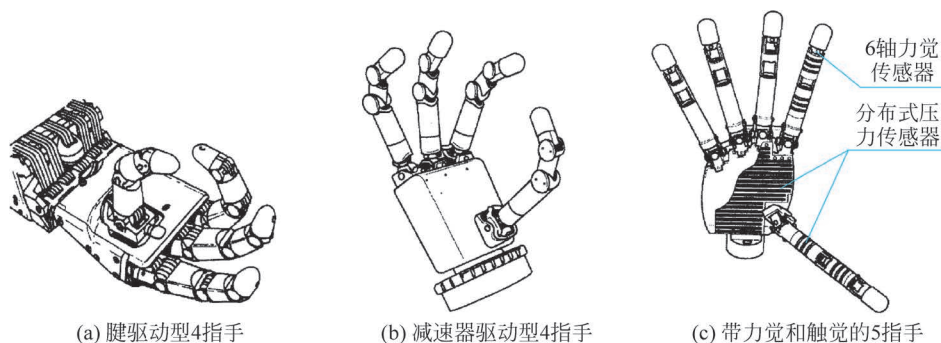


图 5.52 拟人机器人几类代表性的手机构

手指数量受到手部体积的限制。如果注重手指的抓握功能,那么倾向于将无名指和小拇指当作一个辅助器官,整个手就由 4 根手指构成。这样设计的原因主要是基于大部分抓握实际上都是由拇指、食指和中指来完成的经验。不过,在诸如手语或乐器演奏等需要手指的独立运动的作业中,就必须用 5 根手指。在这种情况下,就必须选择或省略一部分功能,抑或将整个手做大。在手指的配置方面,拇指的配置往往存在很大差异。例如,如果将拇指设置在对立位上,这样做虽然对动态抓握(操作物体的功能)或静态抓握(保持物体的功能)有利,但重力抓握(充当支持台的功能)或手势等功能就将受到限制。

关于手指关节的自由度,可以按照数量和配置两个方面进行分类。人的手由 5 根手指、每指 4 个自由度、合计 20 个自由度组成。为了独立控制所有这些关节,在手部的内部或附近位置必须保证有安装驱动器的空间。但是在形态约束下实现起来有些困难,解决的办法是考虑手指关节实际的牵连性与他动伸展功能,将部分关节设计成被动关节,或者通过腱驱动等将驱动器设置在手部的外部(图 5.52(a))等。如果是后一种方式,那就有很多个方案,诸如采用金属丝与滑轮、链传动与带传动、平行连杆、齿轮组等。

机器人手从主动关节的数量上来看,大致可以分为主动关节较多的灵巧手和主动关节较少的机器人夹持器。虽然前者有众多的主动关节,可以很灵活地进行较为复杂的手指运动,但以目前的技术来看,由于自由度过多,实时控制较为复杂,且驱动和控制系统的体积过大而致使不便于安装到拟人机器人上使用。而后者往往又仅具有过少的自由度,且外观与人手相去甚远。目前拟人机器人的手只能更多的偏向在后者基础上加入更多的拟人化外观和动作。世界先进的 P3 和 ASIMO 等拟人机器人的手就仅具有 1 或 2 个自由度,但接近人手的外观。

关于传感器的种类和配置问题,常见的是在指尖部位配置 6 轴力觉传感器。也有报告称,最近进行了压力分布和滑动等触觉的传感研究。图 5.52(c)的例子给出的 5 指手中除

指尖的力觉传感器外,还在手部和手指中部添加了分布式压力传感器。

3. 拟人机器人的躯体

躯体在拟人机器人中起连接机器人的下肢、手臂和头颈部分的作用。有些拟人机器人躯体不具有自由度,如本田公司的 P2、P3、ASIMO 拟人机器人等。有些具有 1 个自由度,如 WABOT-1 的躯体部有横摇轴自由度;Hadaly-2 拟人机器人的躯干部具有偏转自由度,它的上身可以扭动。而 WABIAN 拟人机器人的躯干部有横摇轴、俯仰轴、偏转轴各 1 个自由度。

拟人机器人躯干部的材料一般都采用轻型材料,如铝合金材料、超硬铝材料等,以使整个机器人的重量尽可能轻,便于行走。

此外,躯体还要为机载安装设备提供安装空间。上肢部分的轴系、底层功率驱动器、语音识别控制器、无线遥控监控器、控制系统以及锂离子电池组等都需要安装在机器人躯体部分。

5.3.3 拟人机器人的主要功能

1. 拟人机器人的拟人行为

拟人机器人是模仿人的形态和行为而设计制造的机器人。它具有人类的外观特征,适应人类生活环境,能模拟人的行为,进行两足步行(图 5.53)、单腿站立、双手抓握物体、感知障碍物、摔倒后的起身动作、交互式表演(图 5.54)等,能模仿人类的情绪表情(诸如欢喜、惊讶、啼哭等),能进行环境识别、对话功能等。

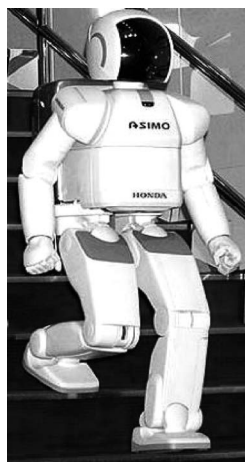


图 5.53 ASIMO 拟人机器人下楼梯

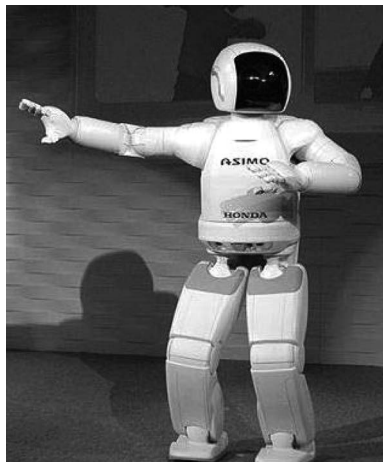


图 5.54 ASIMO 拟人机器人做表演

两足稳定步行(不翻倒)是拟人机器人最基本、最重要的行为能力之一。拟人机器人在步行过程中,有两种不同的步行方式,即静态步行和动态步行。

在静态步行中,机器人的质心在地面上的投影始终不超越支撑多边形的范围;而在动态步行中,质心的投影在某些时刻可以越离支撑多边形。

绝大多数双足步行玩具机器人只通过大脚板作静态步行。从控制工程的角度看,这没有多大意义,因为这种步行的实现并不难。另一方面,人的脚板相对于身高和质心高度而言是很小的,难以实现静态步行。在日常生活中,人类实行的是动态步行。我们习以为常的步行方式可以通过自主控制本质尚不稳定的全身平衡来实现。人类通过重复学习、实践,发展和改善获得其固有的步态。而双足步行机器人已超出传统的机械工程范畴,它必须充分利用动力学方程模型生成行走步态,这正是很多研究人员对拟人机器人感兴趣的原因。

拟人机器人的研究历史也是从实现双足步行开始的。早稻田大学研究的 WL 机器人系列是最早的双足拟人行走机器人。WL-3 机器人可以基本实现人的走和坐的动作,WL-5 机器人通过程序控制可以改变它的行走方向,WABOT-1 机器人通过液压驱动的双腿可以实现拖行行走,它们实现的都是静态步行。WL-9DR 机器人第一次真正实现了拟人行走,它采用预先设计步行方式的程序控制方法,用步行运动分析及重复实验设计步态轨迹,用以控制机器人的步行运动。该机器人采用以单脚支撑期为静态,双脚切换期为动态的准动态步行方案,实现了步幅 45cm,每步 9s 的准动态步行。WL-10R 拟人机器人可以实现向前向后和平面的转弯。WL-10RD 拟人机器人可以实现平坦路面 1.3 秒/步,阶梯路面 2.5 秒/步的平稳动态步行。WL12 拟人机器人可以实现在位置路面情况下的行走,基本实现机器人下肢的拟人行走的自主控制。

除了双足步行、抓握物体等基本动作能力之外,拟人机器人的拟人行为还表现在对周围环境的认知和情感表达上。例如,MIT(AI 实验室)开发的拟人机器人 Kismet,通过语音识别和语音合成、图像识别、表情或视线的表现,能与人进行交流。特别值得一提的是,它的脸部有多达 15 个自由度,能表现各种各样的感情。除了脸部、头部外,它身体的其他部位在人们交流中也起着重要的作用。MIT 开发的另一拟人机器人 SIG 能够将机器人自身的主动动作与视觉和听觉等传感器信息加以综合,以至于在与进行交流时能成功地区分两个说话人的声源,甚至能检测出声源的移动。日本的小林等开发了能注视对方对话的语音对话机器人。ATR 智能机器人研究所开发的拟人机器人 Robovie 能以更自然的形状参与人类的社会活动。这款机器人的特点主要体现在信息交流中,它的上半身的表现能力很强,即使是在开展认知研究时,它在与人的信息交流研究中也发挥着巨大的作用。研究中还发现,机器人拥有以语言和手势与其他机器人进行交流的能力。

拟人机器人是能够与人相互影响的最理想的机器人,因为它的外形像人,它的思维方式和行为方式也将越来越接近人。拟人机器人能够通过与环境的交互不断获得新知识,而

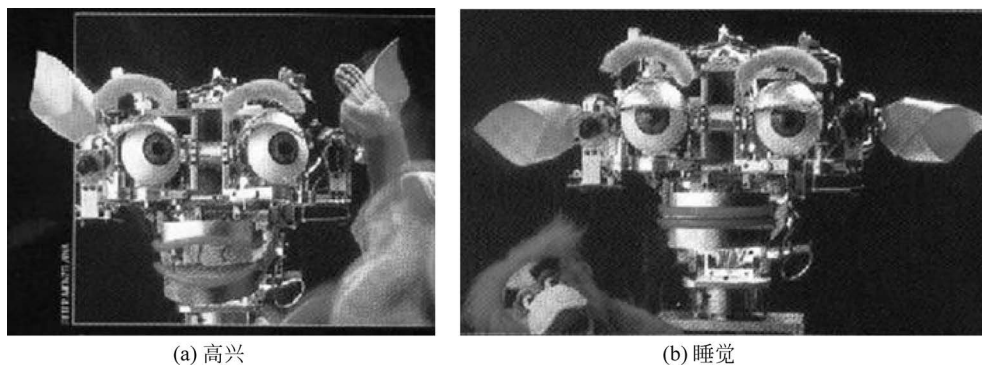


图 5.55 Kismet 拟人机器人的表情

且还能用它的设计者根本想象不到的方式去完成各种任务,它会自己适应非结构化的,动态的环境。拟人机器人要能够理解,适应环境,精确灵活地进行作业,高性能传感器的开发必不可少。传感器是机器人获得智能的重要手段,如何组合传感器摄取的信息,并有效地加以运用,是基于传感器控制的基础,也是实现机器人自治的先决条件。

拟人机器人的拟人行为主要体现在以下几个方面。

思维和学习能力: 现有拟人机器人系统的主要缺陷是对环境的适应性和学习能力的不足。机器的智能来源于与外界环境的相互作用,同时也反映在对作业的独立完成度上。机器人学习控制技术是实现拟人机器人在结构和非结构环境下实现智能化控制的一项重要技术。但是由于受到传感器噪声,随机运动,在线学习方式以及训练时间的限制,学习控制的实时性还不能令人满意。仍需要研究和开发新的学习算法、学习方式,以不断完善学习控制理论和相应的评价理论。目前针对机器人学习控制的研究,大都停留在实验室仿真的水平上。

与环境的交互: 拟人机器人与环境相互影响的能力依赖于其富于表现力的交流能力,如肢体语言(包括面部表情),思维和意识的交互。目前,机器人与人的交流仅限于固定的几个词句和简单的行为方式,其主要原因是:(1)大多拟人机器人的信息输入传感器是单模型的;(2)部分应用多模型传感器的系统没有采用对话的交流方式;(3)对输入信息的采集仅限于固定的位置,比如图像信息,照相机往往没有多维视角,信息的深度和广度都难以保证,准确性下降。

躯体结构和四肢运动: 毫无疑问,拟人机器人行动的多样性、通用性和必要的柔性是“智能”实现的首要因素。它是保证拟人机器人可塑性和与人交流的前提。拟人机器人的结构则决定了它能不能为人所接受,而且也是它像不像人的关键。拟人机器人必须拥有类似人类上肢的两条机械臂,并在臂的末端有两指或多指手部。这样不仅可以满足一般的机器人操作需求,而且可以实现双臂协调控制和手指控制以实现更为复杂的操作。拟人机器

人要具有完成复杂任务所需要的感知活动,还要在已经完成过的任务重复出现时要像条件反射一样自然流畅地作出反应。

2. 拟人机器人的人机交互(Human-Robot Interaction, HRI)

自机器人诞生并走进人们的工作和生活以来,人们为机器人发展了各种类型的交互设备和各种方式的交互方法以用于与人的沟通。发明机器人的目的是为了更好地为人类服务,因此,机器人需要有效地与人进行沟通和交流。从最初的工业机器人完全地按照人类的指令进行工作,到现代的具有较高智能的机器人自主地融入人类的工作和生活,甚至其最终目标是成为人类的伙伴,与人类共存,机器人的交互功能和技术始终是机器人发展中的重点。

在机器人学中,人机交互指人与机器人之间的信息交流,人与机器人进行交互的通道包括语音、视觉、超声波、红外线等,交互的方式比较自然,倾向于人与人的交互方式。

从人与机器人交互的历史来看,HRI 是随着机器人的不断发展而发展的。随着机器人从工业机器人发展到智能机器人以及更复杂的拟人机器人,HRI 也不断进步。HRI 最初是由于处理危险的放射性物质的需要所推进和驱使的。最初的人机界面是从机械手的远程操作的形式开始的,它拥有复杂的机械装置但是缺少感知和推理能力。通过一个单向的通信通路,人们可以采用一个手持的控制器来操纵机器人,因此它被看作人类身体的延伸和扩展。在工业领域,可以通过将已经编好的控制程序存储到工业机器人中以指导机器人执行特定的动作,例如抓取一个物体并放置在另外一个地方。它是通过输出一个位置和动作序列来实现的。这时的人机交互比较原始,机器人缺乏必要的智能,只能机械地接收人类的指令,或者按照预定的程序执行相应的命令,而人则扮演了一个智能提供者的角色。

在 20 世纪 60 年代,监督控制被引入到遥控机器人的直接操纵中。机器人因此被赋予了一定的自治性,它可以自动地控制自身的一些操作,因此操作员可以发出一些高层次的命令,而机器人可以将其分解为一系列低层次的基本操作并执行,这样就大大减轻了操作员的工作负担。还有一种共享控制的形式,即机器人控制自身的一个或者几个自由度,而操作员控制其余的动作。例如在自动驾驶的飞机上,可以由飞机自动控制高度、姿态、速度和方向。显然,相比较完全遥控的远程操纵来说,共享控制分给了机器人一定的自治性,机器人可以分配这些方面拥有的自主权利,自动地作出决策。

在 HRI 发展的过程中,许多相关领域的研究对 HRI 造成了影响和促进。随着科技的发展,在感知技术、信息融合、新的控制方法、人工智能等领域取得了显著进步,而 HRI 作为一个多学科技术的集成,也有了较大的发展。

传感技术的进步为机器人带来了新的感知能力,例如力传感器和触觉传感器被研究和集成到人机界面中去,以赋予机器人测量力的反馈和感觉刚性与可变形物体的能力。触觉

信息已经作为机器人一个重要的感知信息被用于物理和虚拟环境系统的编程中。计算机图形学所取得的进展在另外一个方面对 HRI 有所促进。通过采用图像建模和模拟技术,可以创建一个虚拟环境以作为一个前端界面来控制机器人。这些图形界面提供了可视化的设计和约束,并且也允许操作者在将一个命令发送给真实的机器人执行前,可以在虚拟环境中预先执行,这样就提供了一个机器人仿真手段。例如在将控制命令从地面发送到外部空间机器人执行前,可以在模拟设置上进行预先执行以检验效果。

在对拟人机器人的研究中,尽管最初的研究目标,即想要达到自治机器人这个目的没有完全实现,但是逐渐认识到半自治的拟人机器人,即部分地被人类操作员控制,能够提供更有效和更现实的功能。其最近的研究工作侧重于发展协作交互(Collaborative Interaction)、共享控制(Shared Control),和有监督的自治(Supervised Autonomy)等。如果将机器人与人作为伙伴一起工作显然要比其他形式更为有利一些。作为工作伙伴就需要进行对话、相互之间询问问题,以及合作解决问题。研究人员提出了一个用于协作控制的系统,这个系统能够提供监督控制到最好方面而不需要人类干涉。在协作控制中,人类可以向机器人提出建议,但是机器人可以决定是否采纳人类的建议。如果人类能够提供相关的建议,机器人可以根据建议进行执行。但是如果在规定的时间内没有找到人类,那么机器人将执行自己默认行为以对面临的场景作出反应。协作控制要求机器人具有自我感知的能力,有对话功能,并且具有一定的适应性。对话管理和用户模型也是实现协作控制系统所必须的。

从人与机器人交互的研究状况来看,在国内,清华大学、中国科学院自动化研究所、北京理工大学等高校和机构都对人机交互的理论和实践进行了许多有益的研究,北京交通大学建立了一个集语音识别与合成、人类跟踪与识别的多功能感知信息服务系统。浙江大学、清华大学、上海交通大学、南开大学等在手势识别方面进行了研究。在机器人与人的交互方面,中国科学院自动化研究所研制的拟人机器人具有一定的语音识别和语音控制功能,能够根据指令与游客进行语音聊天等。清华大学的 THBIP-1 拟人机器人中,人机交互的主要通道为语音通道,视觉通道用于感知环境信息,协调机器人手、眼、脚等实现稳定行走。上海交通大学将手势识别应用到拟人机器人 SFHR 系统中。

国外多个大学和研究机构对 HRI 进行了较多的研究,包括美国、日本、德国等,例如 Vanderbilt 大学研究了人机共存系统,提出一个基于多智能体的控制结构,研究用于帮助残疾人的拟人机器人系统,除了可以通过语音与人进行交互以外,还可以移动残疾人的身体和手臂。乔治亚理工大学研究了 HRI 的行为学和情感基础,并以 AIBO 和拟人机器人 SDR 为例进行了探讨。德国卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)大学研究的拟人机器人系统中,机器人可以和用户通过语音、头部姿态和手势指点进行交流。日本 Keio 大学提出一种人机交互主动界面——语音对话系统,它的特点是:机器人不仅可以接受用户的显式输入(如语音命

令等),而且可以从用户的隐式输入(如表情、语气、语调等)判断声音的方向以及用户的位置和距离,机器人通过不同的传感器主动适应环境的变化。R. Bischoff 等设计了一个具有人类特点的机器人 HERMES,该机器人系统中的人机交互方法主要以自然语言为主,可以通过手势、触觉以及机器人肌肉运动感觉等与人类进行交流。

目前,拟人机器人已成为机器人学研究的重要内容,这种机器人不再面向简单环境中的给定任务,而是面向与复杂环境(未建模、多目标)的交互,强调智能和个性化的情感表达。因此,这就需要更多地考虑拟人机器人本身及其与外部环境交互的特点。拟人机器人具有与人类类似的外观特征,具有较高的智能水平和自治性,需要一定的思维和学习能力、与环境的交互能力,能够理解、适应环境。日本提出要让机器人成为人类社会生活中的伙伴,介入人类的日常生活中的理念。因此,HRI 对拟人机器人自治程度和智力水平提出了较高的要求。拟人机器人不仅仅是被动地从人类获得信息,也能够自治地处理这些外界环境信息并生成交互行为反馈到外部环境。另外像语音、手势、情感等各种效应通道的采用也大大扩展了拟人机器人的交互能力。在与复杂环境的交互过程中,拟人机器人不仅要具有与人类类似的“看”“听”“说”的能力,而且要具有一定的智能和情感能力,表现出一定的个性特点,同时还要能够从交互过程中进行学习,具有一定的学习能力以提高自身的交互技能。另外,拟人机器人一般都配备有多种外部传感器组成的复杂感觉系统以全面地感受环境刺激,处理感知信息所需要的大量计算成为瓶颈问题,因此在交互时对感知信息的处理效率也是需要重视的问题。

总的来说,虽然对人机交互的理论和实践研究已经有了很大的发展,并取得了较多的成果,但是由于受到传统计算理论和方法的困扰,对于具有较高智能水平和自治性要求的拟人机器人的交互仍然缺乏足够的研究。因此迫切需要针对拟人机器人的特点和与复杂环境交互的需求,例如,前摄性、上下文感知性、智能性、情感和个性以及感知信息的处理效率等,对拟人机器人的智能交互的各个关键技术进行研究并提出新的方法。

5.3.4 拟人机器人的应用

拟人机器人不仅是一个国家高科技综合水平的重要标志,也在人类生产、生活中有着广泛的用途。由于拟人机器人具有人类的外观特征,更容易适应人类的生活和工作环境,代替人类完成各种作业。它不仅可以在有毒、辐射、粉尘的环境中代替人类作业,而且可以在很多方面扩展人类的能力,具有广阔的应用前景。将来它可以在家庭服务、医疗、教育、社会娱乐、生物技术、抗险救灾、海洋开发、机器维修、交通运输、农林水产等多个领域得到广泛应用。

服务:21 世纪,人类将进入老龄化社会,发展拟人机器人能弥补年轻劳动力的严重不

足,解决老龄化社会面临的家庭、医疗服务短缺等社会问题。拟人机器人可以与人友好相处,能够很好地担任陪伴、照顾、护理老人和病人的角色,以及从事日常生活中的服务工作,因此家庭服务行业的拟人机器人应用必将形成新的产业和新的市场。

医疗:在医疗领域,拟人机器人可以用于假肢和器官移植,用拟人机器人技术可以做成动力型假肢,协助瘫痪病人实现行走的梦想。然而,我们现在还几乎看不到以控制论开发出的生物体与人体完美的结合,因此,这方面还需要更进一步的研究和探索。

教育:一般来讲拟人机器人在教育领域有两种应用:①学生通过制作拟人机器人来实践机械结构和复杂控制软件模块的设计;②学生用拟人机器人进行实验来增强动手能力和解决新问题的能力。

娱乐:拟人机器人可以用来在展览会上做广告,它很容易吸引人的注意,因为拟人机器人在外形上接近人类,所以能引起人的兴趣。另外,它还可以用于家庭娱乐。

目前,我国拟人机器人研究与世界先进水平相比还有差距。我国科技工作者正在为赶超世界先进水平而努力奋斗。

5.4 医用机器人

随着社会的进步和生活水平的不断提高,人类对自身疾病的诊断、治疗、预防以及卫生健康给予越来越多的关注。人们尝试将传统医疗器械与信息、微电子、新材料、自动化、精密制造、机器人等技术有机结合,以提高医疗诊断的准确性和治疗的质量。在这种情况下,医用机器人得到了迅速的发展,已成为当今世界发展速度最快、贸易往来最活跃的高科技产业之一。

医用机器人技术是集医学、生物力学、机械工程学、材料学、计算机科学、机器人技术等诸多学科为一体的新型交叉研究领域,已经成为国际机器人领域的一个研究热点。目前,先进机器人技术在医疗外科手术规划模拟、微损伤精确定位操作、无损伤诊断与检测、新型手术医学治疗方法等方面得到了广泛的应用,这不仅促进了传统医学的革命,也带动了新技术、新理论的发展。

与人相比,机器人不仅具有定位准确、运行稳定、灵巧性强、工作范围大、不怕辐射和感染等优点,而且可以减小手术损伤,提高疾病诊断和手术操作精度,缩短治疗时间,降低医疗成本。许多发达国家纷纷设立专项计划,研究和开发医用机器人,并将研究成果迅速转化为产品,形成新的产业,应用于远程医疗、康复工程、卫生健康等方面,其发展速度远远超过一般工业机器人。

5.4.1 医用机器人的特点

医用机器人与工业机器人不同,主要区别在所操作的对象和工作环境方面。医用机器人的对象主要是病人,所关注的是人的生命,所以对机器人的位置精度及对病人的安全性方面有很高的要求。工业机器人解决安全性的办法是将机器人与从空间上进行隔离,而医用机器人正好相反,只有人和机器人处于同一个空间内才能发挥功能,因此完全不同于传统的安全策略。医用机器人和工业机器人在以下方面具有显著的区别:

- (1) 直接与人(患者、护理人员等)接触;
- (2) 作业内容变化无常;
- (3) 不能发生误动作;
- (4) 机器人的使用者都是非专业人员。

因此,将工业机器人简单地扩展到医疗领域是极其危险的。增大机器人的工作空间,或者自由度,实际上容易引发软件错误和控制系统故障,导致异常动作,机器人发生干涉和冲突的危险性也就随之升高。因此,有人提出从机构上来限制机器人的工作空间,以保证安全的建议;不过,这样做的后果可能会限制机器人固有长处的发挥,造成设计的失误,或者使机器人动作的柔软性和多样性的特点丧失殆尽。这些彼此矛盾的要求凸显出机构分析的重要意义。总之,对于安全来说,极其重要的一点是应该根据现场的实际使用条件进行保证安全的设计。

除了安全性之外,医用机器人还具有定位准确、状态稳定、实现微创手术、缩短医疗时间、降低医疗成本等特点,能大大提高手术的质量。

5.4.2 医用机器人的分类

随着社会快速步入老龄化、人们对医疗期望的提高以及患者对生活质量要求的提高,对医用机器人技术开发的期待主要集中在以下几个方面。

1. 实现安全和正确的治疗

近年来,微创外科手术在外科各个领域发展很快。所谓微创外科手术就是将手术钳、电手术刀等器械穿过很小的切口插入腹腔,从体外操作器械完成手术的全过程。由于能最大限度地缩小患者的创口、缩短住院时间、促进术后恢复,所以微创手术在很多医学治疗领域备受青睐。另外,无论是高龄患者还是一般患者,都需要实施像细小血管对接、显微外科手术这样一些超越人手技能的医疗操作,所以从增强人的能力来看,医疗手术还需要有精密定位技术。

2. 确保医疗人员的安全

最近感染程度很高的部门(如化验检查)对机器人技术的呼声甚高。例如,ADIS 之类

的治疗,不但难度大,而且必须防止血液等活体试样的感染,因为这种情况的致死率很高。再如,最近流行的在 X 射线支持下边观察边手术的所谓介入放射学(Interventional Radiology)治疗,这种方式虽然有助于提高治疗的正确性和安全性,但医师在手术过程中却容易受到大剂量的辐射。所以,要求开发一种能够在这种环境下发挥治疗作用的器械,以确保医疗人员的安全。

3. 自助支援和提高患者生活质量

随着世界许多国家快速步入高龄社会,为了维护社会的活力,提高生活质量,维持高龄者的健康和身体机能是必不可少的。与之矛盾的是随着年龄的增加,身体机能的降低又是不可避免的。因此,对开发防止感觉机能、行走能力下降的训练器械,或者补偿衰老肌体功能的器械出现需求。尤其当身体的某一部分机能恶化后(如卧床不起、缺乏社会交流能力),会造成老年人身体机能和精神的急剧下降。因此,非常有必要开发基于机器人应用技术的自助支援器械。

4. 实现人性化的医疗环境

护理人员数量的严重不足使近年来医疗人员的负担大大增加。这样一来,要想实现与患者人性地互动,给予对方精神安慰的所谓人性化医疗环境就变得越来越困难了。如果把机器人引入到医疗现场,让机器人代替医护人员完成部分工作,而让护理人员去完成那些必须由人完成的工作,将有利于让有限的人力专注于更加重要的事情。应该指出,引入机器人技术绝不是让人与患者分离,而是构建更为协调的医疗福利环境。

5. 医学教育的支援

为了改进医疗技术培训,引入具有虚拟现实感的机器人技术可以在教育仿真系统中发挥重要作用。近年来,由于动物保护意识的增强,医疗培训体制被要求最大限度地减少动物实验,在这个方面同样期待机器人技术的应用。

综上所述,将医用机器人的应用领域分类如表 5.2 所示。

表 5.2 医用机器人的分类

应 用 领 域	装 置 示 例
检查、诊断	基于图像诊断确定病灶位置的装置、确定诊断探头位置的装置、生理检查支援系统
治疗	手术支援机器人、显微外科支援机器人、放射线治疗标的定位装置等
医院内部间接作业	检验样本输送装置、食物输送机器人、药品分发机器人
康复支援	步行训练支援、韧性训练支援
自立支援	步行支援、动力装置、饮食支援机器人
护理支援	转移支援装置、环境控制装置
医学教育培训	心肺移植仿真、内窥镜操作仿真、内窥镜下的手术仿真
生物科学支援	显微受精支援系统、细胞操作

5.4.3 医用外科机器人

1. 计算机外科

众所周知,机械制造领域一直广泛流行计算机辅助设计/计算机辅助制造(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing,CAD/CAM)的生产方式。其含义是在设计阶段采用有限元法和各种动力学计算机仿真,得到最优设计结果,然后将得到的设计数据输入数控机床自动加工,再利用自动装配系统实施高效装配,最后利用计算机测量系统完成检验工作。实践证明,这样的制造模式使生产活动达到了很高的效率,并且有助于构筑所有工序的综合信息系统。

如果将上述手段应用到医学领域,那么设计过程就相当于手术前的诊断过程,这时三维医用图像的测量技术将起关键的作用。然后以此建立手术规划,进行手术仿真,最后利用所得的数据完成实际手术的导航任务。

在术前利用X射线、MRI-CT等各种三维医用图像测量技术,获得器官的三维构造信息,并据此建立对象的立体形状模型。另外,还可以利用质子射线断层成像法(Positron Emission Tomography,PET)、核磁共振图像(functional Magnetic Resonance Imaging,f-MRI)、脑磁场测量(magnetoencephalography,MEG)等检测方法把功能信息和解剖学信息综合起来建模,再通过反复的外科手术仿真,建立手术综合规划。显然,这些技术为外科手术开辟了新的天地。

人们随之面临的课题就是如何从术前诊断信息和手术规划信息中寻求帮助手术的技术。机械系统的判断功能虽然不比人更高,但在精度和力度等方面的把握能力却比人强得多。因此,利用术前的手术规划信息控制高精度的机械系统,有利于高精度手术的实施,甚至有人正在将此技术应用于远程手术,即手术医师与患者不在同一物理空间中。所谓不在同一物理空间中并非指简单的距离分隔,还包括医师的手臂无法到达部位的作业。手术支援机器人就是这样一种高性能的手术器械,它相当于外科医师的一只“新手”。

计算机外科(Computer Aided Surgery)就是在上述机电一体化技术驱动下的外科手术的支援技术。

2. 手术导航技术

随着磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging,MRI)和计算机断层扫描(Computed Tomography,CT)的发展,不但精细三维成像(Volumetric Imaging)得到普及,而且各种三维测量和图像处理技术也得以实现,为实施定位脑手术、整形外科手术等在术前利用图像确定目标和接近方向的技术奠定了基础,称之为“图像空间的三维手术规划——手术战略信息的制定”。将这些信息应用于手术导航就是指利用与患者对应的位置图像信息对手术

实施引导。

手术导航系统的功能是在计算机的显示器上显示出断层图像或三维 CG, 在手术操作过程中把手术部位的图像实时显示在 CG 上。由于手术医师能够自如地掌握操作部位及其周围的三维结构, 因此可以提高手术的安全性、效率和有效性。目前有人正在研究一种更高级的手术导航技术, 即不仅仅在画面上提供上述信息, 而且把医师观察到的实际空间与虚拟空间信息正确地重叠在一起, 以构建用于手术空间导航信息提示的超现实感环境。

手术导航位置测量系统除了对再现性和精度有要求之外, 由于它是在手术空间中使用的, 所以有杀菌的要求。目前使用的三维位置测量系统如下。

1) 机械式

利用编码器测量多于 6 自由度的手臂上各个关节的转动角度或直线(或曲线)移动距离, 以获得手部位置和姿态的信息。该系统的缺点是有时手臂的操作比较麻烦, 在同一时间内只能测量一个对象的位置, 为了保证无菌, 手臂必须用无菌罩覆盖等。然而, 只要机械加工精度足够高, 即可保证整个系统的精度, 那么在手术支援机器人中, 它是最适合发展成为被动维持手术器械位置的系统。

2) 光学式

这种导航方式用数台摄像机拍摄指示器上的光学标记(如发光二极管等), 根据三角测量原理来计算这些标记的位置。此外, 反射也可以采用光扩散性很强的非发光二极管标记物。该方法的精度可达 0.3mm 左右, 并可以同时测量多个位置。不过, 如果摄像机与标记物之间有障碍物, 则无法得到位置信息。

3) 磁性式

磁性式方法利用手术外部的多个线圈产生磁场和电磁波, 通过指示器上的传感器检测磁场强度和电场强度, 计算指示器到各个线圈的距离, 获得三维位置。该方法的优点是即使从外部无法看见指示器也能进行位置测量, 缺点是如果手术现场有磁性体则容易产生干扰误差。

有关三维手术支援的研究, 目前主要集中在实际手术空间和图像空间之间如何对应的问题上。一般的方法是用多个坐标系针对同一标记反复进行测量, 将数值一一对应。例如, 手术前在患者头部固定数个标记物, 它们能起到手术中患者头部位置与手术前图像位置彼此对应的媒介作用, 所以标记物固定后应该作为手术前的图像拍摄下来, 然后再拍摄用于系统的术前图像。这幅术前图像能够提供导航位置信息, 应该是一幅具有极高分辨率的三维图像, 同时在图像内应该可以测量到前述标记物的位置。进行手术时, 首先在正前方测量头部标记的位置, 这时至少应该测量头部固定的多个标记中的 3 个, 以供三维定点设备或摄像头图像进行导航图像处理使用。实际上, 考虑到测量误差, 人们通常都测量 4 个以

上的标记位置,使数据处理有冗余。这样做的目的是让手术开始前测得的标记与术前图像能够一致。于是,依据它们的对应关系就可以实现手术时头部的位姿与术前图像的位置姿态相对应,即实现坐标系的匹配。若将上述对应关系用函数表示出来,那么在手术中利用三维定点设备指定实际空间中任意一点的位置后,即可由函数计算出该点在图像中的坐标,由此成功实现术前导航。

3. 医用外科机器人的分类

按功能和应用形式来划分,医用外科机器人的分类如表 5.3 所示。

表 5.3 外科手术机器人的分类

分 类 方 式	种 类	功 能
按应用形态分类	导航机器人	手术器械等的辅助定位
	治疗机器人	主动手术钳
		主从机械手
按产生的力分类	被动型机器人	手术医师动作的约束
	主动型机器人	手术医师操作的修正
		产生自主力完成动作
按控制方式分类	术前规划固定作业型	由术前图像构成的三维位置数据确定病灶,导引手术器械,或者进行切除作业
	手术中柔性作业型	作为手术的辅助装置,使手术医师的作业更为多样化

医用外科机器人按照应用可以分为导航机器人和治疗机器人。导航机器人的任务是引导医师正确操作手术器械确定病灶的部位,治疗行为最终仍然交给医师去完成(根据定位的结果);治疗机器人除具有定位功能外,还能参与具体的治疗作业,如骨骼的切削、激光照射、血管缝合等。

根据机器人产生的力的大小,医用外科机器人可以分为被动型机器人和主动型机器人。所谓被动型机器人就是机器人本身并不产生较大的力,例如,在显微手术中,机器人仅向手术医师的手部施加很小的力,目的在于抑制医师在定位和进行显微手术时手部的颤动;所谓主动型机器人就是能够主动地产生外科处置过程中所必需的力。

按照机器人的控制形式,医用外科机器人可以分为术前规划固定作业型机器人和手术中柔性作业型机器人。前者如用于整形外科领域,手术中器官的变形和移动很小,只是利用术前的三维测量结果正确地切去部分骨骼;后者如用于近年来发展很快的由内窥镜引导,在局部空间和视野中根据医师的命令完成柔性动作的机械手,以及替代医师助手负责操作内窥镜的机械手系统等。

4. 医用外科机器人系统的总体结构

医用外科机器人系统集中了多个领域的科学和工程技术,它既不同于工业机器人系统主要完成重复性操作,也不像智能机器人系统具有高度的自主性。由于外科手术比较复

杂,外科手术机器人系统工作过程一般可以分为数据获取、术前处理和术中处理三大阶段,每个阶段由若干具体步骤组成,整个工作流程如图 5.56 所示。

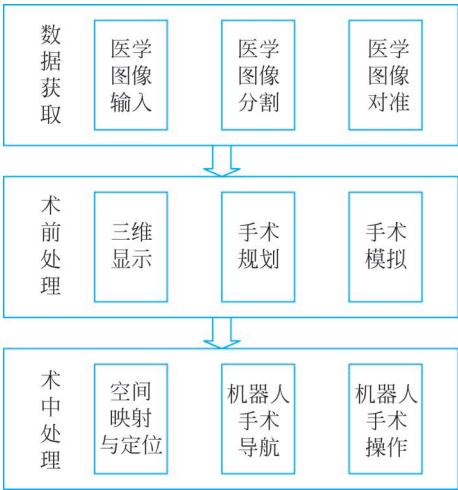


图 5.56 医用外科机器人系统工作过程

1) 数据获取

(1) 医学图像的数据输入。

要实现在计算机上进行手术规划和手术模拟,一个先决的条件是需要把图像信息通过某种途径数字化输入到计算机中。一般而言,有三种途径:其一,先把 CT 或 MRI 的影像胶片洗出来,再用扫描仪扫描为标准格式的图像,存储到计算机中;其二,通过存储介质(比如软盘、光盘等)拷入计算机;其三,建立网络系统,通过网络把图像数据传到计算机。这样就为图像数据的进一步处理做好了必要的准备。

(2) 图像分割。

图像分割是把图像分成各具特性区域并提取出感兴趣目标的技术和过程。在这里“特性”指的是由于各种组织的不同而在医学图像中所映射的灰度、颜色、纹理等的不同,特别是病灶区域往往与正常组织有不同的特征。要实现组织三维模型的重构,并使医生能够方便地根据重构模型进行手术路径规划等操作,首先要在图像数据中识别出病灶和其他重要组织。

在医学图像分割方面,目前主要有两类方法:一类是基于像素属性的方法,它是利用图像同一区域的某些属性(灰度、像素的统计、纹理等)是相同的,而不同区域的某些属性是不同的这一性质,通过扫描图像得到所需的区域。这一类方法中区域法和基于边界法较典型。另一类是基于知识的方法,它是在前一类方法的基础上加入知识信息结果。在区域的寻找过程中,不仅要考虑到属性的问题,同时根据相应的知识对区域进行判断和识别。

(3) 图像对准。

由于医生处理的是一张多个断层扫描图像,在计算机进行每层图像分割后,各个图像

之间的相互位置需要对准,因为每个图层中的图像位置是任意的,其倾斜角度也有差别。如果要得到病人准确完整的信息,必须对各个图像进行矫正,使其位置、倾角等特性保持一致。只有这样,才能得到病人准确的模型信息。否则,重构模型将扭曲,无法正确反映病人信息,以后工作的正确性也无从说起。

在图像对准方面,基本有两类方法:一类是基于定位标志的对准。这种图像对准是基于定位标志,计算机搜索图像上的定位标志如框架、定位点等,通过了解这些标志所对应的位置。可以根据图像中的定位标志位置判断出各个图像的相对位置,将图像序列中的图像进行对准。Birgit 在脑外科手术中利用了框架结构,在图像对准中使用框架的图像进行对准。另一类是基于图像的对准。这类方法抛弃了定位标志,减少了患者痛苦,对准方法根据图像本身特性分为两种,一种是对图像构造的三维表面进行对准,另一种是对图像中的像素点进行变形和对应。一般来说,这类方法共有三个步骤:图像分割、相应区域的对应和图像变形。通过这三步,可以将图像中关键部分进行对准,从而实现整个图像的对准。

2) 术前处理

(1) 三维模型显示。

医学图像三维模型绘制显示分为两类:面绘制法和体绘制法。

面绘制法首先将图像数据转化为相应的三维几何图元(三角面片、曲面片等),然后用传统的绘制技术将三维表面绘制出来。其中最具代表性的是轮廓线连接算法和 Marching Cubes 算法。

体绘制法与面绘制法不同,它不必构造中间几何元素,直接利用原始三维数据的重采样和图像合成技术绘制出整个数据场的图像。该方法可以绘制出数据场中细微的和难以用几何模型表示的细节,全面地反映数据场的整体信息。体绘制算法的实质是三维离散数据场的重采样和图像合成。该算法首先通过对离散的三维采样数据点重构得到初始的三维连续数据场,然后对该三维连续数据场进行重新采样。对新采样点根据其性质不同赋予相应的颜色值和不透明度,再通过一系列采样点的颜色利用颜色合成公式进行合成,最终得到整个数据场的投影图像。根据重构和合成的实现方式不同,体绘制法可以分为图像空间扫描的体绘制法、物体空间扫描的体绘制法和频域体绘制法三大类。

(2) 手术规划和模拟。

在传统微创手术中,医生是在自己的大脑中进行术前的手术规划,确定手术方案,然后根据其在医生大脑中形成三维图像进行手术。由于医生无法实时观察到病变组织与手术器械的相对位置,很难在手术过程中根据眼睛观察调整手术方案,因此这种手术方案质量的高低,往往依赖于医生个人的外科临床经验与技能,而且参与手术的其他医生很难共享主刀医生大脑中形成的整个手术规划构思,有时会出现混乱的危险。用计算机代替医生进

行手术方案的制定比人更客观、定量,而且信息可实现与其他手术医生共享。

手术规划和模拟可以分为三个阶段:首先,在得到病人的三维模型之后,医生可以漫游病人手术部位的三维重构图像,从而对手术部位及邻近区域的解剖结构有一个明确认识。然后,在专家系统支持下,根据图像信息确定病变位置、类型等信息,给出诊断结果。最后,根据诊断结果制定相应的手术方案,并将手术方案显示在三维模型上,利用虚拟现实技术按照手术计划对手术过程进行模拟操作。医生头戴头盔式立体显示器,能够观测到图像中的立体模型,手术虚拟操作则通过特制的数据手套输入。这些设备可以使医生在计算机前具有身临其境的感觉。

由于不同手术需要的信息和数据并不相同,专家系统中应预先存储大量的医学知识和专家临床经验。以神经外科立体定向手术为例,医生根据三维模型判断出肿瘤的位置,规划系统则计算出肿瘤的轮廓范围和体积,在三维模型上给出手术の入针点、穿刺路径和穿刺深度,而医生可以根据自己的临床经验修改方案,直到满意为止。

3) 术中处理

(1) 空间映射与定位。

虽然医生在三维模型上规划了手术方案,但是这个规划方案毕竟是建立在计算机图像模型上的。要成功地完成手术,必须将图像上的手术规划映射到真实病变组织的正确位置和方向,从而使实际的手术方案与图像模型的规划方案相一致。

在外科手术机器人系统中,手术规划在计算机图像空间中进行,而机器人辅助手术则在机器人空间中操作。对于这两个空间,需要寻找一个映射关系,使图像空间中的每一个点在机器人空间中都有唯一的点与之相对识,并且这两个点对识同一生理位置。只有建立了映射关系,在计算机图像空间中确定的手术方案才能在机器人操作空间中得到准确执行;在手术过程中,手术导航系统才能实时跟踪机器人末端的手术工具并将其显示在计算机屏幕上。由此可见,空间映射与定位是整个系统成功的关键,它将图像模型、手术区域和机器人操作联系起来,直接影响整个系统的精度和机器人辅助手术的成败。

(2) 机器人辅助导航和操作。

机器人是外科手术机器人系统的核心,它的作用有两个:一是计算出机器人末端的手术工具的空间位姿,实现对手术工具的导航;二是按医生指令控制手术工具运动完成辅助操作任务。

出于手术安全考虑,在整个手术过程中机器人的运动分阶段完成。运动开始命令由医生发出,机器人根据手术规划系统提供的轨迹参数生成运动指令,发送给机器人控制器,机器人完成指定操作。医生始终处于规定的和控制机器人一步一步完成任务的重要位置,特别是出现紧急情况时,机器人可以及时按照医生的指令停止或运动到安全位置。

另外,医用外科机器人的精度是指机器人运动的实际位置和指令位置间的差别,即机器人的绝对位置精度。这与传统的工业机器人系统用重复位置精度来衡量机器人精度有明显区别。外科手术机器人的运动速度一般被限制在较低水平,这是因为手术是以医生为主体的,机器人的作用只是辅助操作,手术进行中医生随时可能根据自己的判断要求机器人终止操作,因此机器人的低速运动会给医生留下一定的判断和操作空间。在手术路径选取时,要求避开一些人体的重要组织,机器人的灵活操作空间必须覆盖手术操作区间,以保证规划手术方案的实施。因此,外科手术机器人的结构类型和运动性能要求与工业机器人有很大区别。

由此可见,医用外科机器人系统是一个多学科的交叉研究领域,它涉及机器人结构、机器人控制、通信技术、计算机图像处理、计算机图形学、虚拟现实技术、医学等技术领域,涉及的研究内容广泛。

5. 医用外科机器人的应用

医用外科机器人系统是用于医疗外科手术,辅助医生进行术前诊断和手术规划,在手术中提供可视化导引或监视服务功能,辅助医生高质量地完成手术操作的机器人集成系统。

目前医用外科机器人系统的研究和开发引起了西方许多发达国家如美国、法国、德国、意大利、日本等国政府和学术界的极大关注,并投入了大量的人力和财力。早在 20 世纪 80 年代,西方七国首脑会议就确定了国际先进机器人研究计划 IARP,至今已召开过两届成员国医用机器人研讨会。美国国防部已经立项,开展基于遥操作的外科研究(Telepresence Surgery),用于战伤模拟、手术培训、解剖教学。法国国家科学研究中心开展了医疗外科仿真、规划和导引系统的研究工作。欧洲共同体也将机器人辅助外科手术及虚拟外科手术仿真系统作为重点研究发展的项目之一。医用外科机器人已经成为当前发展的热点之一。

迄今为止,国外已研究和开发了多种医用外科机器人系统,适用的范围也越来越广。

1) 内窥镜操作手

在内窥镜手术中,主刀医师在内窥镜的视野范围内实施各种外科处置,操作内窥镜的任务通常交给助手完成。此时要求主刀医师和助手能够顺畅地沟通作业意图。但是这里存在一个问题,是助手在保持内窥镜的时候难免手部的颤动,由此会造成图像的模糊,以至于无法为医师提供良好的视野。

为了解决主刀医师与助手之间的沟通问题,在腹腔镜手术中出现了内窥镜机械手,这是一个依据医师的操作保持内窥镜(腹腔镜等)位置的机械手系统。该系统用于远程手术、手术培训等。

Wang 等开发了 AESOP(Automated Endoscopic System for Optimal Positioning)机械

手。它是一个 SCARA 型的 6 自由度机械手,能以插入孔为中心控制旋转和前、后移动。

Taylor 等开发了 LARS(Laparoscopic Assistant Robot System)机械手,它除了 XYZ 轴 3 个自由度外,还有绕腹腔插入孔旋转的第 4 个自由度。它靠手臂(平行连杆机构)抓取腹腔镜,将平行连杆机构的一个顶点设为插入孔,从机构上能够实现腹腔镜以插入孔为中心的旋转运动。

如图 5.57 所示为小林等开发的腹腔镜手术内窥镜操作机械手系统。该系统考虑了安全、洗净、消毒和操作性等多个因素。机器人采用 5 连杆机构,它的组成部分有球形关节部分(用于抓取腹腔壁套针)、驱动部分、操作交互界面等。5 连杆机构的作用是从物理上把驱动部分与患者隔开,并增加了内窥镜的自动调焦功能,克服传统内窥镜必须进行前后移动才能缩放病灶图像的缺点。这样,机械手的动作范围被约束在有限的二维平面内,大大降低了医师、患者和机械手之间的干涉,提高了安全性。

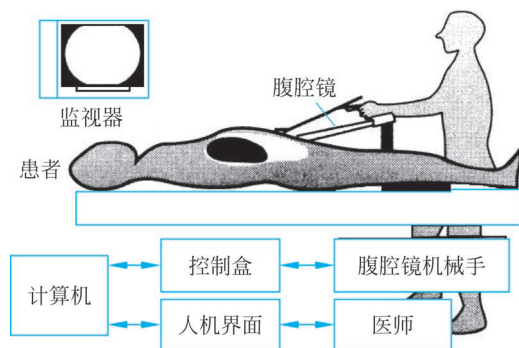


图 5.57 内窥镜机械手的系统组成

在输入操作命令的交互界面部分,为了避免在手术中被误用,该系统并未采用脚踏开关。界面上有内窥镜移动方向的显示画面,移动方向的输入则靠手术医师头部的移动,或者固定在手术钳把手处的手动开关,只有在医师确认移动方向正确后才能驱动机械手。重复执行一连串的命令—确认—驱动动作的目的在于避免误操作。与其他机器人相比,这种方式有以下特点:

- (1) 内窥镜无需进行前后移动,由于机械手的运动范围受到限制,可以避免损伤腹腔和内脏;
- (2) 腹部上方留出的操作区域很大;
- (3) 驱动部分和 5 连杆机构部分易于分离,后者的洗净和消毒很方便。

2) 整形外科手术机器人系统

在整形外科中,术前诊断可以获得对象部位的三维位置和形状测量结构,再借助于术前规划手术机器人系统,就可以在手术中将它稳定地再现出来。如在日本人工股关节置换

手术中,最早由大阪大学研发的系统按照术前规划正确地实施了切削骨骼的手术,其结果是人工关节植入骨骼的精度比传统手术更高。

德国 Berlin 大学长期开展医用外科机器人的研究工作,他们分别研究了机器人在颌面整形、牙科整形、放射外科中的应用。系统采用一套光电系统作为手术导航工具,机器人则采用改造后的 PUMA 工业机器人。他们还开发了多种适合于机器人末端夹持的手术工具。他们在计算机辅助手术导航系统、手术工具设计方面比较独特,但是在医用外科机器人本体设计方面研究不多。



图 5.58 口腔修复机器人

我国北京大学口腔医院、北京理工大学等单位联合成功研制出口腔修复机器人,如图 5.58 所示。这是一个由计算机和机器人辅助设计、制作全口义齿人工牙列的应用试验系统。该系统利用图像、图形技术来获取生成无牙颌患者的口腔软硬组织计算机模型,利用自行研制的非接触式三维激光扫描测量系统来获取患者无牙颌骨形态的几何参数,采用专家系统软件完成全口义齿人工牙列的计算机辅助统计。另外,发明和制作了单颗塑料人工牙与最终要完成的人工牙列之间的过渡转换装置——可调节排牙器。利用机器人来代替手工排牙,不但比口腔医疗专家更精确地以数字的方式操作,同时还能避免专家因疲劳、情绪、疏忽等原因造成的失误。这将使全口义齿的设计与制作进入到既能满足无牙颌患者个体生理功能及美观需求,又能达到规范化、标准化、自动化、工业化的水平,从而大大提高其制作效率和质量。

伴随着整形外科手术微创化的呼声越来越高,骨骼切削器械出现了小型化、微创化的趋势。

3) 穿刺手术机器人

众所周知,不仅在外科处置中,也在内科处置中广泛使用穿刺。例如,整形外科的神经根传导阻滞法、椎体成形手术、脑神经外科的淤血抽吸、肝脏外科的无线电波烧灼手术等,都用到穿刺手术。穿刺处置通常是在 X 射线透视或超声波图像的引导下进行的,最近出现了在 MRI 摄影引导下实施的趋势。有人正在开展对机器人进行目标组织穿刺的探索。

图 5.59 列举了一台置于 CT 机内的脑神经外科手术穿刺机器人的例子,假想目标是一个置于头部

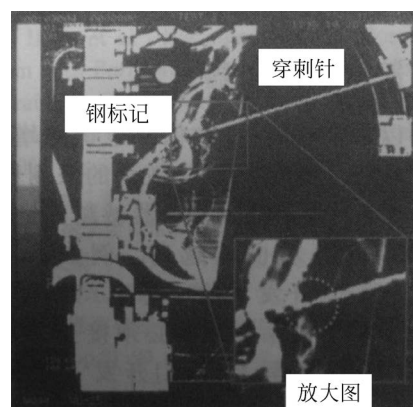


图 5.59 置于 X 射线 CP 内的脑穿刺机械手

模型内的直径为 1mm 的钢球,显示出进行穿刺动作时的 X 射线图像。

这种机械手必须设置在图像设备的内部,因此既要求它体积小型化,又不得影响图像质量。如果机器人在 MRI 装置中工作,既不应该对 MRI 内的磁场造成影响,又不应该受到 MRI 高强度磁场的影响,因此它的结构材料都应该是非磁材料。显然电磁式电机不适合做它的驱动器,应该改成超声波电机或水压驱动马达等。

4) 遥控操作手术机器人

遥操作手术(或称远程手术),顾名思义就是医生在很远的地方为病人做手术,虽然这个“远程”没有具体的数值概念,但有一点可以肯定,那就是医生和病人不在同一现场。随着国际互联网络和其他通信技术的发展,远距离手术这一幻想正逐渐走向现实。

目前世界上至少有 10 个研究小组正在从事远距离外科手术系统的研究工作。美国 Berkeley 大学系统地开展了带有力反馈和立体远程触觉的远程医疗外科机器人的研究,系统包括两台带有灵巧手部及触觉传感器的机械臂、力和触觉反馈设备、改进的成像和三维显示系统,所有的设备都由计算机控制。其研究目标是使医生能够微创地完成复杂的外科手术。斯坦福大学研究所经过多年的努力,终于研制出了临场感远程外科手术系统。它是由菲利普·格林先生发明的,所以又称为格林系统,如图 5.60 所示。

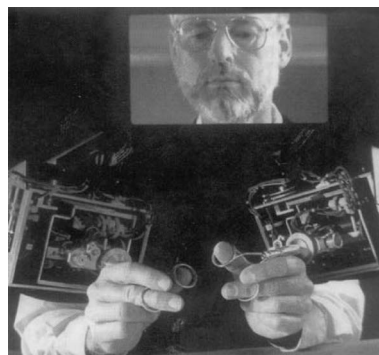


图 5.60 格林系统

格林系统是让外科医生坐在一个大操纵台前,带上三维眼镜,盯着一个透明的工作间,观看手术室内立体摄像机摄录并传送过来的手术室和病人的三维立体图像。与此同时,外科医生的两手手指分别勾住操纵台下两台仪器上的控制环。仪器中的传感器可测量出外科医生手指的细微动作并把测量结果数字化,随后传送到两只机械手上,机械手随外科医生动作,为病人做手术。声频部分能同时传来手术所发出的所有声音,使人有亲临其境之感。虽然使用格林系统,外科医生是在病人图像上做手术,但感觉却与普通手术无异。机械手还会通过传感器把手术时的所有感觉反馈给外科医生。目前,专家们已利用这套系统成功为一头猪做了手术。此外,专家们还通过一系列试验验证了这套系统的精度。例如,把葡萄切成 1 毫米厚的薄片等试验。

虽然格林系统已成功地用于动物,但真正能为人安全地实施手术还需要很长的时间,尚存很多有待解决的问题。

与格林系统相似并可与之相比美的是麻省理工学院的 W·亨特及其同事研制的 MSR-1 机器人,这是一种专门用于显微外科手术的机器人系统。这套系统的特点是:按比例缩小

外科医生的动作,使机器人所做的剪切仅为外科医生动作的百分之一,而且计算机可以滤去手的抖动,同时还能检查手术动作对病人是否安全,如发现问题会及时报警。外科医生通过传感器能得到做手术时的所有实际感觉。如果需要,计算机还能放大机器人所遇到的作用力。由于具有上述特点,这种装置极适合于做眼部手术。但 MSR-1 尚未做人体试验,系统本身还有待进一步完善和提高。

除了远程外科手术机器人外,其他的医疗机器人发展也很快。很多专家都看好微型医疗机器人,让机器人进入人体,直接对患处进行检查和治疗,增加了检查的可靠性,提高了治疗的有效性。随着微机器人的不断完善和数字化人体工程的进展,适用的微机器人系统将走进医院,揭示更多人体秘密。

5) 微创外科手术机器人

微创外科是医学领域近 20 年来高速发展的新兴学科。微创外科手术概念引入现代医学始于 1987 年,法国里昂的 Philippe Mouret 医生应用腹腔镜成功地切除了患者病变的胆囊,完成了世界医学史上首例腹腔镜胆囊切除术,使之成为微创外科手术发展史上的里程碑和人类医学史的一次革命。手术的成功带动了外科领域手术微创技术的高速发展,同时也极大地推动了微创外科手术设备和器械的研制开发与进步。

微创外科手术是在病人身体上打开一个或几个小孔,外科医生借助于各种视觉图像设备和先进灵巧手术器械装备,将手术器械经过小切口进入人体进行治疗或诊断。与传统手术相比,由于微创外科手术对健康组织的创伤小,并且病人体表伤口明显缩小,从而减少了各种手术并发症,提高了患者术中和术后身心舒适度,缩短了术后恢复时间,降低了住院费用。因此,受到医生和患者的普遍欢迎,是外科手术发展的必然趋势,具有广阔的应用前景。

微创外科手术可以分为内窥镜引导的微创手术和体外图像引导的微创手术两种类型。对于内窥镜引导的微创手术是指外科医生在深入体内的内窥镜引导下,通过病人体表的小孔将手术器械送入体内的病变部位,进而完成手术操作。内窥镜引导的微创手术已拓展到传统外科的各个专业。如普通外科的腹腔镜、胆道镜、乳腺导管内窥镜等;胸外科的胸腔镜;骨科的关节镜;脑外科的颅腔镜;妇产科的腹腔镜和宫腔镜;泌尿科的膀胱镜;耳鼻喉科的鼻腔内窥镜、支撑喉镜和耳内窥镜等。伴随各种计算机成像技术(如 B 超、CT、MRI)等医学图像诊断设备的推广应用,微创手术的概念和方法迅速发展,逐渐形成另一大类以体外图像技术引导为特征的微创手术。如神经外科立体定向手术在 CT 或 MRI 图像引导下,不用开颅可以实施活检取样、积液抽取、肿瘤内放射治疗等;胸外科和肝胆外科在图像引导下,不用传统的开胸和开腹就可以实施活检取样、胆道引流等手术;还有在 B 超图像引导下,氩氦刀经皮穿刺进入肺脏或肝脏,分别治疗肺癌或肝癌等微创手术。

5.4.4 康复机器人

康复机器人是近年出现的一种新型机器人,它分为康复训练机器人和辅助型康复机器人,如表 5.4 所示。

表 5.4 康复机器人的分类

分 类	应 用 领 域	说 明
康复训练机器人	身体机能恢复训练	上肢康复训练机器人——用于手臂、手及腕部的康复训练
		下肢康复训练机器人——用于行走功能康复训练
		脊椎康复运动训练
		颈部康复运动训练
辅助型康复机器人	自立支援机器人	辅助或替代残障人士由于身体机能缺失或减弱而无法实现动作,如机器人轮椅、机器人假肢、导盲机器人
	护理支援机器人	用于老年人或残障人士护理作业的机器人,如机器人护士

康复训练机器人的主要功能是帮助由于疾病而造成偏瘫,或者因意外伤害造成肢体运动障碍的患者完成各种运动功能的恢复训练,如行走训练、手臂运动训练、脊椎运动训练、颈部运动训练等。

辅助型康复机器人包括自立支援机器人和护理支援机器人。自立支援的目的在于丰富残障者的个人生活,支援他们按照自己的意愿进行操作和自立。主要是指日常生活中基本动作的支援,如进食、排泄、起居、移动、更衣、入浴之类。引入自立支援机器人的目的有时在于减轻护理人员的劳动强度,因而它又兼有护理机器人的功能。在自立支援机器人中,社会活动支援机器人占有重要的地位,它的作用是支援劳动就业或业余活动。护理支援机器人的工作内容与自立支援机器人的功能基本相同,也是围绕日常生活的基础活动展开。从目前的技术水平来看,护理机器人主要起到协助护理的作用,要求达到自动护理还不现实。

康复机器人作为一种自动化康复医疗设备,它以医学理论为依据,帮助患者进行科学有效的康复训练,可以使患者的运动机能得到更好的恢复。医学理论和临床医学证明,肢体损伤或偏瘫患者除了早期的手术治疗和必要的药物治疗外,正确、科学的康复训练对于肢体运动功能的恢复和提高起到非常重要的作用。

康复机器人由计算机控制,并配以相应的传感器和安全系统,康复训练在设定的程序下自动进行,可以自动评价康复训练效果,根据患者的实际情况调节运动参数,实现最佳训练效果。康复机器人技术在欧美等国家得到科研工作者和医疗机构的普遍重视,许多研究机构都开展了相关的研究工作,近年来取得了一些有价值的成果。

1. 康复训练机器人

残障治疗方法包括运动疗法。康复训练机器人就主要应用于运动疗法,例如,改善和

预防四肢运动性能低下、挛缩,让关节在活动范围内进行运动,增强肌肉力量的运动,增强耐力的运动,协调性训练、步行训练、体操治疗等。

如果机器人搭载具有测量康复功能的仪器,就可以定量采集训练对象机能恢复过程中的数据,对恢复过程作定量的分析和评价,记录康复的整个过程。如果被训练者了解自己在训练中的康复数据,也许能产生某种积极的反馈效果。

康复训练机器人的研究包括两方面:上肢康复训练机器人,用于手臂、手及腕部的康复训练;下肢康复训练机器人,用于行走功能康复训练。

1) 上肢康复训练机器人

上肢康复医疗训练机器人系统经过十几年的发展,从系统结构上分,主要包括三个阶段。

(1) 本地康复医疗训练机器人系统。

1991年,MIT设计完成了第一台上肢康复训练机器人系统 MIT-MANUS,该设备采用



图 5.61 MIT-MANUS 系统图

五连杆机构,末端阻抗较小,利用阻抗控制实现训练的安全性、稳定性和柔顺性,用于病人的肩、肘运动,如图 5.61 所示。MIT-MANUS 系统具有辅助或阻碍手臂的平面运动功能,可以精确测量手臂的平面运动参数,并通过计算机界面为患者提供视觉反馈,在临床应用中取得了很好的效果。在此基础上,又研制了用于腕部康复的机械设备,可以提供三个旋转自由度,并进行了初步的临床实验。与一般工业

机器人不同,MIT-MANUS 系统在机械设计方面考虑到了安全性、稳定性以及与学生近距离物理接触的柔顺性。

另一个典型的上肢康复训练机器人系统是 MIME(Mirror-image Motion Enabler),该设备包括左右两个可移动的手臂支撑,由工业机器人 PUMA-560 操纵患者手臂,为患肢提供驱动力,既可以提供平面运动训练,也可以带动肩和肘进行三维运动。但由于 PUMA-560 机器人本质上是工业机器人,因而从机械的角度上说不具有反向可驱动性、载荷、运动速度、输出力控制等原因,该系统在医疗领域的应用也有其局限性。

1999年,Reinkensmeyer 等研制了辅助和测量向导 ARM-Guide 机器人,用来测定患者上肢的活动空间。2000年他们对该装置进行改进,用来辅助治疗和测量脑损伤患者上肢运动功能。该设备有一个直线轨道,其俯仰角和水平面内的偏斜角可以调整。实验中患者手臂缚在夹板上,沿直线轨道运动,传感器可以记录患者前臂所产生的力。

2005年,瑞士苏黎世大学的 Nef 等开发了一种新型的上肢康复机器人 ARMin,它是一

种 6 自由度半外骨架装置,安装有位置传感器及 6 维力/力矩传感器,能够进行肘部屈伸和肩膀的空间运动,用于临床训练上肢损伤患者日常生活中的活动。

在我国,哈尔滨工业大学研制了穿戴式辅助上肢和手指康复机器人系统,如图 5.62 和图 5.63 所示。



图 5.62 机器人辅助上肢康复系统

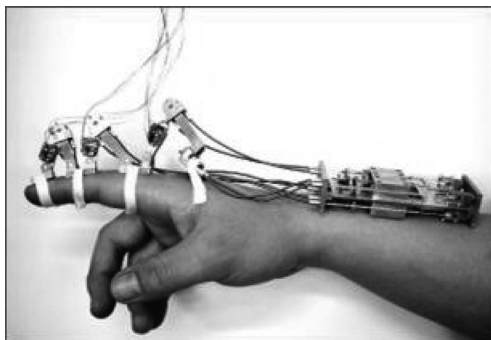


图 5.63 机器人辅助手指康复系统

不足之处在于这些机器人系统比较复杂,而且没有利用网络,因此患者不能在根据治疗师的指导远程进行康复训练。

(2) 远程康复医疗训练机器人系统

目前,需要进行康复医疗训练的患者逐渐增多,但由于受到各种因素的制约,患者不可能在医院长期接受康复治疗。因此,出院后在家庭或社区医疗中心进行康复锻炼是一种有效的方法,计算机网络为远程康复训练提供了一个良好的平台。与传统的康复训练机器人系统相比,远程康复机器人系统无论对患者和治疗师都更为经济便利。

2005 年,斯坦福大学和芝加哥康复研究所联合研制了一种便携式家用远程康复系统,这是一种主从式的遥操作系统,由主手、从手以及各自的控制器组成,从手引导患者进行康复运动并检测和记录运动信息,主手作为医生提供控制和监控的交换设备,通过网络发送命令并接受从手的运动信息,实现中风患者肘部的康复训练,该系统可以传输治疗师指令及相关信息,治疗师可以检测患者并监控训练过程,如图 5.64 所示。

(3) 基于虚拟环境的康复医疗训练机器人系统

为了鼓励患者进行康复训练,提高康复训练的效果,在训练过程中吸引患者的兴趣十分重要。虚拟环境技术的发展使这种思想得以实现,研究者们采用基于虚拟环境的用户界面,通过一些小游戏鼓励患者进行主动训练。基于虚拟环境的康复训练通常与网络相连,因此,不仅具有远程康复机器人系统的优点,还提高了患者进行康复训练的能动性。

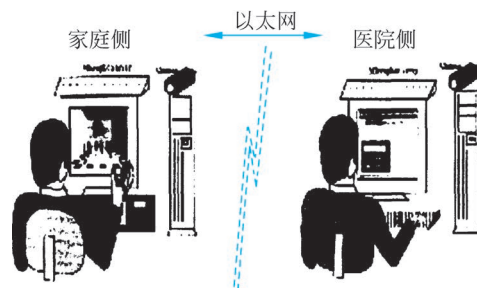


图 5.64 远程康复医疗训练机器人系统结构

Rutgers 大学和斯坦福医学院在基于虚拟环境的远程康复机器人系统方面做了大量的工作。2000 年, Rutgers 和斯坦福医学院研制了一套家用康复医疗机器人系统, 由一个带有图形加速器的 PC、一个追踪器和一个多功能触觉控制界面组成, 利用 WorldToolKit 软件构建了虚拟环境并进行虚拟康复路径规划, 远程计算机通过网络连接, 治疗师可以在门诊进行远程监控, 主要用于患者手、肘、膝和踝关节的康复训练。2001 年, David Jack 等设计实现了一套基于 PC 的虚拟现实增强系统, 利用 CyberGlove 和 Rutgers Master II-ND 力反馈手套作为输入设备, 实现用户和虚拟环境的交互, 并设计了任务级别的操作, 以增强患者进行康复训练的主动性, 实现中风患者手部功能恢复的康复训练。

J. Tang 等利用 Tool Command Language/Toolkit 构建了三维图形界面, 将视觉反馈与触觉反馈相结合, 通过网络实现了带有力反馈的协作任务。患者通过 InMotion2 对虚拟物体施加一定大小的力, 虚拟物体因此产生交互作用力, 并通过触觉设备作用于患肢。

Wisconsin 医学院和 Marquette 大学研制了康复训练机器人系统 TheraDrive, 主要由 3 个商用的力反馈操纵轮和驱动软件 SmartDriver 构成, 创建上肢康复治疗虚拟环境界面, 通过计算机游戏激发患者进行训练。

虚拟环境对患者进行功能恢复训练提供了一种很好的康复环境, 目前基于虚拟环境的康复运动主要应用于手部功能恢复的康复训练。

2) 下肢康复训练机器人

下肢康复训练机器人是根据康复医学理论和人机合作机器人原理, 通过一套计算机控制下的走步状态控制系统, 使患者模拟正常人的步伐规律作康复训练运动, 锻炼下肢的肌肉, 恢复神经系统对行走功能的控制能力, 达到恢复走路机能的目的。

(1) 关节活动范围运动。

进行关节活动范围运动的目的是改善和预防四肢运动性能低下或挛缩。膝部经过整形外科手术, 需要结合被动运动来恢复关节的功能。通常的方法是借助于持续被动运动 (Continuous Passive Motion, CPM) 装置, 通过反复进行某一个模式的运动训练起到预防挛缩的作用。

安川电机公司开发了一套改进的膝关节活动范围运动系统,可以借助于多自由度结构调整多种运动模式,把训练师训练的运动模式记忆下来;具有阻抗控制功能,能够再现出像训练师徒手训练一样的感觉。该装置在庆应大学月濑康复中心临床试验的基础上,被进一步改进成可以同时控制膝关节和股关节运动的装置,并开发出运动疗法装置(Therapeutic Exercise Machine, TEM),适用于中风、脊椎损伤、脑性麻痹等下肢麻痹患者的康复训练。

(2) 步行训练。

骨折、中风或关节手术后,患者在步行训练前首先需要在病床上进行肌肉力量强化训练,然后分阶段依次进行起坐、轮椅移动训练、斜面起立训练,然后进入利用平行杆、步行器、手杖的步行训练。显然病情不同,步行训练的内容也不应该千篇一律。一般来说,骨折后或关节手术后应该以负荷训练为主,中风后则应该视患者肌肉力量的情况选择适当的步行训练。步行训练可以在悬吊平衡重锤的跑台上进行,但应该根据被训练者残留机能的大小选择适当的训练强度。

日本日立制作所研制的一种步行训练机 PW-10 如图 5.65 所示,它的步行面由两组独立驱动控制的皮带组成,利用速度设定可以让皮带以给定的恒速步行模式进行运动,它还具有主动阻抗控制功能,因此可以按照被训练者的蹬踏力来调节皮带的阻力,实现负载步行模式。这样,即使是患有单侧麻痹症状的患者也能得到适当的训练。在护助装置中也有这样的内置式电动卸载机构,另外还有其他多种模

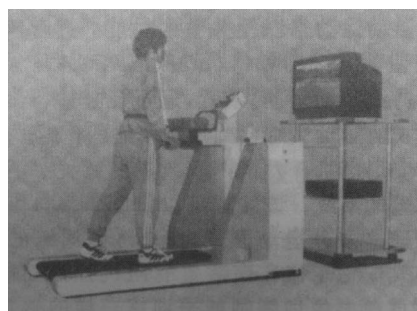


图 5.65 步行训练机 PW-10

式可供选择,如保持护助部分高度不变的固定模式,对解除部分的高度实施柔顺控制的弹性模式。以恒力向上提起被训练者、减轻体重负载的卸载模式等。有时设备还带有图形显示装置,它能与皮带速度同步显示风景,以保持被训练者的训练欲望。

如果患者已经具有依靠自己的腿部力量支撑全身的能力,即可转入室内步行训练。为此可以利用图 5.66 所示的电动助力步行支援机。在它用来支撑被训练者的支撑架的内部装有力传感器,可以测量被训练者步行时施加在支撑架上的力的大小和方向,如果想转向,可以通过控制车轮驱动电机来实现。

日本山梨医科大学开发的 AID-1 型步行训练机器人,可以通过各种传感器检测患者体重负载的变化,并利用压缩空气实现高精度的体重负载控制,在减轻患者体重的同时保持正确的躯干姿态,甚至可以用残存的微小肌肉力量实现无体重负载的步行。

德国生产的一种主被动活动器 CAMOPED 如图 5.67 所示,主要是以健康腿的运动来帮助患腿的被动训练,能够有效地帮助患者恢复其本体感觉,因此患者的协调功能也能得

到更早的恢复。其特点是运用新型材料,重量轻、结构简单、便于携带与放置。

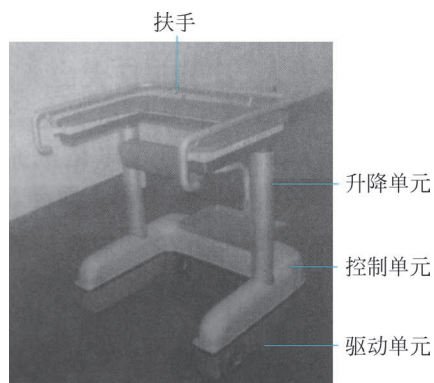


图 5.66 步行支援机

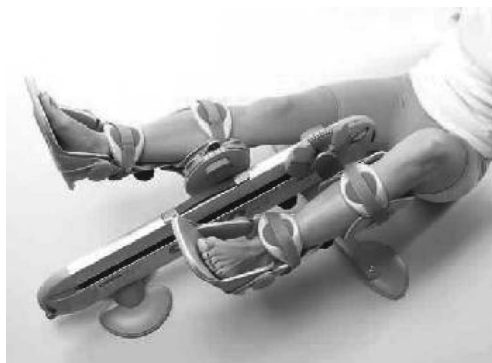


图 5.67 主被动活动器 CAMOPED

瑞士苏黎士联邦工业大学(ETH)在腿部康复机构、走步状态分析方面取得了一些成果,在汉诺威 2001 年世界工业展览会上展出了名为 LOKOMAT 的康复机器人,如图 5.68 所示。该机器人有一套悬吊系统来平衡人体的一部分重力,用一套可旋转的平行四边形机构来进行平衡控制,保持患者在走路过程中的向上和向下的运动范围,患者不用自己保持上身在竖直面内。为了适应不同患者的需要,该机器人的各个关节均可调整。为了让患者感到舒适,所有与患者接触的绑带都是宽而软的。在对患者进行康复试验中取得了很好的效果。

日本的 Makikawa 实验室结合机器人技术、生物信号测量技术、虚拟现实技术研制出一种下肢康复机器人,如图 5.69 所示。该机器人可以使病人模拟正常人走路、上斜坡、爬楼梯、滑行等各种运动,从而达到康复锻炼的目的。



图 5.68 LOKOMAT 机器人

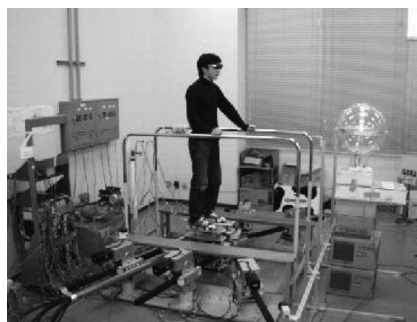


图 5.69 Makikawa 的机器人

德国柏林自由大学开展了腿部康复机器人的研究,并研制了 MGT 型康复机器人样机,如图 5.70 所示。

美国的 RUTGERS 大学开展了脚部康复机器人的研究,并研制了 RUTGER 踝部康复训练机器人样机,如图 5.71 所示。



图 5.70 MGT 型下肢康复训练机器人

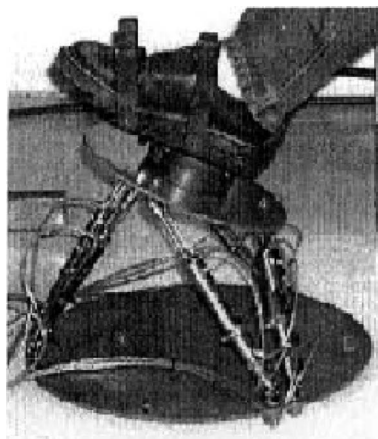


图 5.71 RUTGERS 踝部康复训练机器人

德国 Fraunhofer 研究所开展了腿部康复机器人的研究,研制了绳驱动康复训练机器人,如图 5.72 所示。

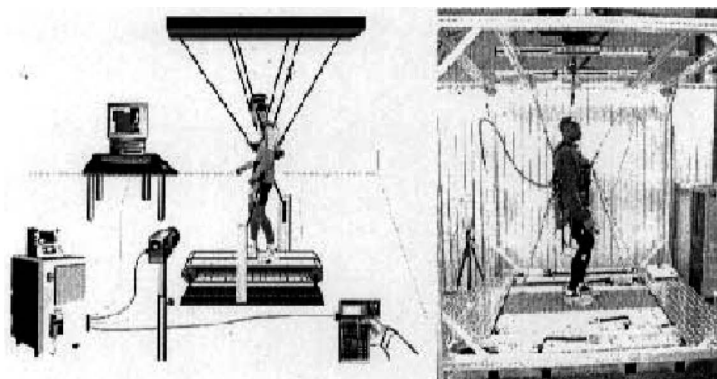


图 5.72 德国 Fraunhofer 研究所研制的绳驱动康复训练机器人

图 5.73 是我国研制的一种下肢康复训练机器人外观结构图。它由机座、左脚走步状态控制系统、右脚走步状态控制系统、左脚姿态控制系统、右脚姿态控制系统、框架、导轨、重心平衡系统、活动扶手等组成。

受训练者的双脚站在走步状态控制系统的脚踏板上,穿好承重背心,背心通过吊缆和机座内的重力平衡机构相连,以平衡受训练者的部分体重,吊缆的长度通过缆长调整机构和缆绳来调整。当机器人开始工作后,走步状态控制系统在计算机的控制下带动受训练者的双腿做走步运动,重心控制系统根据受训者的走步状态,自动计算重心的高低变化,通过

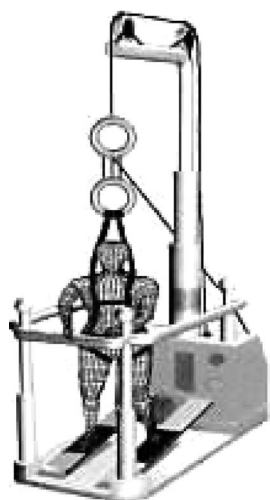


图 5.73 下肢康复训练
机器人外观结构

吊缆实时调节重心的高低,并具有防止受训练者摔倒的功能。

脚踏板由左右两块踏板组成,它在步态控制装置的控制下,与重心平衡机构协调工作帮助患者进行走步运动训练。步态控制装置主要由主动曲柄、脚踏板(连杆)和滑轮组成。主动曲柄由直流伺服电机控制,脚跟随踏板一起被动运动,形成一个椭圆轨迹,产生与正常人行走轨迹相近的运动轨迹。同时由于脚跟随踏板运动,患者的小腿和大腿处于相应的运动状态。由两套步态装置分别控制两条腿的走步状态,两者之间成 180° 相位关系,走步的速度通过控制电机的转速来调整,步幅则通过改变主动曲柄的工作半径来调节。

脚的姿态控制系统是由直线伺服机构实现的,通过控制脚踏板绕踏板轴回转运动的角度,来模拟正常人走路时踝关节的姿态变化。

重心平衡系统的作用是控制患者的重心,使之与走步状态运动相协调,重心平衡系统由吊缆、承重背心、滑轮、支撑架和偏心轮组成,通过承重背心把患者固定在支撑架上,使患者的上肢和吊缆一起运动。由重心控制系统与走步状态控制系统的同步运动,实现重心的自动调整和重力的自动平衡。

2. 辅助型康复机器人

1) 机器人轮椅

随着社会的发展和人类文明程度的提高,人类特别是残疾人越来越需要运用现代高新技术来改善他们的生活质量和生活自由度。因为各种交通事故、天灾人祸和种种疾病,每年有成千上万的人丧失一种或多种能力(如行走、动手能力等)。因此,对用于帮助残障人行走的机器人轮椅的研究已逐渐成为全社会的热点,如西班牙、意大利等国家。在我国,中国科学院自动化研究所也成功研制了一种具有视觉和口令导航功能并能与人进行语音交互的机器人轮椅,如图 5.74 所示。

机器人轮椅是将智能机器人技术应用于电动轮椅上,融合了机构设计、传感技术、机器视觉、机器人导航和定位、模式识别、信息处理以及人机交互等先进技术,从而使轮椅变成了高度自动化的移动机器人。



图 5.74 机器人轮椅

机器人轮椅主要有口令识别与语音合成、机器人自定位、动态随机避障、多传感器信息融合、实时自适应导航控制等功能。

机器人轮椅关键技术是安全导航问题,采用的基本方法是运用超声波和红外测距,个别也采用了口令控制。超声波和红外导航的主要不足在于可控测范围有限,而视觉导航可以克服这方面的不足。在机器人轮椅中,轮椅的使用者应是整个系统的中心和重要的组成部分。对使用者来说,机器人轮椅应具有与人交互的功能。这种交互功能可以很直观地通过人机语音对话来实现。尽管个别现有的移动轮椅可用简单的口令来控制,但真正具有交互功能的移动机器人和轮椅尚不多见。

2) 导盲机器人

人在生活过程中 95% 的信息是通过视觉获得的。盲人丧失了视觉,给工作、生活、社交等带来了莫大的困难。作为社会的一类特殊群体,盲人需要社会给予更多的关怀和照顾,使他们能够更好地独立生活,尤其是享受生活完全自理的感觉。但在日常生活中,如何安全地行走是盲人所遇到的最大问题之一。

视觉残障者的行走辅助装备一般采用盲人安全杖,少数借助于导盲犬。除了传统的手杖和导盲犬,为了提高盲人的生活质量,增加其行走能力,世界各国一直致力导盲机器人的研制。日本机械技术研究所自 1980 年起开始试制 MEL DOG 机器人,它是在导盲犬的基础上重点开发“服从机能”和“聪明的不服从机能”。前者将主人引导到目的地,后者则起到检测障碍物和危险状况的作用。人们还在为视觉残障者开发基于 GPS 和便携终端的基础设施。

导盲机器人是非常有效的辅助盲人步行的工具,目前导盲机器人大致上可分为以下 4 类:

(1) 电子式导盲器。早期导盲机器人的研究多半是设计一些装有传感器的小型电子装置,并以盲人可以接受的形式将传感器的侦测结果传达给盲人,让盲人在环境中具有比较安全及快速的行动能力;但只注重局部性闪避障碍物而不考虑全面性导航。

(2) 移动式机器人。移动式机器人一般都载有多种传感器,配备计算能力较强的控制计算机,智能化程度较高,所以可以在复杂的环境中进行自主导航。随着人机接口模块的设计与完善,移动式机器人即可满足导盲需求,如图 5.75 所示。

(3) 穿戴式导盲器。它直接将移动式机器人的障碍物闪避系统穿戴在盲人身上,盲人成为半被动地接受障碍物闪避系统命令的运动载



图 5.75 导盲机器人

具,并可提供比移动式机器人更灵活的行动能力。

(4) 导引式手杖。它是在盲人所用手杖的把手部分安装起控制作用的微型计算机,同时安装专用传感器,在手杖的下端安装有导轮的可移动装置。它其实是将原移动式机器人的动力系统移除,保留其智能探测的传感和控制部分。

(5) 手机语音导盲。它是一种较新的导盲方式,主要是用于城市方位的告知。当盲人迷路时,通过手机上所预先设置的导盲键向服务商发出求助信息,服务商接到信息后将通过 GPRS 向盲人发出语音信息,接听后即可得知当前位置。此方式要求手机支持 WAP 上网功能,不便于行进中的实时导盲,而且费用相对较高。

3) 机器人护士

机器人护士可以完成以下各项任务:运送医疗器材、药品、试验样品及试验结果,为病人送饭、病历、报表及信件,帮助病人进食、移动、入浴、入厕,在医院内部送邮件及包裹等。

日本医疗福利机器人研究所、富士通公司、安川电机公司合作开发了 HelpMate SP 机器人搬运系统(Pyxis Corp.),其用途是负责医院内部的药品、检物品、食物、卡片等的运输,还能做到给老年人、残障者自动化配膳、送膳,这样有利于延长面对面护理患者的时间,提高护理质量。

进食的特点是按照个人习惯的速度,依次向嘴里递送食物,设备应该在每天规定的时段内完成进食服务。进食支援机器人被认为可以用来减轻残障者对进食的厌倦情绪,有效地完成护理任务。目前人们在这方面开展了不少的研究。图 5.76 所示的 HANDY1 (Rehab Robotics Limited)机器人的原理是由护理者接通电源,将食物放入专用容器内,如果接触传感器检测到使用者的手指或手臂的动作,即可控制机械手从托盘中选择指定的食物送至口中。该机器人更换执行部分(托盘)后还可以提供洗脸、刷牙等洗漱动作方面的帮助。

MANUS(Exact Dynamics)机器人有一个 $6+2\text{DOF}$ 的机械手,可以搭载在轮椅上,通过操作 4×4 个按钮和游戏操纵杆来完成进食、整容(洗脸、剃须等)、日常生活(整理衣服、扶正眼镜、抓痒、帮助排泄等),动作熟练以后甚至可以完成开门、龙头开关等复杂动作。例如多用途器械的操作比较困难、负载重量小、动作迟缓等。

名为“我的汤勺”的进食护理机器人(名字叫 SECOMU)是一台携带汤勺和食叉的小型机械臂,通过操纵开关即可辅助患者进食。目前,该机器人一边在市场上销售,一边在进行现场实验。图 5.77 为该机器人的本体和操纵装置。

还有一种基于力控制的进食支援机器人,它能像正常人一样用筷子夹持柔软食物或易碎食物进行用餐。



图 5.76 HANDY1 进食护理机器人

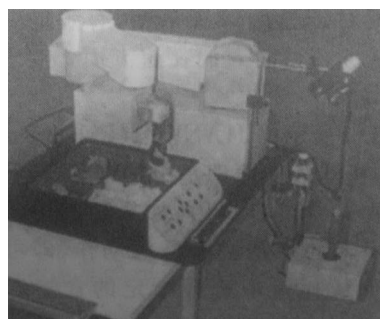


图 5.77 SECOMU 进食护理机器人

无法自理的残障者的移动类型,包括体位变换(改变身体位置)和换乘(改变距离)。体位变换,如为了防止褥疮,擦洗无法入浴者的身体,换尿布(抬起患者的臀部)等;换乘包括移动,其中一部分已经开始借助于升降机作业了,但大部分仍然依靠护理者直接作业,属于重体力劳动。为了减轻劳动强度,日本自 20 世纪 80 年代起就着手开展病床移转、轮椅换乘、入厕或入浴辅助时所需要的抱起机器人的研究。例如,电动双臂机器人 UNRSY(东海大学研制)能借助于主从操作机器人的双臂将被护理者直接抱起来进行移动。MELCONG 机器人(机械技术研究所研制)能够靠压缩空气驱动,机械手插入床下将被护理者平端起来。这一类机器人需要克服患者的体重,故其外形尺寸很大,由于与人直接接触还存在安全性问题,因此目前尚未进入实用阶段。护理机器人 Regina(日本 Logic Machine 公司研制,如图 5.78 所示)的垂直多关节双臂的末端执行器安装了一个类似躺椅的患者支撑面,靠它的行走功能能够将患者从床上移转到专用浴缸中,帮助患者入浴。利用它的一只手臂,通过无线遥控方式操纵还能更换尿布。

TRC 公司于 1985 年开始研制护士助手机器人,1990 年开始出售,目前已在世界各国几十家医院投入使用,如图 5.79 所示。护士助手机器人以完成以下各项任务:运送医疗器材和设备,为病人送饭、病历、报表及信件,运送药品、试验样品及试验结果,在医院内部发送邮件及包裹等。该机器人由行走部分、行驶控制器及大量的传感器组成。机器人可以在医院中自由行动,其速度为 0.7m/s 左右。机器人内部装有医院的建筑物地图,在确定目的地后机器人利用航线推算自主地沿走廊导航,由结构光视觉传感器及全方位超声波传感器可以探测静止或运动物体,并对航线进行修正。它的全方位触觉传感器保证机器人不会与人和物相碰。车轮上的编码器测量它行驶过的距离。在走廊中,机器人利用墙角确定自己的位置,而在病房等较大的空间时,它可利用天花板上的反射带,通过向上观察的传感器帮助定位。需要时它还可以开门。在多层建筑物中,它可以给载人电梯打电话,并进入电梯到所要到的楼层。紧急情况下,例如某一外科医生及其病人使用电梯时,机器人可以停下

来让路,2 分钟后它重新启动继续前进。通过“护士助手”上的菜单可以选择多个目的地,机器人有较大的荧光屏及用户友好的音响装置,用户使用起来迅捷方便。



图 5.78 Regina 机器人(日本 Logic Machine)



图 5.79 护士助手机器人

此外,还将可以辅助读书、操作计算机等机器人作为研究对象。

4) 机器人假肢

假肢技术是康复工程中发展最早的一个领域。假肢是人缺损肢体的替代物,用以弥补缺损肢体的形状与功能。安装假肢可以恢复患者残缺肢体原有的形态或功能,减轻功能障碍,使患者能够独立地生活、学习和工作。假肢分上肢、下肢。上肢假肢又分为假手、前臂假肢和上臂假肢;下肢假肢分为假腿、小腿假肢、大腿假肢等。

在假肢技术发展的历程中,肌电控制的上肢假肢和步态可控的下肢假肢是现代假肢技术的标志性成果。肌电假肢由电动假肢发展而来,它利用肌电信号取代机械式触动开关实现对上肢的控制,对于肘关节以上截肢的患者,提取多路肌电信号同时控制多关节运动的技术难度大且可靠性差,因而仍以安装电动假肢为主。下肢假肢的设计一直在追求站立期的稳定性和摆动期的步态仿生性,以及减少体力消耗。对于膝关节和假脚,上述问题尤其突出。膝关节机构已从单链发展到四杆机构,近几年又出现六杆机构膝关节,除了保证站立期膝关节可靠锁定,站立末期自动解锁,还能实现摆动期步态的仿生性。使用这种全功能膝关节行走所需的髌关节力矩小,从而降低了行走时的体能消耗。

目前假手的研究是国际机器人领域的一个热点。尽管近年来新元件和新材料不断出现,但临床使用的假手最多为 3 个自由度,这是因为超过 3 个自由度的假手很难由人体的残肢来控制。假手有许多类型,装饰假手又叫美容手,是为弥补肢体外观缺陷、平衡身体设计制作的。索控假手又叫功能性假手或机械手,是一种具有手的外形和基本功能的常用假手。这种假手是通过残肢自身关节运动,拉动一条牵引索,通过牵引索再控制假手的开关。临床上最常用的是利用残肢残存肌肉的肌电信号实行对假手控制的肌电假手。

假手的设计包括以下标准:具有多种抓握模式并根据物体的形状自动调节;可反馈物体的纹理、形状和温度等信息;具有本体感觉;重量轻,外观好;可以在潜意识下控制。

英国南安普顿大学电子与计算机科学系研制了一个轻型的6自由度假手。该手共5个手指,拇指有2个自由度,其余4个手指各有1个自由度。整个手采用了模块化设计。每个手指用一个直流电机驱动,并采用蜗轮蜗杆传动以保证手指被动受力时的稳定性。直流电机和蜗轮蜗杆减速装置集成在一起,称之为指节模块。手指共3个关节,各关节之间采用耦合的方法实现运动。

意大利设计了一种既可作为人手假体又可以作为机器人手爪的人手原型。该手共有3个手指,即拇指、食指和中指。每个手指有2个自由度,其中食指和中指的手指末段为被动自由度,由1个四杆机构耦合驱动。3个手指的活动自由度分别由微型直线驱动器驱动和腱传动。由于采用了生物机械和控制论的设计方法,该手能对手进行功能性模仿。

德国卡尔斯鲁厄大学应用计算机科学研究中心研制了一种仿人机械手,该手是目前用于假体的最为灵活的、抓取功能最强的假手,并且质量轻。它的形状和尺寸大小与一个成人男子的手相似,外形见图9-28所示。该手共5个手指,13个独立自由度,每个活动关节都装有1个自制的流体驱动器,能实现包括腕关节在内的多关节控制。该手能实现强力抓取、精确抓取等功能,能完成人手的一些日常操作,并且克服了以往假手沉重、功能简单和灵活性差的缺点,为灵巧操作假手实用化迈出了重要的一步。

5.5 水下机器人

5.5.1 水下机器人的概念与分类

1. 水下机器人的定义

水下机器人与通常的仿生机器人与工业机器人或不同,它并不是一个人们通常想象的具有类人形状的机器,而是一种可以在水下代替人完成某种任务的装置。在外形上更像一艘微小型潜艇,水下机器人的自身形态是依据水下工作要求来设计的。生活在陆地上的类人经过自然进化,诸多的自身形态特点是为了满足陆地运动、感知和作业要求,所以大多数陆地机器人在外观上都有类人化趋势,这是符合仿生学原理的。水下环境是属于鱼类的“天下”,人类身体的形态特点与鱼类相比则完全处于劣势,所以水下运载体的仿生大多体现在对鱼类的仿生上。目前水下机器人大部分是框架式和类似于潜艇的回转细长体。随着仿生技术的不断发展,仿鱼类的形态甚至是鱼类的运动方式的水下机器人将会不断发展。水下机器人工作在充满未知和挑战的海洋环境中,风、浪、流、深水压力等各种复杂的海洋环境对水下机器人的运动和控制干扰严重,使得水下机器人的通信和导航定位十分困难,这是与陆地机器人最大的不同,也是目前阻碍水下机器人发展的主要因素。

2. 水下机器人的分类

水下机器人根据是否载人可分为载人潜水器(Human Occupied Vehicle, HOV)和无人潜水器(Unmanned Underwater Vehicles, UUV)两大类:其中载人潜水器由人工输入信号操控各种机动与动作,由潜水员和科学家通过观察窗直接观察外部环境,其优点是由人工亲自做出各种核心决策,机动灵活,便于处理各种复杂问题,但是人生命安全的危险性增大。由于载人需要足够的耐压空间、可靠的生命安全保障和生命维持系统,这将为载人潜水器的制造带来体积庞大、系统复杂、造价高昂、工作环境受限等不利因素。无人潜水器就是人们通常所说的水下机器人,由于没有载人的限制,它更适合长时间、大范围和大深度的水下作业和长时间、大范围的考察任务,近 20 年来,水下机器人有了很大的发展,它们既可军用又可民用。随着人对海洋进一步地开发,21 世纪它们必将会有更广泛的应用。

按照无人潜水器与水面支持设备(母船或平台)间联系方式的不同,水下机器人可以分为两大类:一种是有缆水下机器人,习惯上把它称作遥控潜水器(Remotely Operated Vehicle, ROV);另一种是无缆水下机器人,习惯上把它称作自治式潜水器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。

ROV 需要由电缆从母船接受动力,并且 ROV 不是完全自主的,它需要人为的干预,人们通过电缆对 ROV 进行遥控操作,电缆对 ROV 像“脐带”对于胎儿一样至关重要,但是由于细长的电缆悬在海中成为 ROV 最脆弱的部分,大大限制了机器人的活动范围和工作效率。AUV 自身拥有动力能源和智能控制系统,它能够依靠自身的智能控制系统进行决策与控制,完成人们赋予的工作使命。AUV 是新一代的水下机器人,由于其在经济和军事应用上的远大前景,许多国家已经把智能水下机器人的研发提上日程。

有缆水下机器人都是遥控式的,根据运动方式不同可分为拖曳式、(海底)移动式和浮游(自航)式三种。无缆水下机器人都是自治式的,它能够依靠本身的自主决策和控制能力高效率地完成预定任务,拥有广阔的应用前景,在一定程度上代表了目前水下机器人的发展趋势。

HOV、ROV 和 AUV 这三种类型的潜水器,从使用角度来讲,各具特征。AUV 可实施长距离、大范围的搜索和探测,不受海面风浪的影响;ROV 可将人的眼睛和手“延伸”到 ROV 所到之处,信息传输实时、可以长时间在水下定点作业;HOV 可以使人亲临现场进行观察和作业,其精细作业能力和作业范围优于 ROV。根据目前的技术水平,三种不同的潜水器各有使命,互相不能替代,特别是目前无人潜水器还替代不了人在现场的主观能动作用。

一支优秀的水下科研或者工程队伍,往往需要配备多种潜水器,依靠他们之间的相互配合,优势互补,才能完成各项水下作业任务。往往是先通过 AUV 潜水器进行大范围的目

标搜索,然后通过载人潜水器进行短时间,小功率的作业,或者通过 ROV 潜水器来进行长时间、大功率的作业。

5.5.2 水下机器人的研究现状

1. HOV 的研究现状

HOV 是最早出现的潜水器。人类为了满足了解深海的欲望,采用深水球和浮力舱相结合的方式逐步进入深海。第一艘真正意义的 HOV 为“曲斯特 I”号。1960 年 1 月 23 日,美国人唐·华尔什和深潜器发明者的儿子丁·皮卡特乘坐“曲斯特 I”号,在太平洋马里亚纳海沟下潜达到深度为 10,916m(海沟最深点为 11,034m),创造了人类下潜最深海沟的历史,这一深度也被称作为太平洋挑战者深度。但由于该潜水器无航行和作业能力,极大限制了它的使用性能,而且潜水器采用汽油作为浮力舱,体积较大,其建造与运输均不方便。因此,此类深潜器后续未得到进一步发展。

美国在 1961 年就开始 HOV 论证工作。1964 年,研制成功了工作深度为 1829m 的“阿尔文”号 HOV。“阿尔文”HOV 号(如图 5.80 所示)真正开创了人类探测海洋资源的历史,作为国际上使用效率最高的载人潜水器,“阿尔文”号进行过很多颇具影响的作业。在 1966 年,配合 CURV 无人遥控潜水器(见下文 ROV 部分介绍),打捞出美战略轰炸机失落的一颗氢弹,其影响极大。1968 年在吊放时沉没,1969 年捞起。在 1974 年,“阿尔文”号 HOV 经改装后,采用钛合金载人球壳,工作深度逐渐增至为 4500m。1977 年,“阿尔文”号 HOV 在将近 2500m 深处的加拉帕戈斯(Galapagos)断裂带首次发现海底热液和其中的生物群落。20 世纪 80 年代,“阿尔文”号 HOV 又成功地参与了对泰坦尼克号沉船的搜寻和考察。至今“阿尔文”号 HOV 已累计完成 5000 次以上的下潜作业,为深海研究工作作出了巨大贡献。1968 年美国还建造了 28t 的 6000m 潜深的“海崖(Seacliff)”号 HOV,现已退役。

除美国外,世界其他国家在载人潜水器方面也有大的发展。法国 1985 年研制成的“鹦鹉螺(Nautile)”号 HOV,质量为 18.5t,可载 3 人,水下作业时间 5h,最大下潜深度可达 6000m,累计下潜了 1500 多次。“鹦鹉螺”号 HOV 质量为 18.5t,可载 3 人,水下作业时间 5h,装有 2 只分别为 6 自由度和 5 自由度的机械手以及用作工具箱样品库的能收起的采样篮,并有水质取样器、沉积物取芯器、岩石取芯器、真空取样器、温度测定器、液压锤和其他切割工具等,可以进行多种海底样品的采集和其他复杂的作业任务,还能随时获得潜水器所处的精确位置。它具有质量轻、上浮/下潜速度快、能侧向移动、观察视野好、可携带一个小型 ROV 潜水器等特点。已完成过多金属结核区域、海沟、深海海底生态等调查和沉船、有害废料等搜索任务。



图 5.80 “阿尔文”号 HOV



图 5.81 “鹦鹉螺”号 HOV



图 5.82 “深海 6500”HOV

日本在 1981 年建成的潜深为 2000m 的 HOV 样机基础上,于 1989 年建成了潜深为 6500m 的“深海(Shinkai)6500”HOV。质量为 26t,水下作业时间 8h,装有三维水声成像等先进的研究观察装置。可旋转的采样篮使得操作人员可以在 2 个观察窗的任何一个进行取样作业,这是其他 HOV 所无法做到的。它已对锰结核、热液矿床、钴结壳和水深达 6500m 的海洋斜坡和大断层进行了调查,并

从地球物理角度对日本岛礁沿线所出现的地壳运动以及地震、海啸等进行了研究,还在 4000m 以下深海处发现了古鲸遗骨及其寄生的贻贝类、虾类等典型生物群。自投入使用以来已累计下潜 1000 余次。

俄罗斯是目前世界上拥有 HOV 最多的国家,比较著名的有 1987 年建成的“和平 I (MIR-I)”号和“和平 II (MIR-II)”号两艘 6000 米级 HOV。它们质量各为 19t,是仅有的 2 艘用马氏体 Ni 钢来制造载人球壳的潜水器,该 HOV 最大的特点是能源充足,其 FeNi 电池所供的总能量为美国“海涯”号 HOV 和法国“鹦鹉螺”号 HOV 的 2 倍,水下总时间长达 17~20h,水下瞬时航速高达 5 节,潜水器垂直潜浮速度可从每分钟几厘米到每分钟 35~40m,并备有高分辨率的主体摄像系统;配有两只多自由度机械手及一套取样装置,它还带有 12 套检测深海环境参数和海底地貌设备。多年来,它在太平洋、印度洋、大西洋和北极海进行了上千次的科学技术考察,包括对海底热液硫化物矿床、深海生物及浮游生物的调查和取样,大洋中脊水温场的测量,俄罗斯失事核潜艇“共青团员”号核辐射的检测和泰坦尼克沉船的水下摄影等。在 2007 年 8 月 2 日由 2 艘“和平”号载人潜水器联合完成的俄罗斯

“北极-2007”海洋科学考察,使得这2艘载人潜水器引起世人瞩目,并由此正式引发了国际社会在北极的利益之争。2011年他们又开发了两条6000米级的HOV“罗斯(RUS)”号和“孔苏尔(CONSUL)”号HOV交付俄海军使用。

世界HOV的发展历程如图5.84所示。



图 5.83 和平 I 号、II 号 HOV



图 5.84 世界 HOV 发展历程

2002年“蛟龙号载人潜水器”项目立项之初,我国HOV的基础水平仅有数百米;与此同时国外HOV技术已达到数千米。为了满足我国海洋开发及大洋矿产资源调查的需要,特别是完成勘查锰结核、富钴结壳、热液硫化物和深海生物等资源的计划目标及要求,使我国深海运载技术进入世界先进行列,“蛟龙”号诞生,它是我国自行设计、自主集成研制的HOV,具有四大功能特点:载人潜水器最大的工作深度达7000m;针对作业目标有稳定悬停就位的能力;具有实时高速传输图像和语音及探测海底小目标的能力;配备多种高性能作业工具,包括潜钻取芯器、沉积物取样器和具有保压能力的热液取样器。“蛟龙”号HOV满足在4级海况下进行水下作业、在5级海况下进行回收的技术要求。该潜水



图 5.85 我国“蛟龙”号 HOV

器长 8.4m、高 3.4m、宽 3m,用钛合金材料制成,空气质量约 22t;载人球壳直径为 2.1m,可容纳 3 名载员,1 名操作员,2 名科学家。由于运用了当前世界上的高新技术,该潜器实现了载体性能和作业要求的一体化,并具有 7000m 的最大工作深度和悬停定位能力,可到达世界 99.8% 的洋底。

2. 遥控潜水器的研究现状

ROV 是最早得到开发和应用的无人潜水器,其研制始于 20 世纪 50 年代。1960 年美国研制成功了世界上第一台 ROV——CURV1。1966 年它与载人潜器配合,在西班牙外海找到了一颗失落在海底的氢弹,引起了极大的轰动,从此 ROV 技术开始引起人们的重视。由于军事及海洋工程的需要及电子、计算机、材料等高新技术的发展,20 世纪 70 年代和 80 年代,ROV 的研发获得迅猛发展,ROV 产业开始形成。1975 年,第一台商业化的 ROV——“RCV-125”问世。经过半个多世纪的发展,ROV 已经形成一个新的产业——ROV 工业。全世界 ROV 的型号在 270 种以上,超过 400 家厂商提供各种 ROV 整机、零部件以及 ROV 服务。小型 ROV 的质量仅几千克,大型的超过 20t,其作业深度可达 10,000m 以上。在 ROV 技术研究方面,美国、加拿大、英国、法国、德国、意大利、俄罗斯、日本等国处于领先地位。

美国的 MAX Rover 是世界上最先进的全电力驱动工作级 ROV,潜深 3000m,自重 795kg,有效载荷 90kg,推进器的纵向推力 173kg,垂向推力 34kg,横向推力 39kg,前进速度



图 5.86 日本“海沟”号 ROV

为 3 节,能在 2.5 节的水流中高效工作。英国 Sbu-Atlantic 公司推出作业型 ROV——COMANCHE 载有 2 个具有 7 项功能的机械手,装载了 7 个推进器。日本海洋技术研究所研制开发的“海沟”号 ROV(图 5.86)是目前世界上下潜深度最大的 ROV,装备有复杂的摄像机、声呐和一对采集海底样品的机械手。1995 年,该 ROV 下潜到马里亚纳海沟的最深处(11,022m),创造了世界纪录。它可将一种微小的单细胞有孔虫,从马里亚纳海沟海床沉积物中拔出来。

目前,ROV 在海洋研究、近海油气开发、矿物资源调查取样、打捞和军事等方面都获得广泛的应用,是当前技术最成熟、使用最广泛、最经济实用的一类潜水器。

国内从事 ROV 开发的科研机构主要是中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、哈尔滨工程大学及中国船舶研究中心等。从 20 世纪 70 年代末起,中国科学院沈阳自动化研究所和上海交通大学开始从事 ROV 的研究与开发工作,合作研制了“海人一号”ROV,潜深 200m,能连续在水下进行观察、取样、切割、焊接等作业。此后,沈阳自动化研究所在“海人一号”ROV 的基础上,于 1986 年开始先后研制了 RECON-IV-300-SIA-01、02、03 型 ROV,“金鱼”号轻型观察用水下机器人和“海蟹”号水下工程用 6 足步行机器人。1993 年 11 月,在大连海湾进行了“8A4 水下机器人”海上试验,标志着我国在 ROV 方面的研究进入了一个新的阶段。上海交通大学的产品较多,从微型的观察型 ROV 到重达数吨的深水作业型 ROV,潜深从几十米到数千米不等。“海龙 II 型”作业 ROV 系统,重量 3.25t,潜深达 3500m,带 TMS、DP 和 VMS 系统和 2 个机械手及自动升沉补偿绞车,技术性能达到世界先进水平。

“海马”号 ROV 是中国自主研制的首台 4500m 级深海遥控无人潜水器作业系统,2014 年 4 月 22 日在南海完成海上试验,并通过海上验收。“海马”号 ROV 项目是科技部通过 863 计划支持的重点项目,是中国自主研发的下潜深度最大、国产化率最高的无人遥控潜水器系统之一。经过近 6 年的研发攻关,研制人员突破了本体结构、浮力材料、液压动力和推进、作



图 5.87 我国“海马”号 ROV

业机械手和工具等关键技术,先后完成了总装联调、水池试验和海上摸底试验等工作。海试期间,“海马”号 ROV 共完成 17 次下潜,3 次到达南海中央海盆底部进行作业试验,最大下潜深度 4502m;完成水下布缆、沉积物取样、热流探针试验、海底地震仪海底布放等任务,成功实现与水下升降装置联合作业,通过了定向、定高、定深航行等 91 项技术指标的现场考核。

2014 年 12 月 23 日,正在西太平洋进行科学考察活动的“科学”号科考船上搭载的



图 5.88 我国“发现”号 ROV

“发现”号 ROV 深海机器人下潜至雅浦海山海域接近 4200m 深处,挑战设计极限。“发现”号 ROV 装备了温度计、生物采集器、采泥箱等,是开展深海探测研究的先进工具。“发现”号 ROV 是目前我国最先进的深海科学考察设备之一,下潜深度 4500m,带有水下定位系统和深水超高清摄像系统,配备 Titan4 和 Atlas 两种机械手,能直接抓取重达 300kg 以上的生物和岩石。



图 5.89 我国“海龙三号”ROV

“海龙三号”ROV 是充分考虑矿区勘察取样应用需求,能在海底高温和复杂地形的特殊环境下开展海洋调查和作业的最高精技术装备,它是国家重大科技专项、目前我国下潜深度最大、功能最强的 ROV,代表了国内 ROV 研发最高水平。“海龙三号”ROV 进一步提升了标准化、模块化的水平,最大作业水深 6000m,作

业功率 170 马力,具备海底自主巡线能力以及更强的推力、高清高速和重型设备搭载能力,能够支持搭载多种调查设备和重型取样工具。与“海龙二号”ROV 相比,“海龙三号”ROV 不再使用中继器,采用脐带缆上捆绑浮球的无中继器布放方式,“海龙三号”ROV 系统由 ROV 本体、电动升沉补偿脐带绞车、止荡器、操纵控制台、动力电站组成。其中 ROV 本体重量 5000kg,最大下潜水深 6000m,载荷能力 3000kg,基本尺寸: 3.2m(净长)×1.9m(宽)×2.1m(净高),是目前国内下潜深度最大的 ROV。操作控制台与动力电站均集成在一个 6.6m(长)×2.5m(宽)×2.6m(高)集装箱内。“海龙三号”ROV 的最大前进/后退速度: 3.2kn,具备 4 个水平推力器和 3 个垂向推力器。在控制功能上具备自动定向、自动定深、自动定高功能,在悬停定位与巡线控制方面,“海龙三号”具备强干扰力环境下精确定位能力,同时能对动态干扰力快速响应和补偿,进一步发展了 ROV 海底自主精细巡线技术,支持海底精细探测。在取样作业方面,“海龙三号”ROV 拥有一只七功能主从式机械手和一只五功能开关式机械手,满足海底多种形式的作业需求。在作业工具包方面,在“海龙二号”工具包的基础上,“海龙三号”新添了岩石切割取样器、沉积物保压取样器、沉积物取样器等工具,同时预留的各路液压电气接口能够支持搭载多种类型的调查取样设备。

3. AUV 的研究现状

在过去的十几年中,水下技术较发达的国家像美国、日本、俄罗斯、英国、法国、德国、加拿大、瑞典、意大利、挪威、冰岛、葡萄牙、丹麦、韩国、澳大利亚等建造了数百个智能水下机器人,虽然大部分为试验用,但随着技术的进步和需求的不断增强,用于海洋开发和军事作战的智能水下机器人不断问世。由于智能水下机器人具有在军事领域大大提升作战效率的优越性,各国都十分重视军事用途智能水下机器人的研发,著名的研究机构有:美国麻省理工学院 MIT Sea Grant's AUV 实验室、美国海军研究生院(Naval Postgraduate School)智能水下运载器研究中心、美国伍兹侯海洋学院(Woods Hole Oceanographic Institute)、美国佛罗里达大西洋大学高级海洋系统实验室(Advanced Marine Systems Laboratory)、美国缅因州大学海洋系统工程实验室(Marine Systems Underwater Systems Institute)、美国夏

威夷大学自动化系统实验室(Autonomous Systems Laboratory),日本东京大学机器人应用实验室(Underwater Robotics Application Laboratory,URA)、英国海事技术中心(Marine Technology Center)等。

美国海军研究生院研发的 AUV ARIES(如图 5.90 所示),主要用于研究智能控制、规划与导航、目标探测与识别等技术。图 5.91 是美国麻省理工学院的 Odyssey 系列水下机器人,它可用于:在海冰下标图,以理解北冰洋下的海冰机制;检测中部大洋山脊处的火山喷发;海底资源勘探等多种用途。美国的 ABE AUV(如

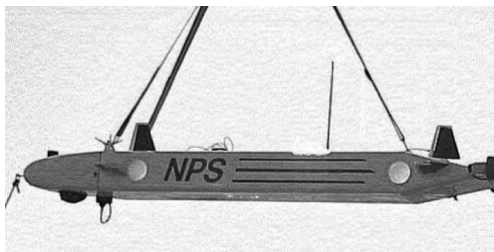


图 5.90 NPS ARIES

图 5.92 所示)最大潜深 6000m,最大速度 2 节,巡航速度 1 节,考察距离大于 30km,考察时间 50h 以上,能够在没有支持母船的情况下,较长时间地执行海底科学考察任务,它是对载人潜水器和 ROV 的补充,以构成科学的深海考察综合体系,为载人潜水器提供考察目的地的详细信息。日本研制的 R2D4 水下机器人(如图 5.93 所示)长 4.4m 宽 1.08m,高 0.81m,重 1506kg,最大潜深 4000m,主要用于深海及热带海区矿藏的探索。能自主地收集数据,可用于探测喷涌热水的海底火山、沉船、海底矿产资源和生物等。远距离环境监测装置(Remote Environmental Monitoring Units,REMUS)是美国 Hydroid 公司的系列水下机器人(如图 5.94 所示)。REMUS6000 工作深度为 25~6000m,是一个高度模块化的系统,代表了自主式水下探测器的较高水平。



图 5.91 麻省理工学院 Odyssey IV AUV

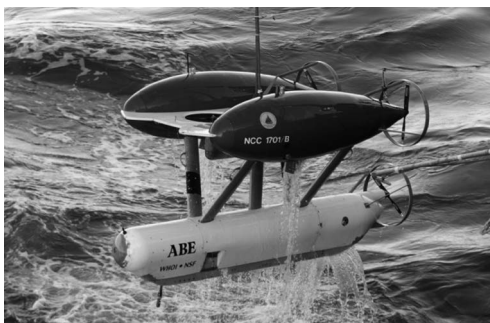


图 5.92 美国 ABE AUV

我国 AUV 技术的研究开始于 20 世纪 80 年代中期,主要研究机构包括中国科学院沈阳自动化研究所和哈尔滨工程大学等。中国科学院沈阳自动化研究所蒋新松院士领导设计了“海人一号”ROV 试验样机。之后“863”计划的自动化领域开展了潜深 1000m 的“探索者号”智能水下机器人的论证与研究工作,做出了非常有意义的探索性研究。哈尔滨工程

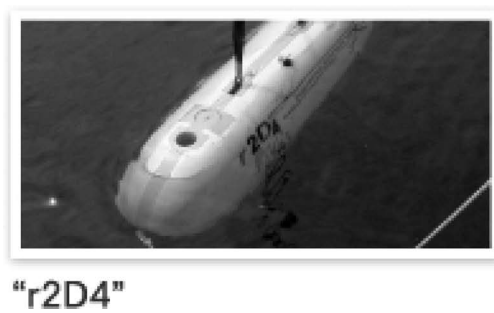


图 5.93 日本 R2D4 和 URASHIMA AUV



图 5.94 美国 REMUS6000 AUV

大学的智水系列智能水下机器人已经突破智能决策与控制等多个技术难关,各项技术标准都在向工程可应用级别靠拢。哈尔滨工程大学“智水-4”智能水下机器人在真实海洋环境下实现了自主识别水下目标和绘制目标

图、自主规划安全航行路线和模拟自主清除目标等多项功能。“潜龙一号”AUV(如图 5.95 所示)是中国国际海域资源调查与开发“十二五”规划重点项目之一,是中国自主研发、研制的服务于深海资源勘察的实用化深海装备。由中国大洋矿产资源研究开发协会组织实施,中国科学院沈阳自动化研究所作为技术总体单位,与国家海洋局第二海洋研究所等单位共同研制。这是一套集成热液异常探测、微地形地貌探测、海底照相和磁力探测等技术的实用化深海探测系统,主要用于多金属硫化物等深海矿产资源的勘探作业。



图 5.95 “潜龙 1 号”AUV



图 5.96 “潜龙 2 号”AUV

5.5.3 水下机器人的发展趋势

1. HOV 的发展趋势

在一段较长的时间里,人在潜水器内发挥的作用是无人潜水器所无法替代的,HOV 是

一种最有效的深海取样和测绘平台。为了保持美国在深海研究领域处于领先地位,美国海洋领域的科学家认为,在 21 世纪必须建立一支包括 HOV 在内的潜水器“联队”,并对此进行了具体规划。2000 年,美国成立一个由海洋工作者、教育家和科学家组成的领导小组,统一制定了发展国家海洋资源勘查的战略决策。同年 6 月,经过反复论证,伍兹霍尔(Woods Hole)海洋研究所建议美国建造一艘新型的 6500m HOV——“新阿尔文”号,与“阿尔文”号和“海涯(Sea cliff)”号 HOV 相比,“新阿尔文”号 HOV 具有较大的载人球壳内部容积,舒适的内部环境,更大的观察窗视野,同时提高了潜水器的机动性,加大了上浮和下潜的速度,使用了先进的导航设备和图像采集显示系统。

日本认为,未来在深海进行研究的需要与日俱增。仅靠目前几个在用的潜水器,无论从数量上还是质量上都无法满足日益增长的研究的需要。在研究未来 HOV 时,不应忽视无人潜水器的作用,但是,人仍然是重要的。在自然科学研究领域,当人原地下潜至深海环境时,他完全利用“人的传感器”,人的存在将继续成为开阔思维、形成革新的知识与假设、建立使用无人潜器有效操作程序的一个重要因素。可以认为,在未来开发与使用深海科研系统时,HOV 将是主要的工具和中央部件。日本深海技术协会的一个“特色委员会”结合日本未来深海科研的需要,提出了一个有 5 个不同最大作业深度和最大巡航时间的载人潜水器计划:11,000m 全海深级别、6500m 级别、4000m 级别、2000m 级别和 500m 级别。其中,11,000m 全海深级别是一个纯粹的 HOV,6500m 级和 4000m 级本身带机械手可以作业外,也能作为一个水下空间站操控小型无人潜水器进行作业。2000m 级和 500m 级则完全是一个水下空间站,主要靠操控无人潜水器进行作业。因此,日本的发展思路是建立全海深系列,不同的深度用不同的潜水器;其次,是由单纯的 HOV 发展成深海空间站,把 HOV 和无人潜水器的协同作业结合于一体,同时,还可以减少对水面支持母船的依赖。

印度认为,HOV 比 ROV 具有更多的优点,印度国家海洋技术研究所(NIOT)在 2009 年正式立项研制一台 4000m 级的 HOV,从而也使他们挤入目前只有美俄日法组成的俱乐部。NIOT 将邀请国际上的有关制造公司一起参与研制,计划用 4~5 年完成。

美国在“新阿尔文”号 HOV 的研制上,一直遵循着以实用性和经济性为主的指导思想。在将新潜水器的最大工作深度定为 6500m,满足大深度作业要求的同时,时刻不忘经济性目标,降低运营成本。作为 HOV 技术的未来发展趋势,主要是在经济性、舒适性和环保性上来体现。如何大幅度降低使用成本,使其与无人潜水器具有可比性;如何把进舱的设备小型化,让舱内人员更舒适;这两个要求需要对 HOV 的设计理念作一些革命性的变革。至于环保的考虑,主要是指不用水银作为纵倾调节的介质和应急安全的抛弃手段,如有条件,甚至不用压载铁作为无动力上浮下潜的手段。这两个要求主要取决于大流量高压海水泵的技术,美国的“新阿尔文”号 HOV 在设计之初曾有这一打算,但终因技术难度大,研制

经费缺乏而放弃,但这毕竟是一个技术发展方向而应该得到重视。

2. ROV 的发展趋势

ROV 具有安全、经济、高效和作业深度大等特点,在世界上得到越来越广泛的应用。加大 ROV 的研制力度,提供性能更高、经济性更好的 ROV,是市场的必然需求。现阶段 ROV 的发展趋势体现在以下几个方面。

(1) 向高性能方向发展。随着计算机技术及水下控制、导航定位、通信传感技术的快速发展,ROV 将具有更高的作业能力、更高的运动性能、更好的人机界面,便于操作。

(2) 向高可靠性发展。ROV 技术经过多年的研究,各项技术正在逐步走向成熟。ROV 技术的发展将致力于提高观察能力和顶流作业能力,加大数据处理容量,提高操作控制水平和操纵性能,完善人机交互界面,使 ROV 更加实用可靠。

(3) 向低成本、小型化和自动化方向发展。为了适应 ROV 不断扩大的应用领域,ROV 技术将会向体积小、兼容性高及模块化方向发展,突破现有水下潜航体设计中的障碍。由于国际间的技术合作愈加密切,高兼容性和模块化技术的应用将大幅度降低 ROV 的制造成本。先进技术的发展,特别是高效电池技术,已可以使 ROV 在特定工作区域以电池作能源,自动化程度将逐步提高。

(4) 向更大作业深度发展。地球上 97% 的海洋深度在 6000m 以上,称之为深海,随着海洋油气等资源的开发日益走向深海,必然要求 ROV 向更大作业深度发展。目前世界各国都在加大力度研制潜深超过 6000m 的深水 ROV。

(5) 专业化程度越来越高。任何一种 ROV 不可能完成所有的任务,它们都将只针对某个特殊的需求,配置专用设备,完成特定任务,其种类会越来越多,分工会越来越细,专业化程度会越来越高。

(6) 新概念 ROV 即将出现。多媒体技术、临场感技术及虚拟现实技术等新型技术在 ROV 中的应用将产生新一代全新概念的 ROV。

3. AUV 的发展趋势

1) 整体设计的标准化和模块化

为了提升 AUV 的性能、使用的方便性和通用性,降低研制风险,节约研制费用,缩短研制周期,保障批量生产,智能水下机器人整体设计的标准化与模块化是未来的发展方向。在 AUV 研发过程中依据有关机械、电气、软件的标准接口与数据格式的要求,分模块进行总体布局和结构优化的设计和建造。AUV 采用标准化和模块化设计,使其各个系统都有章可依、有法可循,每个系统都能够结合各协作系统的特性进行专门设计,不但可以加强各个系统的融合程度,提升 AUV 的整体性能,而且通过模块化的组合还能轻松实现任务的扩展和可重构。

2) 高度智能化

由于 AUV 工作环境的复杂性和未知性,需要不断改进和完善现有的智能体系结构,提升对未来的预测能力,加强系统的自主学习能力,使智能系统更具有前瞻性。目前针对如何提升 AUV 的智能水平,已经对智能体系结构、环境感知与任务规划等领域展开一系列的研究。新一代的 AUV 将采用多种探测与识别方式相结合的模式来提升环境感知和目标识别能力,以更加智能的信息处理方式进行运动控制与规划决策。它的智能系统拥有更高的学习能力,能够与外界环境产生交互作用,最大限度地适应外界环境,帮助其高效完成越来越倚重于它的各种任务,届时 AUV 将成为名副其实的海洋智能机器人。

3) 高效率、高精度的导航定位

虽然传统导航方式随着仪器精度和算法优化,精度能够提高,但由于其基本原理决定的误差积累仍然无法消除,所以在任务过程中需要适时修正以保证精度。全球定位系统虽然能够提供精确的坐标数据,但会暴露目标,并容易遭到数据封锁,不十分适合 AUV 的使用。所以需要开发适于水下应用的非传统导航方式,例如:地形轮廓跟随导航、海底地形匹配导航、重力磁力匹配导航及其他地球物理学导航技术。其中海底地形匹配导航在拥有完善的并能及时更新的电子海图的情况下,是非常理想的高效率、高精度水下导航方式,美国海军已经在其潜艇和潜器的导航中积极应用。未来水下导航将结合传统和非传统方式,发展可靠性高、集成度的,并具有综合补偿和校正功能的综合智能导航系统。

4) 高效率与高密度能源

为了满足日益增长的军方与民用的任务需求,AUV 对续航力的要求也越来越高,在优化机器人各系统能耗的前提下,仍需要提升 AUV 所携带的能源总量。目前所使用的电池无论体积和重量都占 AUV 体积和重量的很大部分,能量密度较低,严重限制了各方面性能的提升。所以,急需开发高效率、高密度能源,在整个动力能源系统保持合理的体积和质量的情况下,使 AUV 能够达到设计速度和满足多自由度机动的任务要求。

4. 多个体协作

随着 AUV 应用的增多,除了单一 AUV 执行任务外,会需要多个 AUV 协同作业,共同完成更加复杂的任务。AUV 通过大范围的水下通讯网络,完成数据融合和群体行为控制,实现多 AUV 磋商、协同决策和管理,进行群体协同作业。多 AUV 协作技术在军事上和海洋科学研究方面潜在的用途很大,美国在其《无人水下机器人总体规划》中规划由多艘 AUV 协同作战,执行对潜艇的侦查、追踪与猎杀,美国已经着手研究多个 AUV 协同控制技术,多个相关研究院所联合提出多 AUV 协作海洋数据采集网络的概念,并进行了大量研究,为实现多 AUV 协同作业打基础。

5.5.4 水下机器人的应用

随着人类开发海洋的步伐不断加快,水下机器人行业也逐渐火热起来,各种用途的水下机器人的身影活跃在海洋开发的最前线。自从 20 世纪 50 年代末美国华盛顿大学建造了主要用于水文调查的第一艘无缆水下机器人——“SPURV”之后,人们便对无缆水下机器人产生浓厚的兴趣,但由于各个配套系统技术上的限制,致使智能水下机器人技术的发展多年徘徊不前。随着材料、电子、计算机等新技术的飞速发展及海洋研究、开发和军事领域的迫切需求,AUV 再次引起海洋开发领域和各国军方的关注。20 世纪 90 年代后,AUV 各项技术开始逐步走向成熟,由于 AUV 在海洋研究和海洋开发中具有远大的应用前景,在未来的水下信息获取、深水资源开发、精确打击和“非对称情报对抗战”中也会有广泛的应用,因此 AUV 技术对世界各国来说都是一个重要的、值得积极研发的领域。

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的要道,也是兵戎相见的战场。21 世纪人类面临着人口膨胀和生存空间有限的矛盾,陆地资源枯竭和社会生产需要增长的矛盾,以及生态环境恶化和人类发展的矛盾这三大挑战。占地球表面积 71%的海洋,是一个富饶而远未得到开发的宝库。人类要维持自身的生存、繁衍和发展,就必须充分利用海洋资源,这也是人类无可回避的必然抉择。对人均资源占有率不高的我国来说,海洋开发更具有特殊意义。在海洋开发过程中,智能水下机器人将在海洋环境的探测与建模、海洋目标的水下探测与识别、定位与传输等方面的研究中发挥重要作用。

民用方面,水下机器人在海洋救助与打捞、海洋石油开采、水下工程施工、海洋科学研究、海底矿藏勘探、远洋作业等方面正发挥着非常重要的作用。归纳起来,ROV 在民用上主要有几个方面的应用。

(1) 海底安装。包括海底管道及电缆的开沟埋设,水下输油管道的连接、检测,海底安装物的维护和修理。

(2) 水下钻探和建造支持。包括从视频观察、监测安装、操作支持到维修。

(3) 管线检测。包括跟踪水下管线以检测漏点,确定管线的安全状态和保证安装合格等。

(4) 扫查。在管线、电缆和其他离岸设备安装之前,对环境进行必要的视频和声学扫查。

(5) 平台观测。监测工作平台的腐蚀、堵塞,定位破损,查找裂缝,估计海洋生物污染。

(6) 码头及码头桩基、桥梁、大坝水下部分检修,冲撞破损评估,航道排障,港口作业。

(7) 水下物体的定位和回收。搜寻、定位和回收打捞失事航天飞行器、舰船的残骸及其他丢失物体。

(8) 通信支持。包括对海底通信电缆的埋设、监察和修理及回收等。

(9) 废物清除,平台清刷,清理水库坝面、拦污栅等。

(10) 科学考察、研究。包括水环境、水下生物的观测、研究,海洋考察、冰下观察、水下考古、海洋地质或地球物理学研究、深海测量、海底剖面测绘、海底取样、海洋水文研究,以及深水矿藏勘探等。

军事方面,可用于反潜战、水雷战、情报侦察、巡逻监视、后勤支援、地形测绘和水下施工等领域。

(1) 反潜战:在反潜战中,AUV可以工作在危险的最前线,它装备有先进的探测仪器和一定威力的攻击武器,可以探测、跟踪并攻击敌方潜艇。AUV可以作为水下侦察通信网络的节点,也可以作为猎杀敌方潜艇的诱饵,让己方的潜艇等大型攻击武器处在后方以增加隐蔽性。

(2) 水雷战:AUV自身可以装载1到多枚水雷,自主航行到危险海域,由于AUV的目标较小,可以更隐蔽的实现鱼雷的布施,并且其上的声呐等探测装置也可协助进行近距离、高精度的鱼雷、雷场的探测与监视。

(3) 情报侦察:长航时的AUV,可在高危险的战区或敏感海域进行情报侦察工作,能够长时间较隐蔽的实现情报侦察和数据采集与传输任务。

(4) 巡逻监视:AUV可以长时间在港口及附近主要航线执行巡逻任务,包括侦查、扫雷、船只检查和港口维护等任务。它可以对敌方逼近的舰艇造成很大的威胁,必要时还可以执行主动攻击、施布鱼雷和港口封锁等任务。战期还可为两栖突击队侦察水雷等障碍,开辟水下进攻路线。

(5) 后勤支援:AUV可以布施通信导航节点,构建侦查、通信、导航网络。

(6) 相关应用:AUV可用于相关水下领域,如:海洋测绘、水下施工、物资运输和日常训练等;也可用于靶场试验、鱼雷鉴定等,把机器人伪装成鱼雷充当靶雷进行日常训练和实验鱼雷性能,以AUV作为声靶进行潜艇训练。

(7) 军港工程的水下维护。

(8) 水中试验武器装备的打捞与回收。

(9) 失事潜艇的营救。

(10) 通信中继。在某些通信受到限制的海域,可以利用AUV作为通信接口,完成指挥中心与潜艇、水面舰船之间以及与其他平台之间的通信任务。

(11) 战术水文资料的搜集。对特殊海域的海洋环境资料(如潮汐、深度、海流等水文条件)和影响战术活动的因素(如航运情况、渔业活动等)进行监视和数据统计,建立数据库,供战时使用。

(12) 作为未来的水下无人作战平台。



图 5.97 “深海挑战者”号水下观光机器人



图 5.98 水下军用机器人