

第1章 机器人工程学

制造与自己相似的机器是人类长期以来的梦想。被称为西欧文学之源的霍梅罗斯的“依里阿斯”中把这个梦想描写出来了。人们制造各种用机构带动的机关玩具和自动玩具的历史也很长了。带有近代性质的机器人(robot)这一词汇出现是比较晚的。1920年卡雷尔·查培克(K·Capek)发表的戏曲“罗莎姆万能机器人公司R.U.R”中,机器人初次亮相。这是从捷克语意为“奴隶劳动的词robota而创造的词汇,这以后出现了20世纪机器人的科幻小说。其后,不少与人类对抗的机器人成了创作的题材,1950年阿西摩夫(Asimov)在“我是机器人”中发表了机器人三原则,为人类规划了现在的机器人应取的姿态。50年代被称为机器人科幻小说的黄金时代,产生了不少有名作品,与此同时,科学家和工程师也研究了初期的机器人。为开展原子能用机械手⁽¹⁾,给残疾人用的电动假肢等就是机器人的先驱。更有兴趣的是工业机器人的最初设想也是在50年代申请的专利⁽²⁾。

到了60年代,美国的几所大学、企业有组织地从基础、应用两方面推进了开发研究,机器人学(robotics,对机器人及其设计、制造、使用法的研究⁽³⁾)初次登场。日本国也在1967年开始进口机器人,当时许多企业一齐开始了对机器人的开发。在其后十几年研究积累的基础上,可以期望80年代是有关机器人的研究开发及其实用化的飞跃发展的时代。本章中,边回顾迄今为止的机器人学前进的道路,边展望作为核心设想的,人与机器人及其有关的机器人技术将来的姿态。关于其核心技术及应用领域将在第2章以后详细论述。读了这些,如能起到入门作用,笔者将十分荣幸。

1.1 什么是机器人

在论述机器人技术以前,我们先考虑一下什么是机器人。机器人的开发是根据不同的目的通过种种途径进行的,并且对机器人的想像也因人而异。在这里,我们避免给它下固定的定义,就认为是:“有相当部分具有与人类同样机能的机械”吧。这里,希望注意的是,我们是着眼于机能方面,没有限定这种机械的样子要与人相似。

那末“人类那样的机能”的内容中,什么是最重要的呢?从机器人一词的来源,我们明白了,它是为人类劳动的自动机械。以工厂为例,我们身边有许多的自动机械。但是,过去的自动机械,只是按照一个顺序执行给定的工作。与此不同,高级的机器人的目标是对人类语言所给予的多种多样的工作,能够在各色各样的环境下独立地执行。为了理解这样的工作内容,适应环境而完成工作,机器人不能缺少头脑的作用,即智能。另外,为了做多种多样的工作,要用到类似人的手和脚。因而,(1)具有智能;(2)有类似手、脚的运动机能;(3)执行所给与工作的机械,就是机器人的本貌吧。

现在被叫做机器人的机械,并没限定完全满足这些条件。多一半儿的便宜的工业用机器人是作为单机能的机械而被设计制作的。另外,即使说有智能的机器人,多数也不过只有简单的记忆再生机能。然而,随着微电子技术的进步,机器人也迅速地向高性能化进

初期的工业机器人，大部分是低价格的程序机器人，属于高级类别的再生式机器人，也不过由记忆装置和控制线路进行简单的信息处理而已，如图1.2所示。这些被称为第一代工业机器人。装有70年代后期推出的微处理器的机器人，是在进行智能机器人基础研究中得到的成果，并实用化了的机器人。有希望成为80年代的机器人的主角。

(3) 远距离操纵机器人 机器人是代替人类工作的机械，但发挥它的真正价值的是在对人类危险的环境中作业(4)。也就是说，有放射性的地方、被污染的地方、煤矿、深海、宇宙空间等将成为机器人活跃的场所。在工厂工作的机器人，作业环境完好，而且是重复的作业，所以只要按照程序控制操作臂就可以了。但是，对于在上述危险环境里作业的指令，必须有高度的判断机能，而现在还只有靠人。因此，如图1.3所示，人在安全的区域内远距离地操纵着在危险环境中的机器人进行作业。这样的机器人称为远距离操纵机器人，或叫远离操纵器(teleoperator)。美国在宇宙探测中已把这个技术实用化了，航天飞机用的操纵臂也已被研制。在日本，研究原子能工厂保全用机器人也很热门(参见第八章)。还有，也有人提案研究能给人高度临场感的人—机器人系统(5)。

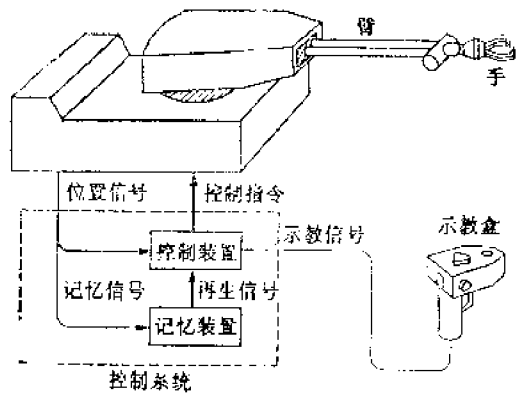


图 1.2 工业用机器人的结构

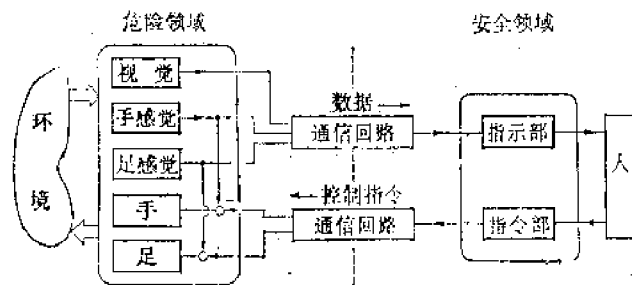


图 1.3 远距离操纵机器人

(4) 福利机器人 机器人技术已经成为由某些原因受损伤的人的机能的代行手段，还可以成为那种有残疾的人们利用来服务的机械(6)。前者的例子有如动力假手、动力假脚，后者被叫做福利机器人，可代行残疾人的机能，可对他们进行帮助。即使在日本，护理机器人、导盲犬机器人的研究也很活跃，标志着下一代机器人前进的一条道路(参见第九章)。

开发这些机器人，大致可着眼于基础研究的立场和面向实用化的立场。然而，这两者不是独立的，是相互影响相互促进的。特别要强调的是，微电子技术的迅速进步已经成为一种冲击，它在智能机器人的基础研究中所得到的知识、技巧，给应用领域带来了新的发展，如图1.4所示。

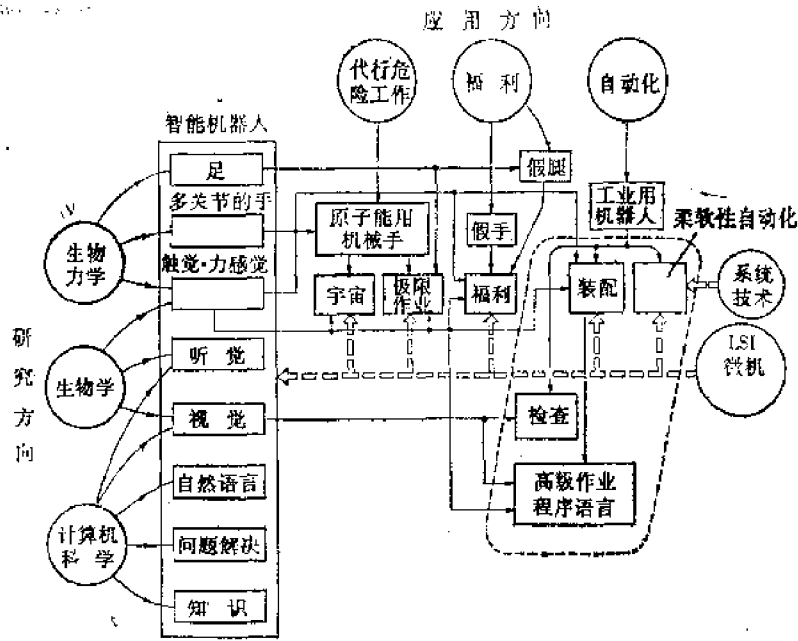


图 1.4 机器人研究的关系图

1.3 智能机器人

1.3.1 系统的构成

在追求“像人一样的机械”这一目标下，想要制造机器人，需要解决什么样的课题呢？首先想到的是制作和人类相似的硬件构成的系统。用计算机做机器人的头脑，并以它为中心，连接种种子系统，如图1.5所示。下面叙述这些子系统与人类器官的比较。

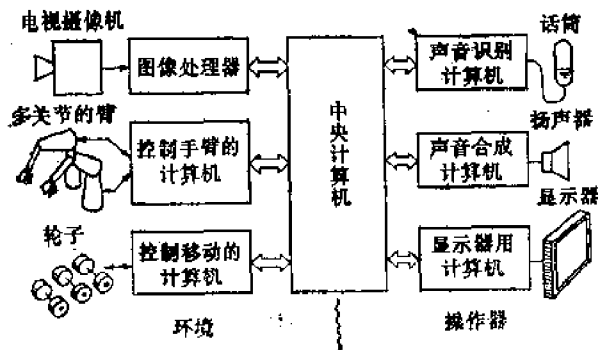


图 1.5 机器人的硬件系统

大脑——中央计算机。

眼——电视摄像机，测量距离的系统，图像处理器。

耳——麦克风，声音、音响处理计算机。

口——扬声器，声音合成计算机。

手——多关节机器人的手臂，各种传感器，控制计算机。

脚——车轮，脚，传感器，控制计算机。

由于机器人按照人的命令工作，并向人报告工作状况，所以图1.5右半边所示的与人对话的接口不能少（参见第6章）。另外，同样地，最近，人与大型计算机内的数据库，与CAD/CAM等系统能自由地交换信息，这一事实也受到重视。

下面略述有关构成机器人的各主要硬件部分。

(1) 计算机 不用说，我们的思考活动，眼的认识机能，手的灵巧劳动，都是由脑神经系统的巧妙编排所支配的。同样，机器人的能力也大体上取决于它所利用的计算机，取决于它的系统结构和它所利用的技术。

机器人上有许多输入用的传感器，有手、脚等的传动装置，需要实时地分别地对它们进行复杂的处理。对此，如图1.4所示，用机能不同的计算机，并列地进行处理的分散处理方式是较为有利的。为了能实时处理，可使用若干个高速的微处理器⁽⁷⁾，使用专门的图像处理装置⁽⁸⁾。为使它们与计算机连接，光通讯方式被认为是有希望的。

(2) 眼 作为机器人视觉传感器最常用的是电视摄像机。把来自摄像机的图像信号，进行A-D变换，由图像处理装置进行预处理，提取特征。用所得的结果对视场内的物体检测、识别，并测量物体的位置、大小⁽⁹⁾（参见第5章）。由于机器人观测的是三维空间，从一个摄像机来的信息往往不充分。因而采用两台摄像机的立体摄像法，投光光束距离测量法⁽¹⁰⁾。还有，人们也试验了用移动机器人进行三维世界的距离测量⁽¹⁰⁾。

(3) 耳 要命令机器人，用声音是很方便的。声音识别在单词水平上已实用化了，专用的处理器也已试制出来。另外，在移动机器人方面，人们研究了用发射超声波，分析它的反射信号来调查环境的方式⁽¹¹⁾，这种方式甚至在工业机器人上也被实用化了⁽¹²⁾。

(4) 手 机器人的作业几乎都由手来做。因而机器人研究的起源就是人工的手。人们已研制了多种机器人的臂（参见第2章）。最近，常用与人类胳膊相似的多关节的机器人臂。臂的顶端部分被称为hand（手），一般装有2个手指的夹持机构，用这个夹持机构进行工作。为了能使手灵活的作业，在对手的结构进行各种悉心钻研⁽¹³⁾的同时，用接近感、接触感、力感等传感器⁽¹⁴⁾、⁽¹⁵⁾的信号进行控制是很重要的。

(5) 脚 机器人移动的重要性，已由在工厂里自动搬运物体的机器人所证实，它是靠车轮移动的。但是，研究像动物、昆虫那样的多脚步行、甚至像人那样两只脚走路也相当活跃⁽¹⁶⁾ ⁽¹⁷⁾，为使机器人能在野外、山岗等那样的自然环境中作业，这一点很重要。另外，人们也着眼于机器人在大楼、铁塔、管道内等对人类危险的环境中的移动方式。

(6) 自我诊断 随着对机器人利用的进步，机器人发生故障时的对策变得重要起来了。用计算机进行自我诊断，以减小故障时事故的影响范围，同时谋求缩短修理时间。

1.3.2 智能机器人的基本课题

为使机器人更近似于人，提高上述的硬件性能十分重要，但这么说还不够，同时要开发软件，以给机器人像人类那样的智能，这才是重要的本质的问题。考虑到上述的机器人应具有的智能的内容，按其机能划分，下面分别加以说明。

(1) 作业计划 机器人自身制定计划来执行从人那里得到的工作。

(2) 环境的理解 由眼、耳、触觉等传感器了解周围的状况，在头脑内制定外界的模型。

(3) 知识的获得和利用 把机器人劳动环境的法则、各种作业内容、自身经验等知识收集起来,以易于使用的形式,整理、记忆、自由灵活地运用。

(4) 与人的对话接口 理解像英语、日语那样的自然语言,利用声音识别、声音合成等和人自由地交换信息。另外,也利用如CAD/CAM那样的已存的人—机系统以及地图、图形的数据库。

(5) 行动 用手、脚等运动器官对外界做工作,进行作业。

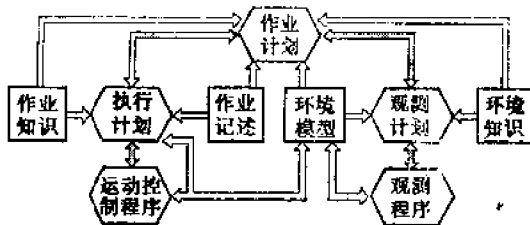


图 1.6 智能机器人的软件结构

这些不是独立的课题,相互间是有密切关联的。也就是说,机器人有这样的特征:如图1.6所示它们的子系统相互

间具有有机的联系,同时在实际的环境里进行作业。例如,想给机器人“把桌子上的钢笔拿来”这一简单任务,如果在机器人头脑的环境模型中没有桌子和桌上的某个物品,那末要建立这样的

观测计划:首先找桌子,然后寻找桌子上的某支钢笔。为此,机器人必须执行这样的作业,向容易看得见的地方移动,然后排除桌上的干扰物品而发现钢笔。这是基于怎样才能更好的观测这方面的知识而进行计划的。即使这样的简单工作,为了机器人自动地进行作业,计划、观测、行动系统之间的关联是不可少的。

对于我们人类,按上述程序进行作业是很容易的,而让机器人实现上述过程还相当困难。实际上刚才提到的课题(1)~(5)包含了人工智能(artificial intelligence)的相当多领域,具有全部这些机能的机器人,是今后的研究方向。而至今为止的研究,是把利用传感器理解环境、作业的示教、臂与手的机构及控制等直接与机器人有关的课题作为重点的,其他课题主要在人工智能领域中进行研究。

1.3.3 智能机器人研究的发展

在60年代开始的初期的智能机器人的规划,仅仅是以多面体设置起来的积木模型(blocksworld)为对象,用具有眼和手的机器人(hand eye system) (18)、(19)、(20)和移动机器人(mobile robot) (21)做了实验。这些机器人根据视觉信息控制手的动作,或边移动边观测,建立外界模型,计划简单的作业等等,这些工作有很强的综合性。还有,一些新产生的有关机器人的重要技术:诸如认识三维世界的眼、多关节的臂及其计算机控制等,引起了人们的关心。

70年代,人们开始分不同领域,个别地对机器人学进行了切实的研究。在解决问题的方面,上述例举的在积木世界中进行作业的问题,是作为人工智能的一个分支被研究的。视觉方面,按照美国的图像理解规划(image understanding)从输入图形中再构成三维世界的有关视觉理论的研究(9)、(22),这一分支也相当活跃。还有,手的研究中,在有关高性能的多关节的臂和手指、多种多样的传感器(23)等硬件和服务的软件(24)、(25)、装配作业的分析 and 实现(26)、(27)、冲突的回避(28)、机器人语言(29)、(30)等方面都推出了成果。另外,把智能机器人的技术利用于自动化的研究也很热门,

让我们接着这种研究潮流，来展望一下下一代智能机器人开发的面貌吧。首先，有像70年代进行的那样，把机器人机能的特定部分，如移动机器人的视觉、高速动作的臂等题目放在重点的研究。另外还有这样一种研究：把综合这些技术构成机器人系统时存在的问题分析清楚。

进入80年代，美国的麻省理工学院（MIT）等大学的人工智能研究所与机器人研究所合并，再次开始了机器人的研究规划。加上以往在人工智能方面的研究，对臂、手、传感器、移动机构等这样一些硬件也注入了新的设想进行了开发，仿佛要推出一部机器人学。其他大学、研究所也出现了不少进行机器人研究的小组。在欧洲法国的国家科学研究中心（CNRS）的机器人研究规划，正在研究远距离操纵机器人、装配机器人等。在日本，作为通产省大型规划，机器人的研究从“极限作业机器人”开始，打破了以往工业机器人研究的框框，由电子技术综合研究所、机械技术研究所和企业合作进行。

1.4 自动化与机器人

1.4.1 柔性自动化

近年来，在石油化工、钢铁业中代表性的设备产业方面自动化有了令人瞩目的进展，除了极少数值班人员和保全人员以外，宽大的工厂中几乎无人在操作。另一方面，在汽车和家用电器工厂中也争相使用自动化机械，但仍然依靠人工的工序还不少。在这种靠人工操作的车间里，人的操作看上去虽然好象很简单，而用机械代替人去操作却意外的困难。这是因为人手的动作，人眼的功能，实际上是由人的脑卓越的编排所支配的，为了用机械实现它们，还一定要做更多的开发研究。

在大量地长期地连续生产某种一定产品的工程中，为工程专门设计的专用自动化机械十分受欢迎。这种机械的特点是能高速度，高效率的自动生产。机械工作的各个阶段，看上去好象很复杂，实际上只不过是重复各个阶段的某一特定动作而已。其动作的图形，是由凸轮等机构形成的，但是，当加工品种变换时，使其适应新的动作是困难的。还有，与人工装配比较，自动装配机必须用精度高的零件进行组装。当不好的零件混在正品中时，机器就会停止工作，要重新开始工作要花费时间等等，存在着不少问题。

这种面向少品种大批量生产的固定的专用自动机械，满足不了多样化的消费者的需要。因此，为了给与高的附加价值，最近开始出现了小批量地生产寿命周期短的多品种产品的生产技术。这被称为柔性自动化（flexible automation）或可编程自动化（Programmable automation）⁽³¹⁾，即使生产产品的型号变化，只要改变程序，就能用同一设备生产新的产品，从而提高了效率。工业用机器人，是作为这种生产系统的基本要素，而被研制的，再加上，把CAD/CAM系统、数控机床、自动仓库、零件供给装置等综合起来就构成新的生产系统。

1.4.2 自动化及机器人的作用

在各个企业里劳动着的工人的工作细目如表1.2所示⁽³²⁾。从表中可知，装配、加工、检验是主要工作，人们期待着工业机器人对其中无论哪个工作都能起重要的作用。

表1.2 工人工作的细目 (32) (%)

		汽 车	农 业 机 械	家 用 电 器	金 属 加 工
管理销售部门		39.4	42.7	52.7	32.2
生 产 部 门	装 配	33.4	30.2	23.9	11.0
	零件加工	16.6	20.2	8.4	50.2
	检 验	9.0	5.5	13.3	5.4
	其 他	1.5	4.6	1.7	1.2

最初，领先利用计算机技术，并实用化的是进行多品种加工的机械加工行业。人们研制出了，把数控机床、装卸加工材料的机器人、工具异常的监视器等一体化，以这种一体化的加工单元为基本单位的柔软的加工系统（FMS）。这是以建立生产计划、向工厂各部门下达指令的计算机为中心、由自动仓库、搬运机器人以及许多加工单元所组成的系统。为了提高设备的使用率和生产效率，夜间可以实行无人运转。

材料装卸机器人，不限于机械加工行业，被广泛地利用着。另外，在机器人的手上装上焊接用的焊枪、喷漆用的喷射枪组成的焊接机器人、油漆机器人，也引人注目地活跃。在这些作业中的机器人的特征之一，是对品种变更的适应性。也就是说，事先建立对于多种产品的作业程序，并把它们记忆下来。机器人能针对各个产品选择一定的程序，根据指令驱动手臂，生产多种产品。其中一例是汽车行业的点焊机器人，用这种机器人，可以根据车体的型式改变焊接点的位置。

被期待着在今后工业机器人方面最活跃的是装配行业的机器人。初期的工业机器人多是为了处理较重的对象而研制的，并不面向装配这样的灵巧作业。因而，最近较多地研制了高精度的电动手臂。另外一个十分活跃的研究课题是，“为了进行装配作业，必须有什么样的条件”。研制由各种传感器、微处理器、机器人手臂、装配用工具等综合起来的装配系统，也十分盛行。

检验自动化的必要性很大。零件和产品在目视检查方面的自动化已经落后了。由于造成检验人员疲劳和不合格品漏检等原因，人们希望实现检验机械化。把在智能机器人的基础研究中开发的视觉系统，原封不动地拿来实时处理，做机器人的眼，这对有低价格、高可靠性要求的工业机器人是行不通的。但由于在生产工程中，可以设定机器人眼容易看得见的的环境，还是研制出了不少的实用化的系统。希望今后在使用大规模集成电路技术的视觉专用计算机开发的同时，系统会迅速地提高性能并得以普及。

如上所述，机器人技术成了多品种、小批量自动化生产的核心。现阶段，在性能上还是没有能够完全代替人的动作的，但是具有长时间作业不疲劳、不出次品等优点。希望引起重视的是不仅是提高生产效率，同时也应重视引入机器人时的宗旨：“人要干人的活儿，机械方面的活儿让机器人去干”。在高温、污染、噪音等恶劣环境中的作业、有灾害可能性的危险作业，不是人类应该干的。使人疲劳的重体力劳动，单调的劳动也使工人们越来越不堪忍受了，因此，把这些作业让机器人去干，人类只从事机器人的操作及监视等轻松作业，这已成为社会发展的趋势。

1.4.3 工业用机器人技术

工业用机器人的开发，首先是以实现那种可能实现的简单的重复作业为目标，进行研制的。为了使同一个机器人进行各种各样的作业，提出了可编程序的控制方式，构成了第一代工业用机器人的原型。由于在使用机器人的现场熟悉计算机程序和操作的操作人员不太多，所以采用了独特的机器人作业示教方式 (teaching by doing)。

在使用机器人之前，操作人员让机器人按示教模式进行作业的程序。机器人进行的作业是把手移动到空间的某些点，在那些点上使用手指（或使用工具）进行操作。操作人员使用图1.7的示教盒，向机器人下达指令，使手指移动到给定的位置，并取得给定的姿势，这时，如果送入记忆指令，则按照图1.7所示路径，记忆下机器人的可动部分的位置信息。反复地这样做，则依次记忆下运动途径上各代表点的手的各运动轴的值。还有，手指的开闭，来自外部信号起动以及在各点停留多长时间等这样一些信息也能同时记录在存储器中。

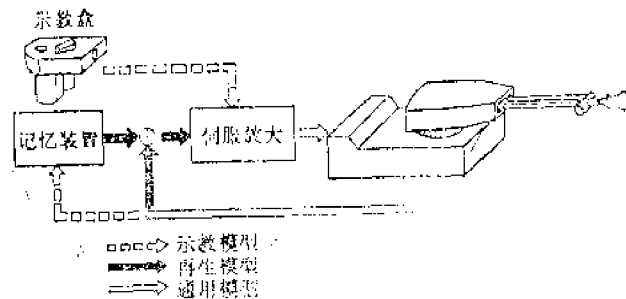


图 1.7 再现控制的信号流

机器人进行作业时，按再现模型进行。一加上外部来的触发信号，机器人就从存储器中读出位置信息，并以此为目标值，去控制系统的动作，按照所编程序驱动手臂进行作业。就这样边再现作业内容边控制，因此被称为playbeck（再现或再生）控制。对于某些不同种类的产品，事先记忆各自的作业程序，只要让机器人知道接下来从外部送来的是什么品种，它就会再现相应于那个品种的程序，所以能用于多品种生产。

这种系统的特征之一，是让机器人边进行实际作业边建立程序。由于操作人员边用肉眼确认边示教，可避免与周围的装置的冲突，并且也不可能下达机器人不能执行的命令。

最近的工业机器人使用如图1.8所示的多关节电动臂的多起来了，并且已经用微处理器控制手臂了。作为第二代工业用机器人，它的特征之一是提高了示教的容易程度。比如，在再现控制的示教模式中，只要在直角坐标系或固定在手指上的坐标系中指定机器人的移动，计算机就会进行坐标变换，算出各轴的角度进行控制（见图1.8）。另外，如电弧焊接那种沿直线的运动，为了对它的作业进行示教，只需指定焊接时的起点和终点，则其途中各点坐标均由计算机算出，这样可以显著地缩短示教的时间。

然而，尽管如此进步，由于以下理由，再现控制往往对复杂的作业不合适（例如，多品种的混合装配工作）。

(1) 视觉 即便是搬运零件的简单作业，如果这些零件不放在一定位置，不取一定的姿势，让再现控制式机器人去干也会失败。这是由于机器人不具有人类那样的视觉的象

故。因此，对分辨不同类型的零件，找出零件的装配位置、确认装配作业的结果、目视检验等视觉的作用是重要的。

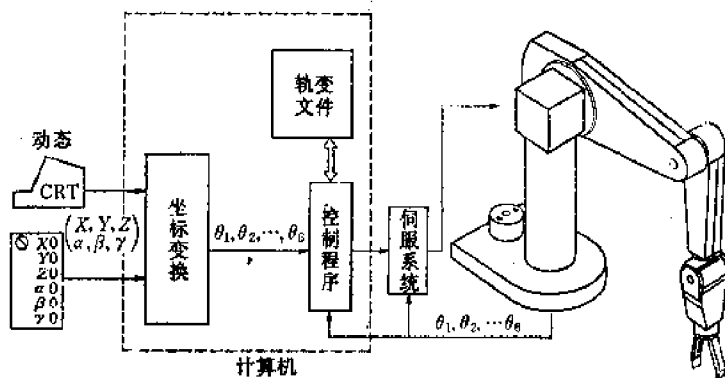


图 1.8 多关节机械手与用微机的再现控制，操作人员可指定直角坐标系和手坐标系

(2) **触觉** 机器人不能像人类那样，以手的接触感来确认物体的位置、姿势。因此，在机器人的作业对象有约束条件时，如装配、曲柄回转、多条手臂的协调动作等，力的感觉会起重要的作用。

(3) **作业程序** 再现控制作业的程序，是用轨迹坐标的集合及指的开闭动作的指令这样一些数据的形式来赋值的。因而不可能适应环境而改变作业内容，记述复杂的装配作业的内容近乎不可能。

解决上述技术上存在的问题的详细论述，在本书的第3~6章中可以找到。其中的一些方法已经在工业机器人上实用化了。只要进一步从基础与应用两方面去研究，一定会制造出下一代工业用机器人。

1.4.4 今后的机器人工程学

现在使用的工业机器人，虽然智力低下，也能充分地进行作业，提高生产率。这是由于机器人的工作环境、工作内容已定型化的缘故。我们期待着，在今后的自动化中的下一代工业机器人能执行用高级的机器人语言记述的多种类的工作。这些机器人将利用传感器的信息，能在某种程度上适应环境和作业对象的变动。但是，其工作环境要为机器人整理完备，并且对于同种产品来说工作是定型的（能事先记述作业程序）。另外，可以从CAD/CAM系统得到关于产品的详细信息。

今后的工业用机器人，被认为不仅应用于工厂的自动化，而且将会应用于更广泛的领域。所以，人们正在争相研究能在更自由的环境中进行作业的智能移动机器人。人们开始进行研究，把农场、山林等自然环境，煤矿、核电站等危险环境，进而把医院、马路等人类社会环境都作为机器人工作的车间。机器人的这种环境不会整理完备，未知部分很多，工作上定型的部分也少，必须每次都建立计划，并且对意想不到的事态，不可缺少实时的适应能力。另外，对于人类社会的习惯、规则，与操作人员以外的人们的对话接口等问题也十分重要。

对这些机器人工程学新内容的研究刚刚开始，解决上述难点的措施也尚未确定。过去

对智能机器人的研究有一种浓烈的色彩:是基于传感器的机器人(Sensor-based robot) (把传感器作为机器人的基础) 人们期待着把这种研究进一步向学术上的机器人工程学的研究推进。

参 考 文 献

- (1) 辻 三郎: "ロボット研究の流れ", ロボット, 白井良明編, pp. 9-16, 共立出版 (昭51).
- (2) 長谷川健介: "産業用ロボットの歴史と現在の動向", 電学誌, 100, 6, pp. 481-485 (昭55-06).
- (3) Gulank, D.G. ed.: "Webster's New Word Dictionary", p. 1231, William Collins+World Publishing (1978).
- (4) 梅谷, 田口: "特殊作業用ロボット", 信学誌, 65, 4, pp. 439-443 (昭57-04).
- (5) 嶋, 小森田: "第3世代ロボット", 計測と制御, 21, 12, pp. 1140-1146 (昭57-12).
- (6) 中野栄二: "福祉用ロボット", 信学誌, 65, 4, pp. 443-449 (昭57-04).
- (7) 戸田, 三橋: "産業用ロボット", 同上, pp. 433-438.
- (8) 木戸出正継: "画像処理用ハードウェア", 情報処理, 21, 6, pp. 620-625 (昭55-06).
- (9) 白井良明: "コンピュータビジョン", 昭晃堂 (昭55).
- (10) Moravec, H.P.: "The Stanford cart and the CMU rover", Proc. IEEE, 71, 7, pp. 872-884 (1983).
- (11) Iijima, J. et al.: "Elementary functions of a self-contained robot Yamabiko 3.1", Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 211-218 (1981).
- (12) 島野 武: "視覚と触覚", 信学誌, 65, 4, pp. 419-425 (昭57-04).
- (13) 花房秀郎: "メカニカルハンドとその制御", 計測と制御, 18, 1, pp. 30-35 (昭54-01).
- (14) 増田良介: "ロボット制御のための触覚技術", 電学誌, 100, 6, pp. 494-495 (昭55-06).
- (15) Harman, L.D.: "Automated tactile sensing", Robotics Res., 1, 2, pp. 3-32 (1982).
- (16) '特集 二足歩行', ロボット学会誌, 1, 3 (昭58-10).
- (17) 広瀬茂男: "移動ロボット技術", 計測と制御, 21, 12, pp. 1129-1134 (昭57-12).
- (18) Feldman, J.A., et al.: "The Stanford hand eye project", Proc. 1st Int. Joint Conf. Artificial Intell., pp. 521-525 (1969).
- (19) "ETL-MKI 特集", 電機研録報, 35, 3 (昭46-03).
- (20) Ejiri, M., et al.: "A prototype intelligent robot that assembles objects from plan drawing", IEEE Trans. Comput., C-21, 2, pp. 161-172 (1972).
- (21) Nilsson, N.J.: "A mobile automaton", Proc. 1st Int. Joint Conf. Artificial Intell., pp. 509-520 (1969).
- (22) Ballard, D.H. and Brown, C.M.: "Computer Vision", Prentice Hall (1982).
- (23) 長谷川, 埜史: "ロボットの感覚", 電学誌, 102, 9, pp. 798-801 (昭57-09).
- (24) Paul, R.C.: "Robot Manipulators; Mathematics, Programming and Control", MIT Press (1981).
- (25) 新井, 中野: "ロボットマニピュレータの新しい制御", 計測と制御, 21, 12, pp. 1095-1101 (昭57-12).
- (26) Nevins, J.L. and Whitney, D.E.: "Robot assembly and its future applications", Computer Vision and Sensor-Based Robot, ed. Dodd, G. and Rossol, L., Plenum Press (1979).
- (27) 後藤達生: "組立てるロボット", 電学誌, 102, 9, pp. 802-805 (昭57-09).
- (28) Lozano-Pérez, T.: "Automatic planning of manipulator transfer movement", IEEE Trans. Syst. Man & Cybern., SMC-11, 10, pp. 681-696 (1981).
- (29) Bonner, S. and Shin, K.G.: "A comparative study of robot languages", Computer, 16, 12, pp. 82-96 (1982).
- (30) Lozano-Pérez, T.: "Robot programming", Proc. IEEE, 71, 7, pp. 821-841 (1983).
- (31) Nevins, J.L. and Whitney, D.E.: "Research on advanced assembly automation", Computer, 10, 12, pp. 24-38 (1977).
- (32) Nevins, J.L. and Whitney, D.E.: "Computer controlled assembly", Sci. Am., 94, 9, pp. 771-772 (1974).

第2章 机器人的机构学

2.1 坐标系与自由度

工业用机器人的臂按其动作、形态可分为如下几类 (JIS B0134)。

(1) 柱坐标机器人 (cylindrical coordinates robot) (图2.1)。

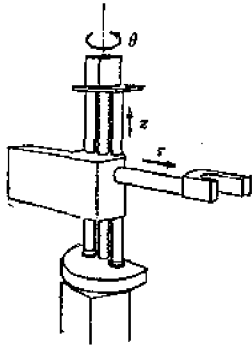


图 2.1 柱坐标机器人

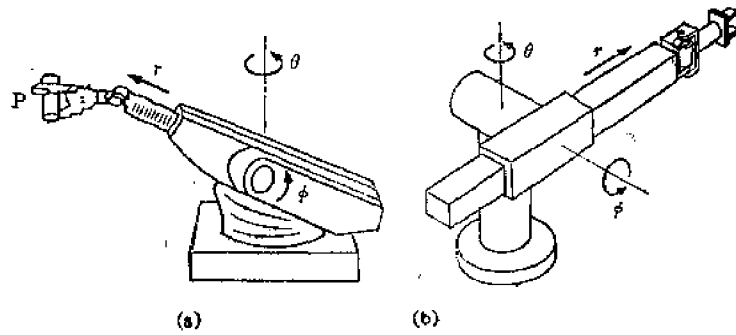


图 2.2 极坐标机器人

(a) 极坐标机器人; (b) 偏置的极坐标机器人。

(2) 极坐标机器人 (Polar coordinates robot) (图2.2)。

(3) 直角坐标机器人 (cartesian coordinates robot) (图2.3)。

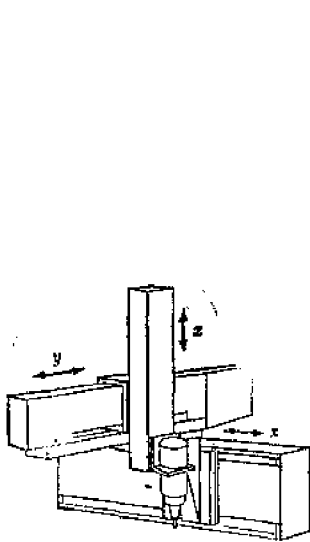


图 2.3 直角坐标机器人

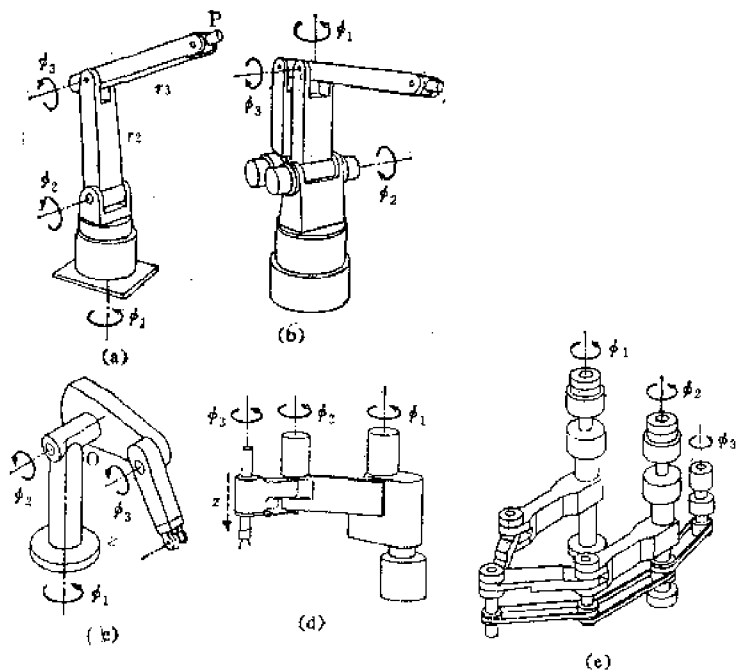


图 2.4 多关节机器人举例

(a)、(c) 曲柄式; (b) 平行曲柄式; (d) 选择适从式装配机器人, 适用于垂直方向零件装配作业; (e) 五连杆式, 刚性好。

(4) 多关节机器人 (articulated robot) (图2.4)。

多关节机器人由于关节的联接方法不同, 有各种各样不同类型的机器人。

这是根据运动采用什么样的坐标形式来分类的。直角坐标机器人的各方向 (X, Y, Z方向) 的运动 (位移、速度、加速度) 是独立的, 也容易计算。另外, 它还有这样的特征: 臂端的位置精度是一个定值, 不随场所改变。柱坐标机器人是由一个回转关节、二个平移运动关节所构成的, 在用油压、空气压力做驱动源时, 它的驱动机构十分简单。另外, 让这种机器人对放置在它周围的机械进行作业时, 使用起来很方便。极坐标机器人有二个回转关节、一个平移运动关节, 与柱坐标机器人一样, 当它采用同样的作业方式时, 也很方便。多关节机器人主要是由回转关节构成的, 在用电动机做驱动源时, 驱动机构可以

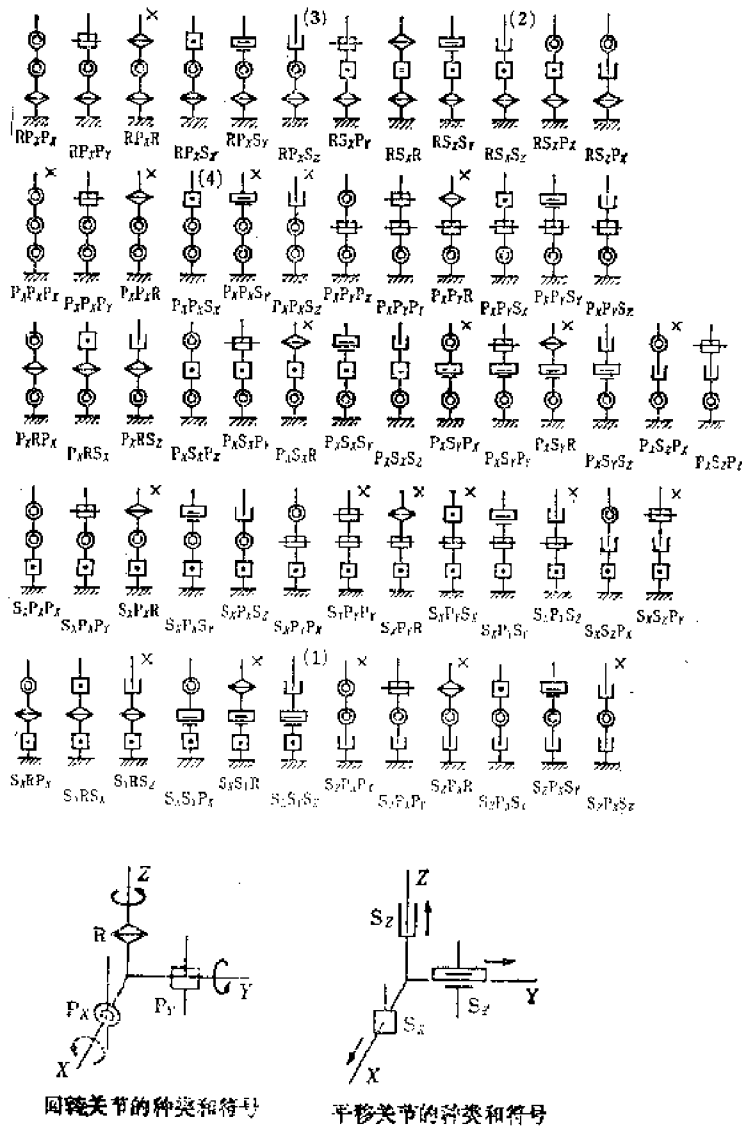


图 2.5 三个自由度的机器人中相邻关节直交或平行且非偏置的情况下关节配置的分类 (35)

(在这些关节组合中, 有的组合, 如 S_xS_y , 即使顺序变化, 机能也相同, 但结构不同)

(1) 直角坐标机器人; (2) 柱坐标机器人; (3) 极坐标机器人; (4) 水平两关节机器人 (SCARA型机器人)。

做得很简单。另外，用不同的方法去联接关节，就能完成各种各样有特色的动作。例如，要伸直手臂去接触物体时，可以向上下曲“肘”或向旁侧曲“肘”去抓住那个物体，也可以通过旋转、伸缩手臂，使臂端达到臂可伸长的范围内的任何一点，从而接触物体。图2.4(d)所示的水平二关节机器人通称SCARA，即选择性适从装配用机器人。它的结构简单，由于可以让臂上下伸缩，所以用于装配作业时，十分方便。已被广泛地使用。

机器人能独立运动的关节（包括回转和平移）的数目，就是该机器人的运动自由度（degree of freedom of motion）。为了使臂端能达到空间的任意位置，至少需要三个自由度。另外，为了使臂端夹持的物体取任意姿势，还要有三个自由度。也就是说，为了得到任意的位姿，机器人必须有六个自由度。这样，就决定了机器人臂的位姿的若干个状态，不能任意改变，但对七个以上自由度的机器人，臂的状态也只有那些多余的自由度可以任意取。例如，人的手臂（不包括手指）有七个自由度，当肩与把持的物体不动时，肘还可以上下活动。

三个自由度的机器人，其臂或者手的关节的种类、运动的取向数目非常多。现在的机器人，相邻的回转关节的回转轴或平移关节的平移方向多为平行的或正交的。在图2.5中列举了非偏置的（代表相邻臂的直线相交或重合成一直线）相邻关节（回转关节、平移关节）的三个自由度的臂的一切组合。图中有×号的，表示只靠这三个自由度不能达到空间任意位置。

将三个自由度的机构两组串联起来就构成六个自由度的机器人。设后三个关节全是回转关节，除掉其中明显不能取任意位姿的组合（例如， $P_x P_x P_x P_x$ 的联接），六个全是回转关节的有123种，五个回转关节一个平移关节的有469种，四个回转关节二个平移关节的有300种，三个回转关节三个平移关节的有17种，合计909种。但是，当然不是说所有这些种类的机器人臂端所夹持的物体都可达到任意位姿。如果允许相邻关节间偏置，如图2.2(b)、图2.4(c)所示，上述的种类还要增加。对于这样庞大的关节结构，决定用几个自由度，选择什么样的种类，都要根据机器人的作业要求、作业范围及驱动机构和传动机构的复杂程度而定。

一般地，如果臂已具有定位机能，那么手腕的作用，是使臂端定位了的物体在进行位置补偿的同时取得一定的姿势。有六个关节的机器人，对回转关节和平移关节，不论采取什么样的排列顺序，原理上都可以得到任意的位姿，但如果从作业的难易程度考虑，还是希望手腕的三个关节都是回转关节。还有，对那种让物体绕着某个轴旋转的作业，最后的关节要末选择R，要末让手在P轴的延长线上，这样回转作业就不会影响臂的位姿。人类的手腕有三个自由度 $RP_x P_y$ ，因此在回转作业时，不得不挪动手腕的位置，稍稍有些不方便。

2.2 机器人的运动学和力学分析

从各关节（包括回转关节和平移关节）的位移求机器人的手所把持物体的位姿将是什么样，叫做解析（analysis）。相反，讨论为了达到某种位姿，关节要有多大的位移才行，叫做综合（Synthesis）。

解析的方法有各种各样，但利用如下的坐标变换矩阵比较方便。

2.2.1 坐标变换矩阵⁽¹⁾

图2.6中有一静止坐标系 Σ_0 ，有一以 O_1 为原点的绕 Z 轴回转的动坐标系 Σ_1 。此时， Σ_1 上的 P 点位置矢量 $r^{(1)}$ ，在 Σ_0 中看上去为矢量 $r^{(0)}$ ，两者之间有如下变换。

$$\begin{bmatrix} r^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & l_x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & l_y \\ 0 & 0 & 1 & l_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} r^{(1)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

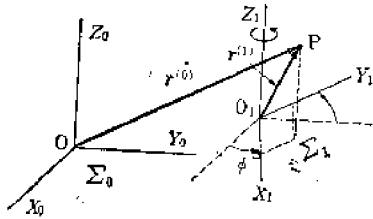


图 2.6 由于绕 Z_1 轴回转引起位置坐标的变化

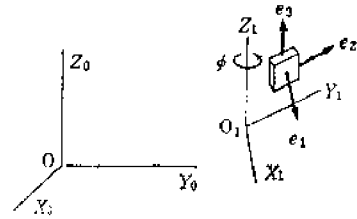


图 2.7 由于绕 Z_1 轴回转引起姿势的变化

这个 4×4 的矩阵叫做坐标变换矩阵。 A_1 中的首部 3×3 的矩阵，表示 Σ_1 到 Σ_0 的姿势变换，如图2.7所示。也就是把在 Σ_1 坐标系中表示的姿势矢量 $(e_1^{(1)}, e_2^{(1)}, e_3^{(1)})$ 在 Σ_0 坐标系中表示，则经过变换，得到

$$\begin{aligned} (e_1^{(0)}, e_2^{(0)}, e_3^{(0)}) &= \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (e_1^{(1)}, e_2^{(1)}, e_3^{(1)}) \\ &= C_1(e_1^{(1)}, e_2^{(1)}, e_3^{(1)}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

如果动坐标绕 X 轴旋转或绕 Y 轴旋转，则分别表示为

$$C_1 = C_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad C_1 = C_Y = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

则 A_1 表示为

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & l_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.2 机器人的位置姿势的解析

在有 n 个自由度的机器人的各关节与臂上取坐标系，如图2.8所示。设从 Σ_k 坐标系向 Σ_{k-1} 坐标系变换的坐标变换矩阵为 A_k 。第 n 个臂端 P 点的位置坐标在 Σ_0 坐标系中表示为

$r^{(n)}$ ，而在 Σ_0 坐标系中表示为 $r^{(0)}$ ，把位置坐标从 Σ_n 向 Σ_{n-1} ，从 Σ_{n-1} 向 Σ_{n-2} ... 逐次变换，则

$$\begin{bmatrix} r^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 \cdots A_n \begin{bmatrix} r^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

的关系成立。另外，设物体的姿势由在 Σ_n 中表示向在 Σ_0 中表示变换为：

$$A_k = \begin{bmatrix} C_k & & & L_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2.6)$$

则，

$$(e_1^{(0)}, e_2^{(0)}, e_3^{(0)}) = C_1 C_2 \cdots C_n (e_1^{(n)}, e_2^{(n)}, e_3^{(n)}) \quad (2.7)$$

[注1] 姿势矢量 (e_1, e_2, e_3) 代表正交的三个单位矢量。这时无论在什么样的坐标系中表示，都是 $e_1 \times e_2 = e_3$ ，式 (2.7) 中的第三项 e_3 的变换没有必要计算。

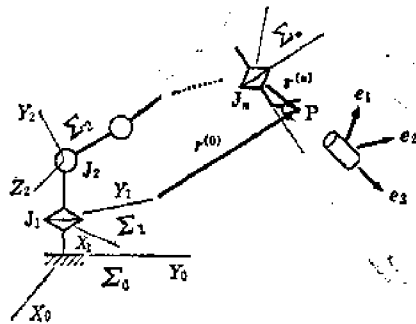


图 2.8 由机器人的关节位移来表示位置姿势

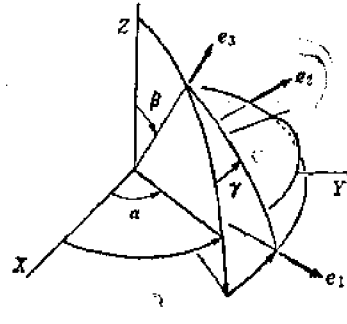


图 2.9 用欧拉角表示姿势

[注2] (e_1, e_2, e_3) 虽有九个成分，但从关系 $e_1 \times e_2 = e_3$ ， $|e_1|^2 = |e_2|^2 = 1$ (e_1, e_2) = 0 中可知，独立的参数是三个。作为表示姿势的三个参量，常常使用欧拉角 (Euler)，欧拉角如图 2.9 所示，这时倾斜坐标系的姿势矢量如下式：

$$(e_1, e_2, e_3) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma, & -\cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma, & \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma, & -\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma, & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta \cos \gamma, & \sin \beta \sin \gamma, & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Σ_k 坐标系如图 2.10 所示。以第 k 个关节为原点，并且将坐标系固定在第 k 个臂上，这样取动坐标系是很方便的。另外，我们约定如果第 k 个关节是回转关节，则取回转轴为 Σ_k 的 Z 轴，如果是平移关节，则取平移方向为 Σ_k 的 X 轴。假设当关节位移 $\phi_k = 0$ 时的坐标系 Σ_k 向 Σ_{k-1} 变换的坐标变换矩阵为 $A_{k,k}$ ，把只有 ϕ_k 变动的动坐标系 Σ_k 向 $\phi_k = 0$ 时的坐标系 Σ_k 的变换矩阵设为 $A_{k,k}$ ，则从 Σ_k 向 Σ_{k-1} 变换的矩阵为

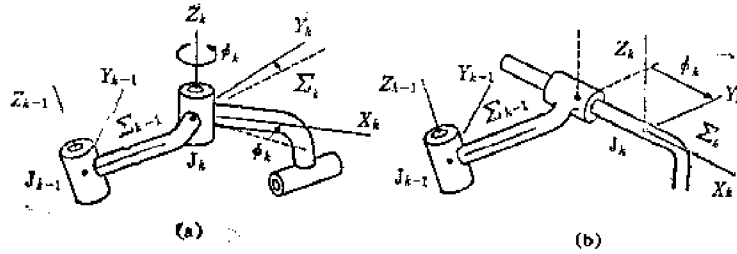


图 2.10 固定在第 k 个臂和关节上的坐标系的取法
(a) 回转关节; (b) 平移关节。

$$A_k = A_{sk} A_{dk} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2.9)$$

这里,

$$A_{sk} = \begin{bmatrix} C_{sk} & I_k \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad = \begin{bmatrix} e_1^{(k-1)}, e_2^{(k-1)}, e_3^{(k-1)} & I_k^{(k-1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

式中, $I_k^{(k-1)}$ 是从 Σ_{k-1} 看到的 Σ_k 的原点 (J_k) 的位置矢量, C_{sk} 是 $\phi_k = 0$ 时 Σ_k 的 X, Y, Z 轴的方向矢量在 Σ_{k-1} 中的表示。

另外, 如为回转关节时, A_{dk} 为

$$A_{dk} = A_z(\phi_k) = \begin{bmatrix} \cos \phi_k & -\sin \phi_k & 0 & 0 \\ \sin \phi_k & \cos \phi_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

如为平移关节时, 则 A_{dk} 为

$$A_{dk} = A_{Tx}(\phi_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \phi_k \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

把这样表示的 A_k 代入式 (2.5)、(2.7), 手的考察点 P 的位置和物体的姿势, 表现为 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ 的函数, 可以计算出来。

还有各关节的位置矢量 $\overrightarrow{OJ_k}$ 为

$$\begin{bmatrix} \overrightarrow{OJ_k} \\ 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 \dots A_k \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2.3 机器人的速度、加速度的解析

手所夹持的物体的速度、加速度在静止坐标系 Σ_0 中表示为 $v^{(0)}, a^{(0)}$, 可由式 (2.5) 对时间微分得到, 速度为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n A_1 A_2 \cdots \dot{A}_k \cdots A_n \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中,

$$\dot{A}_k = \frac{dA_k}{d\phi_k} \dot{\phi}_k = A_{sk} \frac{dA_{sk}}{d\phi_k} \dot{\phi}_k \quad (2.15)$$

$$\frac{dA_{sk}}{d\phi_k} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_k & -\cos \phi_k & 0 & 0 \\ \cos \phi_k & -\sin \phi_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{(回转关节时)} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{(平移关节时)} \\ \\ \\ \end{array} \right\}$$

加速度为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n A_1 A_2 \cdots A_k \cdots A_n \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n A_1 \cdots \dot{A}_k \cdots \dot{A}_l \cdots A_n \begin{bmatrix} \mathbf{r}^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

其中,

$$\ddot{A}_k = \frac{dA_k}{d\phi_k} \ddot{\phi}_k + \frac{d^2 A_k}{d\phi_k^2} \dot{\phi}_k^2 = A_{sk} \left\{ \frac{dA_{sk}}{d\phi_k} \ddot{\phi}_k + \frac{d^2 A_{sk}}{d\phi_k^2} \dot{\phi}_k^2 \right\} \quad (2.18)$$

$$\frac{d^2 A_{sk}}{d\phi_k^2} = \begin{bmatrix} -\cos \phi_k & \sin \phi_k & 0 & 0 \\ -\sin \phi_k & -\cos \phi_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{(回转关节时)} \\ \\ \\ \end{array} \right\}$$

$$= [0] \quad \left. \begin{array}{l} \text{(平移关节时)} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad (2.19)$$

这些计算中,是在进行对时间的微分后,再进行矩阵运算的,但在人手工计算时,可把式(2.5)先进行矩阵运算,然后再进行微分运算,这种算法较容易。自由度 n 大时,无论那种算法,计算量都很大,不借助电子计算机就计算不了。

求中间臂上的一点,例如重心的速度、加速度时,可用如下求法。设第 m 个臂的重心位置 G_m 在 Σ_m 中表现为 $r_{G_m}^{(m)}$,在 Σ_0 中表现为 $r_{G_m}^{(0)}$,如图2.11所示,则:

$$\begin{bmatrix} v_{G_m}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{r}_{G_m}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^m A_1 \cdots A_k \cdots A_m \begin{bmatrix} r_{G_m}^{(m)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} a_{G_m}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{r}_{G_m}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^m A_1 \cdots \ddot{A}_k \cdots A_m \begin{bmatrix} r_{G_m}^{(m)} \\ 1 \end{bmatrix} + 2 \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m A_1 \cdots \ddot{A}_k \cdots \dot{A}_l \cdots A_m \begin{bmatrix} r_{G_m}^{(m)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

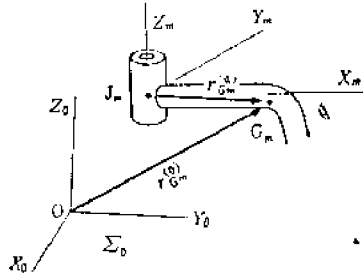


图 2.11 第 m 个臂的重心 G_m 的位置矢量

2.2.4 机器人的角速度、角加速度的解析

手所夹持的物体的角速度 ω 是所有回转角关节的角速度 $\dot{\phi}_k$ 的矢量和。在以下的计算中，关于时间的微分项，全是回转关节的，已除去平移关节。由于选择了回转关节的回转轴为 Z 轴，所以关节 J_k 的角速度矢量在 Σ_k 坐标系中表示为 $\dot{\phi}_k^{(k)} = (0, 0, \dot{\phi}_k)^T$ ，如图 2.12 所示。 $\dot{\phi}_k^{(k)}$ 在静止坐标系中表示为 $\dot{\phi}_k^{(0)}$ ，与姿势矢量变换时一样：

$$\dot{\phi}_k^{(0)} = C_1 C_2 \cdots C_k \dot{\phi}_k^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2.22)$$

因此，手的角速度在 Σ_0 中表示为 $\omega^{(0)}$ ，则

$$\omega^{(0)} = \sum_{k=1}^n \dot{\phi}_k^{(0)} = \sum_{k=1}^n C_1 C_2 \cdots C_k \dot{\phi}_k^{(k)} \quad (2.23)$$

或者，在手所固定的坐标系 Σ_n 中，角速度表示为

$$\omega^{(n)} = (C_1 C_2 \cdots C_n)^{-1} \omega^{(0)} = \sum_{k=1}^{n-1} (C_{k+1} \cdots C_n)^{-1} \dot{\phi}_k^{(k)} + \dot{\phi}_n^{(n)} \quad (2.24)$$

手的角加速度 a 是式 (2.23) 和式 (2.24) 对时间的微分，在 Σ_0 中表示为

$$\dot{\omega}^{(0)} = \ddot{\omega}^{(0)} = \sum_{k=1}^n C_1 C_2 \cdots C_k \ddot{\phi}_k^{(k)} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^k C_1 \cdots C_l \cdots C_k \dot{\phi}_k^{(k)} \quad (2.25)$$

在 Σ_n 中表示为

$$\begin{aligned} \dot{\omega}^{(n)} = \ddot{\omega}^{(n)} &= \sum_{k=1}^{n-1} (C_{k+1} \cdots C_n)^{-1} \ddot{\phi}_k^{(k)} + \ddot{\phi}_n^{(n)} \\ &+ \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n (C_{k+1} \cdots \dot{C}_l \cdots C_n)^{-1} \dot{\phi}_k^{(k)} \end{aligned} \quad (2.26)$$

另外，第 m 个臂的角加速度在 Σ_m 中表示为 $a_{G_m}^{(m)}$ ，山下式求出：

$$\begin{aligned} a_{Gm}^{(m)} &= \sum_{k=1}^{m-1} (C_{k+1} \dots C_m)^{-1} \ddot{\phi}_k^{(k)} + \ddot{\phi}_m^{(m)} \\ &+ \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m (C_{k+1} \dots C_l \dots C_m)^{-1} \dot{\phi}_k^{(k)} \end{aligned} \quad (2.27)$$

这里,

$$\dot{C}_k = C_{s1} \dot{C}_{sk} = C_{s1} \begin{bmatrix} -\sin \phi_k & -\cos \phi_k & 0 \\ \cos \phi_k & -\sin \phi_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\phi}_k \quad (2.28)$$

其中, C_{sk} 是式 (2.10) 中 3×3 矩阵。

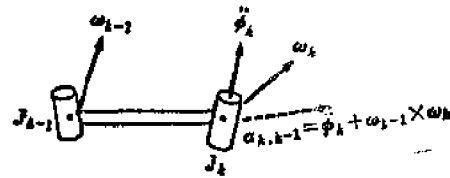
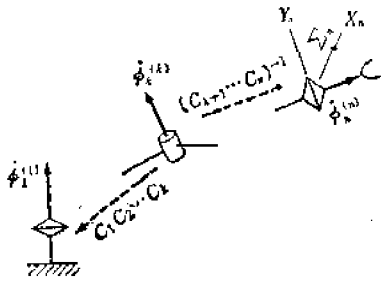


图 2.12 关节的角速度矢量在 Σ_1 和 Σ_n 中的表示 图 2.13 相对于 J_{k-1} 的 J_k 的相对角加速度 ω_{k-1} , ω 是合成角速度

$a^{(0)}$ 也可以通过式 (2.25) 求比, 如下式:

$$a^{(0)} = \ddot{\phi}_1^{(0)} + \sum_{k=2}^n \left\{ \ddot{\phi}_k^{(0)} + \left(\sum_{l=1}^{k-1} \dot{\phi}_l^{(0)} \right) \times \dot{\phi}_k^{(0)} \right\} \quad (2.29)$$

式中, $\ddot{\phi}_k^{(0)}$ 是从 J_{k-1} 看到的 J_k 关节的回转加速度, $\sum_{l=1}^{k-1} \dot{\phi}_l^{(0)}$ 是在 J_{k-1} 关节合成的角度

$\omega_{k-1}^{(0)}$, 而从 J_{k-1} 看到的 J_k 的相对角加速度 $\alpha_{k,k-1}^{(0)}$ 为 $\alpha_{k,k-1}^{(0)} = \ddot{\phi}_k^{(0)} + \omega_{k-1}^{(0)} \times \dot{\phi}_k^{(0)}$ 所有的 $\alpha_{k-1}^{(0)}$ 之和就意味着手的加速度, 如图 2.13 所示。

2.2.5 机器人的静力学解析

当手的 P 点上作用着力 F_w 和力矩 M_w 时, 求加在各关节上的力和力矩。设外力矢量与外力矩在静止坐标系中表示为 $F_w^{(0)}$, $M_w^{(0)}$, 关节 J_k 上的力和力矩在 Σ_k 中表示为 $F_w^{(k)}$, $M_w^{(k)}$, 如图 2.14 所示, 则,

$$F_w^{(k)} = (C_1 C_2 \dots C_k)^{-1} F_w^{(0)} \quad (2.30)$$

$$M_w^{(k)} = r_{wk}^{(k)} \times F_w^{(k)} + (C_1 C_2 \dots C_k)^{-1} M_w^{(0)} \quad (2.31)$$

($k=1, 2, \dots, n$)

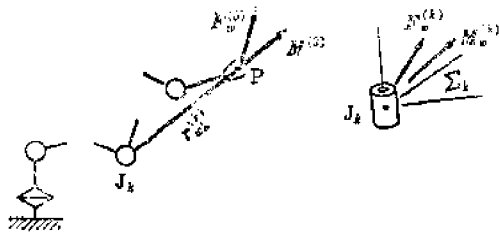


图 2.14 把在P点施加的力和力矩向关节 J_k 换算

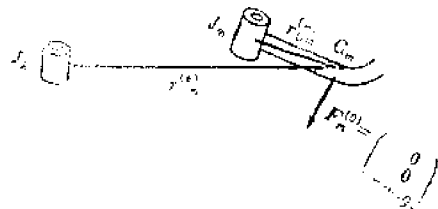


图 2.15 第 m 个臂的重力对第 k 个关节的影响

这里着力点的位置矢量 $\mathbf{r}_{Pw}^{(k)}$ 是 $J_k P$ 在 Σ_k 中的表示, 如果设 P 点在 Σ_n 中表示的位置矢 $\mathbf{r}_w^{(n)}$ 则,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Pw}^{(k)} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{k+1} A_{k+2} \cdots A_n \begin{bmatrix} \mathbf{r}_w^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

另外, 如果计入臂的自重的话, 如图2.15所示设第 m 个臂的重心 G_m 的位置矢量在 Σ_n 中表示为 $\mathbf{r}_{Gm}^{(n)}$, 设质量为 m_m , 则对第 k 个关节 ($R \leq m$) 的影响为

$$\mathbf{F}_{m,k}^{(k)} = (C_1 C_2 \cdots C_k)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_m g \end{bmatrix} = (C_1 C_2 \cdots C_k)^{-1} \mathbf{F}_m^{(0)} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{M}_{m,k}^{(k)} = \mathbf{r}_{Gm}^{(k)} \times \mathbf{F}_{m,k}^{(k)} \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Gm}^{(k)} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{k+1} A_{k+2} \cdots A_m \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Gm}^{(m)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$(k=1, 2, \dots, m-1)$$

而加在关节 J_k 上的力 \mathbf{F}_{Jk} 和力矩 \mathbf{M}_{Jk} 是由加在手上那点的外力、外力矩和第 k 个臂前面的所有臂的自重加起来的, 由下式可求出:

$$\mathbf{F}_{Jk}^{(k)} = \mathbf{F}_w^{(k)} + \sum_{m=k}^n \mathbf{F}_{m,k}^{(k)} \quad (2.36)$$

$$\mathbf{M}_{Jk}^{(k)} = \mathbf{M}_w^{(k)} + \sum_{m=k}^n \mathbf{M}_{m,k}^{(k)} \quad (2.37)$$

$$(k=1, 2, \dots, n)$$

在这种力和力矩中, 如果是回转关节, $\mathbf{M}_{Jk}^{(k)}$ 的 Z 成分; 如果是平移关节, $\mathbf{F}_{Jk}^{(k)}$ 的 X 成分均影响关节的位移方向, 其相反符号的值为驱动关节的必要扭矩(力)。

如果只求驱动关节所必要的力(力矩)的话, 则可更简单地用虚功原理求出, 设第 k 个关节的驱动扭矩(力)为 M_k (F_k), 则回转关节时, 可得出:

$$M_k = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_w^{(0)}}{\partial \phi_k}, -\mathbf{F}_w^{(0)} \right) + \left(\frac{\partial \boldsymbol{\omega}^{(0)}}{\partial \phi_k}, -\mathbf{M}_w^{(0)} \right) + \sum_{m=k}^n \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{Gm}^{(0)}}{\partial \phi_k}, -\mathbf{F}_m^{(0)} \right) \quad (2.38)$$

而平移关节时, 可得出:

$$F_k = \left(\frac{\partial \mathbf{r}_w^{(0)}}{\partial \phi_k}, -\mathbf{F}_w^{(0)} \right) + \sum_{m=k}^n \left(\frac{\partial \mathbf{r}_{G_m}^{(0)}}{\partial \phi_k}, -\mathbf{F}_m^{(0)} \right) \quad (2.39)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial \mathbf{r}_w^{(0)}}{\partial \phi_k} \right] &= [A_1 A_2 \dots \frac{\partial A_k}{\partial \phi_k} \dots A_n] \begin{bmatrix} \mathbf{r}_w^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix} \\ \left[\frac{\partial \mathbf{r}_{G_m}^{(0)}}{\partial \phi_k} \right] &= [A_1 A_2 \dots \frac{\partial A_k}{\partial \phi_k} \dots A_m] \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{G_m}^{(m)} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

$\omega^{(0)}$ 在式 (2.23) 中已表达过了。

[注] 在用手拧紧螺钉等作业的例子中, 若认为外力只是拧紧力矩 $M_w^{(0)}$ 是不正确的。为了固定螺钉的位置, 手也要受到来自螺钉的某种力 (反作用)。这个力 $\mathbf{F}_w^{(0)}$ 和 $M_w^{(0)}$ 就被叫做外力。由 $M_w^{(0)}$ 去求 $\mathbf{F}_w^{(0)}$ 的计算, 是材料力学中所谓的静不定结构, 由于复杂, 在此省略。

2.2.6 机器人的动力学解析⁽²⁾

设手上夹持的物体的质量为 m_w , 它关于 Σ_n 坐标系的重心旋转的惯性张量为 $[I]$, 则物体的惯性力在 Σ_n 中表示为

$$\mathbf{F}_{dw}^{(n)} = -m_w \mathbf{a}^{(n)} \quad (2.41)$$

参照图 2.16, 惯性力矩在 Σ_n 中表示为

$$\mathbf{M}_{dw}^{(n)} = -[I] \mathbf{a}^{(n)} - \omega^{(n)} \times [I] \omega^{(n)} \quad (2.42)$$

$\mathbf{a}^{(n)}$ 是物体重心的加速度, 见式 (2.17), $\omega^{(n)}$ 、 $\mathbf{a}^{(n)}$ 分别见式 (2.24)、式 (2.26)。

动态力矩给予关节 J_k 的影响与静止时情况相同,

$$\mathbf{F}_{dw}^{(k)} = (C_1 C_2 \dots C_k)^{-1} \mathbf{F}_{dw}^{(n)} \quad (2.43)$$

$$\mathbf{M}_{dw}^{(k)} = \mathbf{r}_{wk}^{(k)} \times \mathbf{F}_{dw}^{(k)} + C_{k+1} C_{k+2} \dots C_n \mathbf{M}_{dw}^{(n)} \quad (2.44)$$

这里, $\mathbf{r}_{wk}^{(k)}$ 为物体重心位置在 Σ_k 中的表示, 见式 (2.32)。

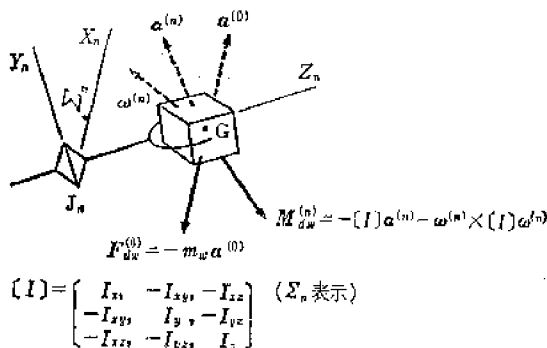
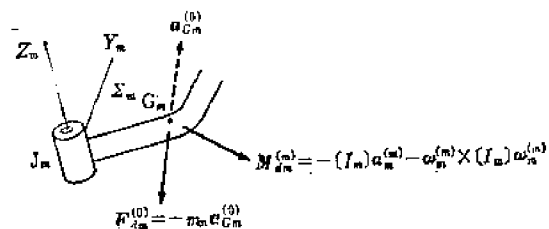


图 2.16 物体上的动态力和动态力矩



[I]_m: 惯性张量在 Σ_m 中的表示

图 2.17 第 m 个臂的动态力和动态力矩

如果也考虑臂的惯性，设关节 J_k 前端的第 m 个臂的重心加速度为 $\mathbf{a}_{cm}^{(0)}$ ，角速度与角加速度为 $\boldsymbol{\omega}_m^{(m)}$ ， $\boldsymbol{\alpha}_m^{(m)}$ ，臂的质量为 m_m ，关于 Σ_m 坐标轴的重心旋转的惯性张量，如图2.17所示，是

$$\mathbf{F}_{dm}^{(0)} = -m_m \mathbf{a}_{cm}^{(0)} \quad (2.45)$$

$$\mathbf{M}_{dm}^{(0)} = -[I_m] \boldsymbol{\alpha}_m^{(m)} - \boldsymbol{\omega}_m^{(m)} \times [I_m] \boldsymbol{\omega}_m^{(m)} \quad (2.46)$$

它们对 J_k 关节的影响，与在 Σ_k 中表示的式(2.30)、式(2.31)一样，为

$$\mathbf{F}_{dm,k}^{(k)} = (C_1 C_2 \cdots C_k)^{-1} \mathbf{F}_{dm}^{(0)} \quad (2.47)$$

$$\mathbf{M}_{dm,k}^{(k)} = \mathbf{r}_{cm}^{(k)} \times \mathbf{F}_{dm,k}^{(k)} + [C_{k+1} C_{k+2} \cdots C_m] \mathbf{M}_{dm}^{(m)} \quad (2.48)$$

而臂与物体的动态力对关节 J_k 的影响为

$$\mathbf{F}_{dJ,k}^{(k)} = \mathbf{F}_{d\omega}^{(k)} + \sum_{m=k}^n \mathbf{F}_{dm,k}^{(k)} \quad (2.49)$$

$$\mathbf{M}_{dJ,k}^{(k)} = \mathbf{M}_{d\omega}^{(k)} + \sum_{m=k}^n \mathbf{M}_{dm,k}^{(k)} \quad (2.50)$$

与静态力的情况相同，如果是回转关节， $\mathbf{M}_{dJ,k}^{(k)}$ 的 Z 成分；如果是平移关节， $\mathbf{F}_{dJ,k}^{(k)}$ 的 X 成分，其相反符号的值为 J_k 的必要的驱动力。

如果只求关节必要的驱动力，只需用拉格朗日方程式(Lagrange)或虚功原理，就可以很方便的求出。用虚功原理求出关节上必要的驱动力(力矩)去克服手所夹持的物体上的动态力而产生运动，与静态力的解析方法一样。

当 J_k 是回转关节时，得

$$M_k = \left(\frac{\partial \mathbf{v}^{(0)}}{\partial \dot{\phi}_k}, m_w \mathbf{a}^{(0)} \right) + \left(\frac{\partial \boldsymbol{\omega}^{(n)}}{\partial \dot{\phi}_k}, [I] \boldsymbol{\alpha}^{(n)} + \boldsymbol{\omega}^{(n)} \times [I] \boldsymbol{\omega}^{(n)} \right) \quad (2.51)$$

当 J_k 是平移关节时，得

$$\mathbf{F}_k = \left(\frac{\partial \mathbf{v}^{(0)}}{\partial \dot{\phi}_k}, m_w \mathbf{a}^{(0)} \right) \quad (2.52)$$

式中的 $\partial \mathbf{v}^{(0)} / \partial \dot{\phi}_k = \partial \mathbf{r}_w^{(0)} / \partial \dot{\phi}_k$ 已在式(2.40)中表示过。

从 $\boldsymbol{\alpha}^{(0)}$ 、 $\boldsymbol{\omega}^{(n)}$ 、 $\mathbf{a}^{(0)}$ 的表示可知，当设 $\mathbf{M} = (M_1, M_2, \dots, M_n)^T$ ， $\boldsymbol{\phi} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)^T$ 时，机器人的运动方程式可表示为

$$\mathbf{M} = [E_1(\boldsymbol{\phi})] \ddot{\boldsymbol{\phi}} + [E_2(\boldsymbol{\phi}, \dot{\boldsymbol{\phi}})]$$

$[E_1]$ 为 $n \times n$ 阶矩阵，是 $\boldsymbol{\phi}$ 的函数。也就是说，“惯性项”随 $\boldsymbol{\phi}$ 而改变。另外， $[E_2]$ 为 $1 \times n$ 阶矩阵，是对“离心力”的平衡力项。所表现的这种非线性的形式，正是机器人运动的特征，也是造成解析和控制方式困难的一大原因。

举例 三自由度多关节机器人。

图2.18所示的多关节机器人，用上述计算公式可求出它的位置姿势、速度、加速度，加在关节上的必要的静力矩和动态驱动力矩。其中，设 $\phi_1 = \omega_1$ 、 $\phi_2 = \omega_2$ 、 $\phi_3 = \omega_3$ 、 $\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_3 = 0$ 。

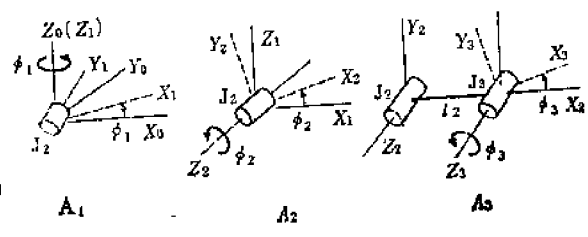
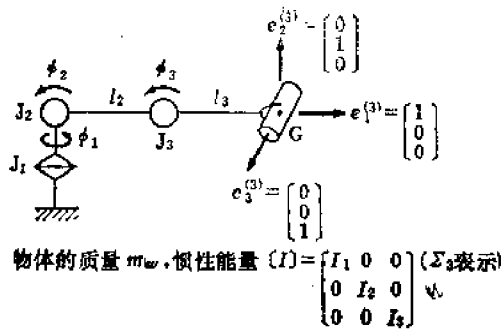


图 2.18 三个自由度的多关节机器人

图 2.19 坐标变换矩阵的取法

取如图2.19所示动坐标系 Σ_1 、 Σ_2 、 Σ_3 ，则坐标变换矩阵为

$$A_k = A_{3k} A_{k1}(\phi_k) \quad (k=1, 2, 3) \quad (2.53)$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$A_{kk}(\phi_k) = \begin{bmatrix} \cos \phi_k & -\sin \phi_k & 0 & 0 \\ \sin \phi_k & \cos \phi_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad r_G^{(n)} = \begin{bmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

在以下的计算中，把 $\cos \phi_k$ 、 $\sin \phi_k$ 简写成 $c\phi_k$ 、 $s\phi_k$ 。

物体重心的位置：

$$\begin{bmatrix} r_G^{(0)} \\ 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 \begin{bmatrix} r_G^{(n)} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi_1 c(\phi_2 + \phi_3) & -c\phi_1 s(\phi_2 + \phi_3) & s\phi_1 & l_2 c\phi_1 c\phi_2 \\ s\phi_1 c(\phi_2 + \phi_3) & -s\phi_1 s(\phi_2 + \phi_3) & -c\phi_1 & l_2 s\phi_1 c\phi_2 \\ s(\phi_2 + \phi_3) & c(\phi_2 + \phi_3) & 0 & l_2 s\phi_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) c\phi_1 \\ (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) s\phi_1 \\ l_2 s\phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3) \\ \hline 1 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

物体的姿势:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{e}_1^{(0)}, \mathbf{e}_2^{(0)}, \mathbf{e}_3^{(0)}) &= C_1 C_2 C_3 (\mathbf{e}_1^{(3)}, \mathbf{e}_2^{(3)}, \mathbf{e}_3^{(3)}) = C_1 C_2 C_3 [\mathbf{I}] \\
 &= C_1 C_2 C_3 = \begin{bmatrix} c\phi_1 c(\phi_2 + \phi_3), & -c\phi_1 s(\phi_2 + \phi_3), & s\phi_1 \\ s\phi_1 c(\phi_2 + \phi_3), & -s\phi_1 s(\phi_2 + \phi_3), & -c\phi_1 \\ s(\phi_2 + \phi_3), & c(\phi_2 + \phi_3) & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

这种多关节的机器人中, $\mathbf{e}_3^{(0)}$ 往往垂直于 Z 轴。物体重心的速度:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \mathbf{v}_C^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_C^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \left\{ \frac{dA_1}{d\phi_1} A_2 A_3 \dot{\phi}_1 + A_1 \frac{dA_2}{d\phi_2} A_3 \dot{\phi}_2 + A_1 A_2 \frac{dA_3}{d\phi_3} \dot{\phi}_3 \right\} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_C^{(3)} \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -(l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) s\phi_1 \\ (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) c\phi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_1 \\
 &\quad + \begin{bmatrix} -(l_2 s\phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3)) c\phi_1 \\ -(l_2 s\phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3)) s\phi_1 \\ l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_2 \\
 &\quad + \begin{bmatrix} -l_3 s(\phi_2 + \phi_3) c\phi_1 \\ -l_3 s(\phi_2 + \phi_3) s\phi_1 \\ l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_3
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

物体重心的加速度:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \mathbf{a}_C^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}}_C^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= - \begin{bmatrix} (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) c\phi_1 \\ (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) s\phi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_1^2 - \begin{bmatrix} (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) c\phi_1 \\ (l_2 c\phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3)) s\phi_1 \\ (l_2 s\phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3)) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_2^2 \\
 &\quad - \begin{bmatrix} l_3 c(\phi_2 + \phi_3) c\phi_1 \\ l_3 c(\phi_2 + \phi_3) s\phi_1 \\ l_3 s(\phi_2 + \phi_3) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_3^2 + 2 \begin{bmatrix} (l_2 s\phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3)) s\phi_1 \\ -(l_2 s\phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3)) c\phi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\
 &\quad - 2 \begin{bmatrix} l_3 c\phi_1 c(\phi_2 + \phi_3) \\ l_3 s\phi_1 c(\phi_2 + \phi_3) \\ l_3 s(\phi_2 + \phi_3) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_2 \omega_3 + 2 \begin{bmatrix} l_3 s(\phi_2 + \phi_3) s\phi_1 \\ -l_3 s(\phi_2 + \phi_3) c\phi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_3 \omega_1
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

物体的角速度:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}^{(3)} &= (C_2 C_3)^{-1} \dot{\phi}_1^{(1)} + C_3^{-1} \dot{\phi}_2^{(2)} + \dot{\phi}_3 \\ &= \begin{bmatrix} s(\phi_2 + \phi_3) \\ c(\phi_2 + \phi_3) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\omega_2 + \omega_3)\end{aligned}\quad (2.60)$$

物体的角加速度:

$$\boldsymbol{\alpha}^{(3)} = \dot{\boldsymbol{\omega}}^{(3)} = \begin{bmatrix} c(\phi_2 + \phi_3) \\ -s(\phi_2 + \phi_3) \\ 0 \end{bmatrix} \omega_1 (\omega_2 + \omega_3)\quad (2.61)$$

支持物体重量的必要的驱动力矩:

当外力为 $\mathbf{F}_w^{(0)} = (0, 0, -m_w g)^T$, 而 $\partial \dot{r}_G^{(0)} / \partial \dot{\phi}_1$, $\partial \dot{r}_G^{(0)} / \partial \dot{\phi}_2$, ... 是式 (2.58) 中的 ω_1 , ω_2 , ω_3 的系数时, 由式 (2.38) 得

$$\left. \begin{aligned}M_1 &= \left(\frac{\partial \dot{r}_G^{(0)}}{\partial \dot{\phi}_1}, -\mathbf{F}_w^{(0)} \right) = 0 \\ M_2 &= \left(\frac{\partial \dot{r}_G^{(0)}}{\partial \dot{\phi}_2}, -\mathbf{F}_w^{(0)} \right) = \{ l_2 c \phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \} m_w g, \\ M_3 &= \left(\frac{\partial \dot{r}_G^{(0)}}{\partial \dot{\phi}_3}, -\mathbf{F}_w^{(0)} \right) = l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \cdot m_w g\end{aligned}\right\} (2.62)$$

维持物体运动的必要的驱动力矩为

$$\left. \begin{aligned}\mathbf{F}_{dw}^{(0)} &= -m_w \boldsymbol{\alpha}^{(0)} \\ \mathbf{M}_{dw}^{(3)} &= -\{ [I] \boldsymbol{\alpha}^{(3)} + \boldsymbol{\omega}^{(3)} \times [I] \boldsymbol{\omega}^{(3)} \}\end{aligned}\right\} (2.63)$$

$$= -\begin{bmatrix} (I_1 - I_2 + I_3) c(\phi_2 + \phi_3) \omega_1 (\omega_2 + \omega_3) \\ (I_1 - I_2 - I_3) s(\phi_2 + \phi_3) \omega_1 (\omega_2 + \omega_3) \\ (I_2 - I_1) s(\phi_2 + \phi_3) c(\phi_2 + \phi_3) \omega_1^2 \end{bmatrix}\quad (2.64)$$

设 $\partial \dot{r}_G^{(0)} / \partial \dot{\phi}_1$, ... 为式 (2.58) 中 ω_1 , ... 的系数, $\partial \boldsymbol{\omega}^{(3)} / \partial \dot{\phi}_1$, ... 为式 (2.60) 中 ω_1 , ... 的系数, 由式 (2.51) 可得

$$\left. \begin{aligned}M_1 &= \left(\frac{\partial \dot{r}_G^{(0)}}{\partial \dot{\phi}_1}, -\mathbf{F}_{dw}^{(0)} \right) + \left(\frac{\partial \boldsymbol{\omega}^{(3)}}{\partial \dot{\phi}_1}, -\mathbf{M}_{dw} \right) \\ &= -2m_w \{ l_2 c \phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \} [\{ l_2 s \phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3) \} \omega_2 \\ &\quad + l_2 s(\phi_2 + \phi_3) \omega_3] \omega_1 + (I_1 - I_2) s(\phi_2 + \phi_3) c(\phi_2 + \phi_3) \omega_1 (\omega_2 + \omega_3) \\ M_2 &= m_w [\{ l_2 c \phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \} \{ l_2 s \phi_2 + l_3 s(\phi_2 + \phi_3) \} \omega_1^2 \\ &\quad - l_2 l_3 s \phi_3 (2\omega_2 \omega_3 + \omega_1^2)] + (I_2 - I_1) c(\phi_2 + \phi_3) s(\phi_2 + \phi_3) \omega_1^2 \\ M_3 &= m_w \{ l_2 c \phi_2 + l_3 c(\phi_2 + \phi_3) \} l_3 s(\phi_2 + \phi_3) \omega_1^2 \\ &\quad + (I_2 - I_1) c(\phi_2 + \phi_3) s(\phi_2 + \phi_3) \omega_1^2\end{aligned}\right\} (2.65)$$

虽然可以用上述方法求解，但即使只是三个自由度计算量也非常大。如果有六个自由度，人工计算就不合适了，应该用电子计算机进行数值计算。

2.2.7 机器人的位置、姿势的综合

关于一般结构的六个自由度的机器人，由在手上夹持的物体的位置姿势求关节的位移的综合问题的解析解法，至今尚未发现。

但是，对相邻关节回转轴、平移轴互成直角或互相平行的，这样一种结构机器人，可分别不同情况，求得解析解。而大多数工业机器人是适合于上述条件的，正像2.1节中所说明的那样，这种结构的机器人种类相当多，由于不能表示出全部的解析解，这里，仅以二、三例叙述其解法。

假设有如下的问题，如图2.20所示。

“对于六个自由度的机器人，为把初始状态（各关节位移=0）时位置为 P_0 、姿势为 (e_x, e_y, e_z) 的物体带到位置为 P ，姿势为 (e_{wx}, e_{wy}, e_{wz}) 的状态，各关节的位移 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_6$ 各为多少才行？”

(1) RPP-RPR[⊖] (图2.21) 在以下的计算中，R的回转以顺时针为正，P的回转以逆时针为正。

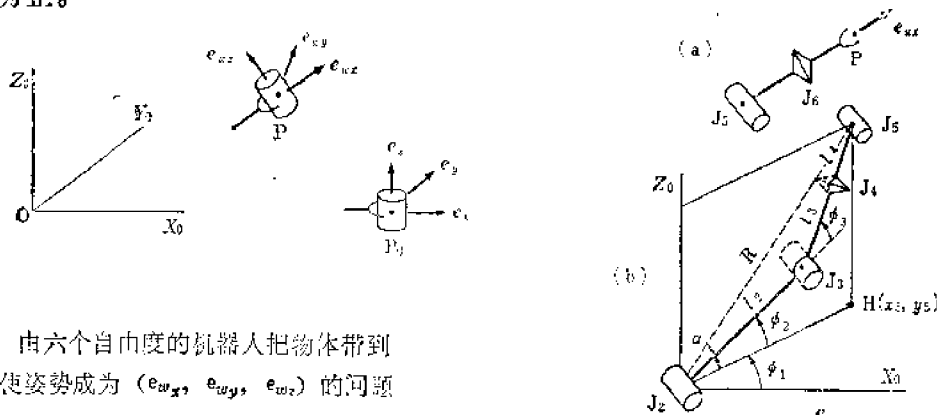


图 2.20 由六个自由度的机器人把物体带到位置 P ，使姿势成为 (e_{wx}, e_{wy}, e_{wz}) 的问题

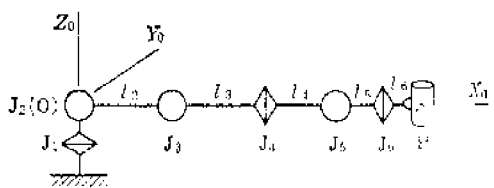


图 2.21 RPP-RPR机器人的初始位置

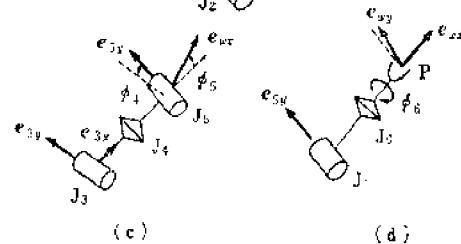


图 2.22

(a) J_5, J_6, P 在一条直线上，如图2.22 (a) 所示，由于向着 e_{wx} 的方向，则 J_6, J_5 的位置为

$$\vec{J}_6 = \vec{P} - l_6 e_{wx} \quad (2.66)$$

$$\vec{J}_5 = \vec{P} - (l_5 + l_6) e_{wx} \quad (2.67)$$

⊖ 如图2.5所示，R、P分别代表绕不同坐标轴旋转的关节，图中 J_1, J_2, \dots 分别表示第一关节，第二关节……

—译者

(b) $J_2(O)$ 、 J_3 、 J_4 、 J_5 在同一垂直平面内，如图2.22 (b) 所示，因为 J_5 的位置已知，由下式

$$\vec{J}_3 + \vec{J}_3 \vec{J}_5 = \vec{J}_5 \quad (2.68)$$

可知 J_3 的位置，但 J_3 有2种解。

(c) J_5 的回转轴方向矢量 e_{5y} 与 e_{wx} 和 $\vec{J}_3 \vec{J}_5$ 垂直，如图2.22 (c)、(d) 所示。

$$e_{5y} = \frac{\vec{J}_3 \vec{J}_5 \times e_{wx}}{|\vec{J}_3 \vec{J}_5 \times e_{wx}|} \quad (2.69)$$

由以上的关系，按如下方法可求出全部关节的位移 ϕ_1 、 ϕ_2 、...

设式(2.67)中给出的位置为 $\vec{J}_5 = (x_5, y_5, z_5)^T$ ，则

$$\phi_1 = \tan^{-1}(y_5/x_5) \text{ 又は } \phi_1 = \text{ATAN2}(y_5, x_5)^* \quad (2.70)$$

根据式(2.68)

$$l_2 e^{i\phi_1} + (l_3 + l_4) e^{i(\phi_1 + \phi_2)} = R e^{i\alpha} \quad (2.71)$$

这里，

$$R = |\vec{J}_5| = \sqrt{x_5^2 + y_5^2 + z_5^2}, \quad \alpha = \text{ATAN2}(z_5, \sqrt{x_5^2 + y_5^2})$$

设

$$C_2 = \frac{l_2^2 + R^2 - (l_3 + l_4)^2}{2l_2 R}, \quad C_3 = \frac{(l_3 + l_4)^2 + R^2 - l_2^2}{2(l_3 + l_4)R}$$

则

$$\begin{cases} \phi_2 = \alpha - \cos^{-1} C_2 \\ \phi_3 = \alpha + \cos^{-1} C_3 - \phi_2 \end{cases} \text{ 又は } \begin{cases} \phi_2 = \alpha + \cos^{-1} C_2 \\ \phi_3 = \alpha - \cos^{-1} C_3 - \phi_2 \end{cases} \quad (2.72)$$

这样， J_3 的位置以及 $\vec{J}_3 \vec{J}_5$ 为

$$\vec{J}_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos \phi_1 \cos \phi_2 \\ l_2 \sin \phi_1 \cos \phi_2 \\ l_2 \sin \phi_2 \end{bmatrix}, \quad \vec{J}_3 \vec{J}_5 = \begin{bmatrix} x_5 - x_3 \\ y_5 - y_3 \\ z_5 - z_3 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

e_{5y} 由式(2.69)求出， $e_{5y} = (-\sin \phi_1, \cos \phi_1, 0)^T$ ， e_{5y} 和 e_{1y} 的夹角为 ϕ_4 ， $\vec{J}_3 \vec{J}_5$ 和 e_{wx} 的夹角为 ϕ_5 ， e_{5y} 和 e_{wx} 的夹角为 ϕ_6 。设 $\vec{J}_3 \vec{J}_5 / (l_3 + l_4) = e_{3z}$ ，考虑到回转方向，

$$\begin{cases} c_4 = (e_{3y}, e_{5y}) \\ s_4 = (e_{3y} \times e_{5y}, e_{3z}) \end{cases} \quad \phi_4 = \text{ATAN2}(s_4, c_4) \quad (2.74)$$

$$\begin{cases} c_5 = (e_{3z}, e_{wx}) \\ s_5 = (e_{3z} \times e_{wx}, -e_{5y}) \end{cases} \quad \phi_5 = \text{ATAN2}(s_5, c_5) \quad (2.75)$$

$$\begin{cases} c_6 = (e_{5y}, e_{wy}) \\ s_6 = (e_{5y} \times e_{wy}, e_{wx}) \end{cases} \quad \phi_6 = \text{ATAN2}(s_6, c_6) \quad (2.76)$$

* $\ominus \text{ATAN}_2(x, y)$ 为 $x = \sin \phi$ 、 $y = \cos \phi$ 时与 ϕ 同一意义的函数。

e_y ,也可在与图相反的方向上得到。这时, ϕ_4 、 ϕ_6 在上述值上加上 180° , ϕ_5 只要取与上述相反的符号就行了。另外, ϕ_1 的值也可在上述值上加上 180° 而得到, 这时, ϕ_2 、 ϕ_3 可从 180° 中减去上式的值而得解。由于 J_3 的位置有二值性, 所以合计存在8种解。

(2) RPR-PRP (图2.23)

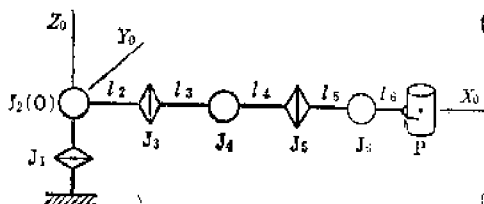


图 2.23

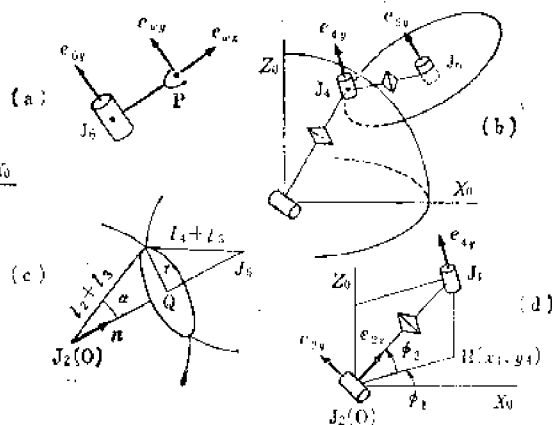


图 2.24

(a) J_6 、 P 在 e_{6x} 的方向, 如图2.24 (a) 所示。

$$\begin{aligned} \vec{J}_6 &= \vec{P} - l_6 e_{6x} = (x_6, y_6, z_6)^T \\ e_{6y} &= e_{wy} \end{aligned} \quad (2.77)$$

(b) J_4 在以 $J_2(O)$ 为球心, 半径为 $(l_3 + l_4)$ 的球面上, 另外, 又在以 J_6 为圆心, 半径为 $(l_4 + l_5)$ 的圆上, 这个圆的中心轴方向为 e_{6y} , 如图2.24 (b) 所示,

$$\left. \begin{aligned} |\vec{J}_4|^2 &= (l_3 + l_4)^2 \\ |\vec{J}_4 \vec{J}_6|^2 &= (l_4 + l_5)^2 \\ (\vec{J}_4 \vec{J}_6, e_{6y}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

作为这个球与圆的交点, J_4 有2种解。

(c) J_4 的回转轴方向矢量 e_{4y} , 与 \vec{J}_4 和 $\vec{J}_4 \vec{J}_6$ 正交, 如图2.24 (d) 所示,

$$e_{4y} = \frac{\vec{J}_4 \times \vec{J}_4 \vec{J}_6}{|\vec{J}_4 \times \vec{J}_4 \vec{J}_6|} \quad (2.79)$$

从这些关系中, 按下式可求出 ϕ_1 、 ϕ_2 、 \dots 、 ϕ_6 。

如图2.24 (c) 所示 J_4 是以 Q 为圆心, r 为半径的圆和 $(\vec{J}_4 \vec{J}_6, e_{6y}) = 0$ 的平面的交点, 把式(2.78)变化为这种圆与平面交点的形式, 可按式计算 J_4 的位置。

⊖原书误为 J_5 —译者

设

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{J}_6 \text{ 的} \\ \text{方向 单位量} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x_6^2 + y_6^2 + z_6^2}} \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{6y} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{Q} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = (l_2 + l_3) \mathbf{n} \cos \alpha, \quad \cos \alpha = \frac{(l_2 - l_3)^2 + |\vec{J}_6|^2 - (l_4 + l_5)^2}{2(l_2 + l_3) |\vec{J}_6|} \\ E = (\vec{Q} \cdot \vec{J}_6, \mathbf{e}_{6y}) = m_x(x_6 - q_x) + m_y(y_6 - q_y) + m_z(z_6 - q_z), \\ A_2 = |\mathbf{e}_{6y} \times \vec{J}_6|^2 = (m_x y_6 - m_y z_6)^2 + (m_x z_6 - m_z x_6)^2 + (m_y x_6 - m_x y_6)^2, \\ A_1 = E \{ m_x |\vec{J}_6|^2 - z_6 (\mathbf{e}_{6y}, \vec{J}_6) \} = E \{ m_x (x_6^2 + y_6^2) - z_6 (m_x x_6 + m_y y_6) \}, \\ A_0 = E^2 (x_6^2 + y_6^2) - (m_y x_6 - m_x y_6) (l_2 + l_3) \sin \alpha \end{array} \right.$$

则 \vec{J}_4 为

(2.80)

$$\left\{ \begin{array}{l} x_4 = q_z + \frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - A_0 A_2}}{A_2}, \\ x_4 = q_x + \frac{-m_y z_6 (x_4 - q_x) + y_6 \{ m_x (z_4 - q_x) - E \}}{m_y x_6 - m_x y_6}, \\ y_4 = q_y + \frac{m_x z_6 (x_4 - q_x) - x_6 \{ m_x (z_4 - q_x) - E \}}{m_y x_6 - m_x y_6} \end{array} \right. \quad (2.81)$$

参照图 2.24 (d) .

$$\phi_1 = \text{ATAN2}(y_4, x_4), \quad (2.82)$$

$$\phi_2 = \text{ATAN2}(x_4, \sqrt{x_4^2 + y_4^2}), \quad (2.83)$$

$$\mathbf{e}_{2y} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_1 \\ \cos \phi_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{2x} = \frac{1}{l_2 + l_3} \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{4x} = \frac{1}{l_4 + l_5} \begin{bmatrix} x_6 - x_4 \\ y_6 - y_4 \\ z_6 - z_4 \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

由于 \mathbf{e}_{4y} 与 \mathbf{e}_{2x} 和 \mathbf{e}_{4x} 垂直, 所以

$$\mathbf{e}_{4y} = \frac{\mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{e}_{4x}}{|\mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{e}_{4x}|} \quad (2.85)$$

ϕ_3 是 \mathbf{e}_{2y} 和 \mathbf{e}_{4y} 的夹角, ϕ_4 是 \mathbf{e}_{2x} 和 $\mathbf{e}_{4x} = \vec{J}_4 \cdot \vec{J}_6 / (l_4 + l_5)$ 的夹角, ϕ_5 是 \mathbf{e}_{4y} 和 \mathbf{e}_{6y} 的夹角, ϕ_6 是 \mathbf{e}_{4x} 和 \mathbf{e}_{6x} 的夹角, 则下式成立:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_3 = (\mathbf{e}_{2y}, \mathbf{e}_{4y}) \\ s_3 = (\mathbf{e}_{2y} \times \mathbf{e}_{4y}, \mathbf{e}_{2x}) \end{array} \right. \quad \phi_3 = \text{ATAN2}(s_3, c_3) \quad (2.86)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_4 = (\mathbf{e}_{2x}, \mathbf{e}_{4x}) \\ s_4 = (\mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{e}_{4x}, -\mathbf{e}_{4y}) \end{array} \right. \quad \phi_4 = \text{ATAN2}(s_4, c_4) \quad (2.87)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_5 = (\mathbf{e}_{4y}, \mathbf{e}_{6y}) \\ s_5 = (\mathbf{e}_{4y} \times \mathbf{e}_{6y}, \mathbf{e}_{4x}) \end{array} \right. \quad \phi_5 = \text{ATAN2}(s_5, c_5) \quad (2.88)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_6 = (\mathbf{e}_{4x}, \mathbf{e}_{6x}) \\ s_6 = (\mathbf{e}_{4x} \times \mathbf{e}_{6x}, -\mathbf{e}_{6y}) \end{array} \right. \quad \phi_6 = \text{ATAN2}(s_6, c_6) \quad (2.89)$$

e_{4y} 也可以与图上的方向相反。相反时, ϕ_3 、 ϕ_5 在上述的值上加 180° , ϕ_4 只要取上述值的反号即可。另外, ϕ_1 也可在上述值上加 180° 后得到。这时, ϕ_2 可从 180° 减去上述的值而得到。考虑到 J_4 的位置的2值性, 合计有8种解存在。

(3) RPS-RPR (图2.25) 可用同样的方法计算:

$$\vec{J}_3 = (x_3, y_3, z_3)^T = \vec{P} - (l_3 + l_4)\mathbf{e}_{3x} \quad (2.90)$$

$$\phi_1 = \text{ATAN2}(y_3, x_3) \quad (2.91)$$

$$\phi_2 = \text{ATAN2}(z_3, \sqrt{x_3^2 + y_3^2}) \quad (2.92)$$

$$\phi_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2} - l_4 \quad (2.93)$$

$$\mathbf{e}_{2y} = (-\sin \phi_1, \cos \phi_1, 0)^T$$

$$\mathbf{e}_{3y} = \mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{e}_{3x} / |\mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{e}_{3x}|$$

$$\phi_4 = \text{ATAN2}((\mathbf{e}_{2y} \times \mathbf{e}_{3y}, \mathbf{e}_{2x}), (\mathbf{e}_{2y}, \mathbf{e}_{3y})) \quad (2.94)$$

$$\phi_5 = \text{ATAN2}((\mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{e}_{3x}, -\mathbf{e}_{3y}), (\mathbf{e}_{2x}, \mathbf{e}_{3x})) \quad (2.95)$$

$$\phi_6 = \text{ATAN2}((\mathbf{e}_{3y} \times \mathbf{e}_{3x}, \mathbf{e}_{3x}), (\mathbf{e}_{3y}, \mathbf{e}_{3x})) \quad (2.96)$$

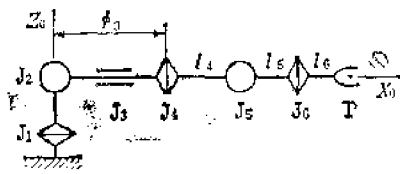


图 2.25 RPS-RPR的初始位置

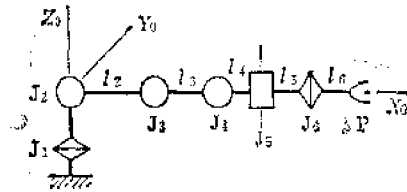


图 2.26 RPP-PP'R的初始位置

(4) RPP-PP'R (P' 是有与 P 、 R 成直角的回转轴的关节) (图2.26)

$$\vec{J}_3 = (x_3, y_3, z_3)^T = \vec{P} - (l_3 + l_4)\mathbf{e}_{3x} \quad (2.97)$$

$$\phi_1 = \text{ATAN2}(y_3, x_3) \quad (2.98)$$

由 $\Delta J_2 J_3 J_4$ 看出, 若

$$R^2 = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2, \quad \alpha = \text{ATAN2}(z_3, \sqrt{x_3^2 + y_3^2}),$$

$$C_2 = \frac{l_3^2 + R^2 - l_4^2}{2l_2 R}, \quad C_3 = \frac{l_4^2 + R^2 - l_3^2}{2l_3 R}$$

$$\begin{cases} \phi_2 = \alpha - \cos^{-1} C_2 & \text{又は} & \phi_2 = \alpha + \cos^{-1} C_2 \\ \phi_3 = \alpha + \cos^{-1} C_3 - \phi_2 & & \phi_3 = \alpha - \cos^{-1} C_3 - \phi_2 \end{cases} \quad (2.99)$$

$$\mathbf{e}_{2y} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_1 \\ \cos \phi_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{3z} = \frac{\mathbf{e}_{3x} \times \mathbf{e}_{3y}}{|\mathbf{e}_{3x} \times \mathbf{e}_{3y}|}, \quad \mathbf{e}_{4x} = \frac{\mathbf{e}_{2y} \times \mathbf{e}_{3z}}{|\mathbf{e}_{2y} \times \mathbf{e}_{3z}|}$$

$$\vec{J}_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \vec{J}_3 - l_4 \mathbf{e}_{4x}, \quad \vec{J}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos \phi_2 \cos \phi_1 \\ l_2 \cos \phi_2 \sin \phi_1 \\ l_2 \sin \phi_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{e}_{11} = \vec{J}_1 \vec{J}_1, \quad l_1 = (\mathbf{e}_{11} - \mathbf{e}_{10}, y_1 - y_0, z_1 - z_0)^T / l_1$$

$$\phi_4 = \text{ATAN2}\{e_{3x} \times e_{4y} - e_{4x}, (e_{3x}, e_{4x})\} \quad (2.100)$$

$$\phi_5 = \text{ATAN2}\{e_{4x} \times e_{5z}, (e_{4x}, e_{5x})\} \quad (2.101)$$

$$\phi_6 = \text{ATAN2}\{e_{5x} \times e_{6z}, (e_{5x}, e_{6x})\} \quad (2.102)$$

除了这些例子以外，相邻关节的轴间是偏置的时候，也有可以解的情况。

2.3 机器人的驱动传动机构

2.3.1 传动装置和减速器

作为机器人的传动装置，常用的有电动马达、油压作动筒、空压作动筒以及凸轮机构。除此以外，作为特殊的传动装置，有利用压电晶体的⁽³⁾，也有利用形状记忆合金的⁽⁴⁾。

油压伺服作动筒的特征是较大容积的作动筒可产生较大的扭矩，所以被用在搬运大型重物的机器人上。空压作动筒，由于媒质是空气，所以价格便宜、操作方便，也可以产生较大力矩，但不适合作伺服机构，主要使用在固定指令的机器人上。凸轮机构运动确定，适合于高速度高负荷。适当地制造凸轮的形状，可得到任意的运动，可以说它是不能简单地改变的完全固定指令的传动装置。在自动机械中凸轮用得非常多，因而凸轮驱动式的固定指令的机器人也应该叫做自动机械吧。

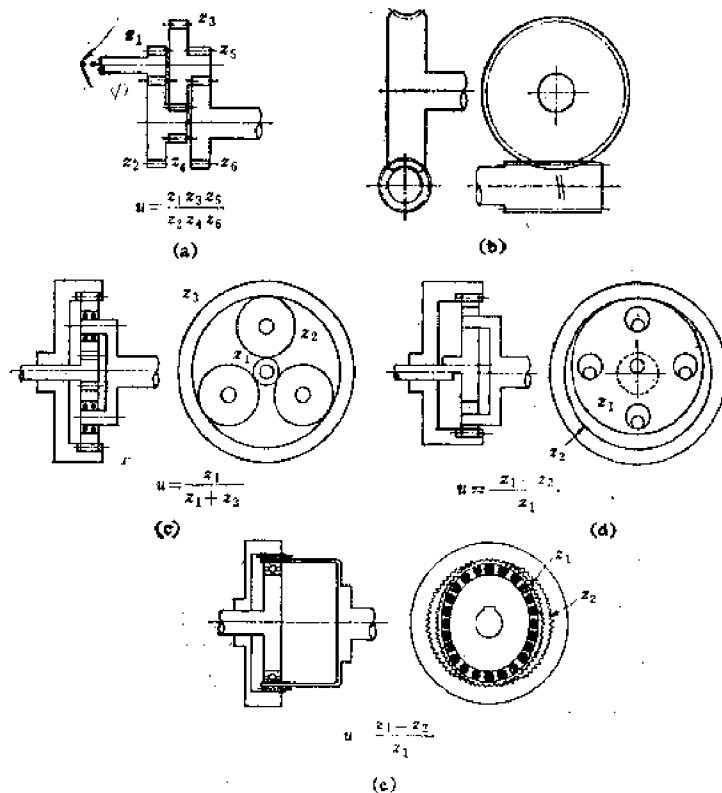


图 2.27 实用减速机构举例
 (a) 单纯的齿轮系列；(b) 蜗轮蜗杆；(c) 行星齿轮机构；
 (d) 偏心行星齿轮装置；(e) 谐波齿轮。

能得到任意的轴间距。为了避免传动中松弛，有必要加中间张紧轮。图(d)所示为有齿皮带的传动，具有和链传动的同样性质，但使用中，有时会多少有张有弛。图(e)所示为平皮带传动，除了用钢皮带外，都会伸长过大，传动不够准确，所以须要规定：只允许转一圈以下，且皮带一端要固定在皮带轮上。另外，它有这样的特征：除了钢皮带外，可以传递在异面位置上的两轴间的运动。图(f)所示为绳传动，能最为自由地改变回转轴

方向但必须将绳的一端固定在轮上，另外它的刚性小，是造成振动的原因。图(b)~(f)的机构都能对若干个回转轴方向并行多重运动传递。

图2.30所示是把回转运动变成平移的机构。

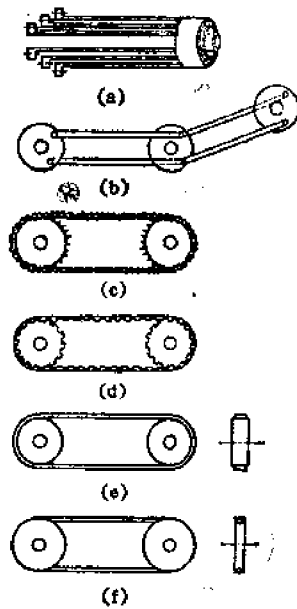


图 2.29 驱动各关节的传动机构
(a) 同心轴，(b) 连杆机构，(c) 链传动，(d) 有齿皮带传动，(e) 平皮带传动，(f) 绳传动。

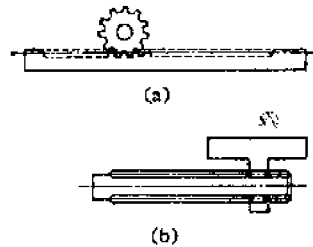


图 2.30 回转变平移的变换机构
(a) 齿轮齿条，(b) 滚珠丝杠。

2.3.3 关节的机构

当有若干个驱动件配置在臂的根部的时候，驱动件必须顺序地穿过各个关节，到达应驱动关节。对于相邻关节的回转轴是平行的情况，只要用2.3.2节所列举的机构就行了，但在PR，RP那样的正交的情况下，需要好好地动脑筋。

图2.31(a)所示是在PR关节上利用的差动齿轮机构。设输入的回转角为 θ_1, θ_2 ，P的回转角为 ϕ_1 ，R的回转角为 ϕ_2 ，则下式成立：

$$\phi_1 = (\theta_1 + \theta_2)/2, \quad \phi_2 = (\theta_2 - \theta_1)/2 \quad (2.103)$$

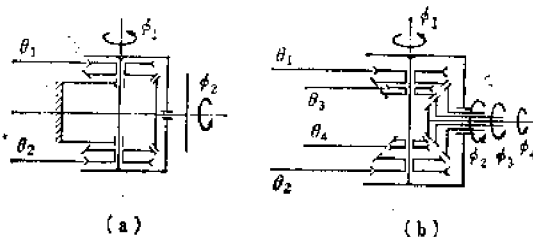


图 2.31 差动齿轮机构 (PR)

同样，图(b)所示为4个驱动件穿过PR的例子， ϕ_1, ϕ_2 的值同上式， ϕ_3, ϕ_4 分别为

$$\phi_2 = -\theta_3 + \phi_1, \quad \phi_4 = \theta_2 + \phi_1 \quad (2.104)$$

图2.32 (a) 所示为用于手腕的RPR机构

$$\phi_3 = \theta_3, \quad \phi_2 = \theta_3 - \theta_2, \quad \phi_1 = 2\theta_3 + \theta_2 - \theta_1 \quad (2.105)$$

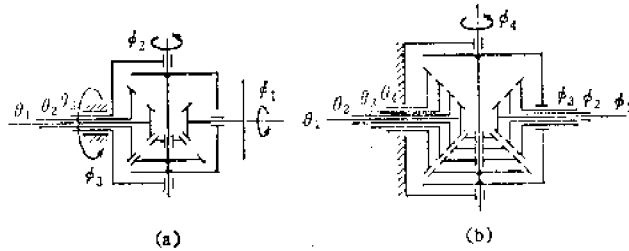


图 2.32 利用伞齿轮穿过关节
(a) RPR, (b) PR。

同图 (b) 所示一样，是同轴的4个驱动件，用4重伞齿轮穿过PR。如图2.31 (b)、图2.32 (b) 所示的那样，只要做成多重的，无论多少个运动都能进行传递，但由于重复太多就变得又大又重，把驱动件放在根部的优点就少了。图2.33所示是叫做Lemma (拉玛) 的穿过PR的多重传动机构。与图2.32以前所示的机构不同，它是偏置机构。图2.34所示也是使用在手腕上的，是三个滚柱关节的一种RPR机构。由于R轴与P轴不是正交的，所以综合计算稍微有些困难。图2.35所示是万向联轴节的变形，马达配置在关节的前后，有使臂关节能万向运动的优点。

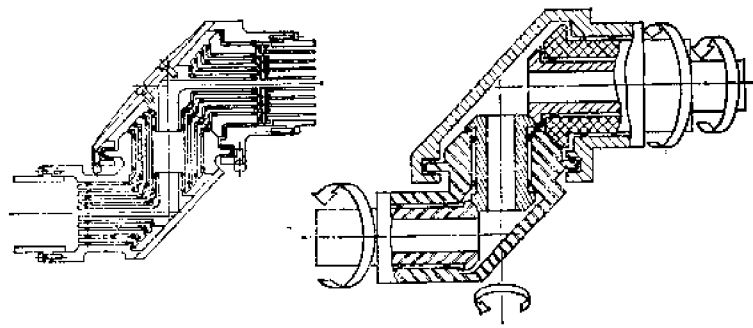


图 2.33 Lemma⁽¹⁾关节

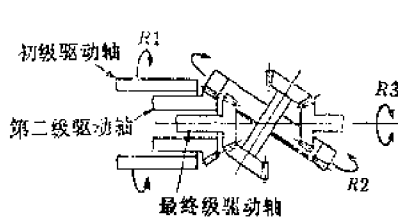


图 2.34 三个滚柱关节

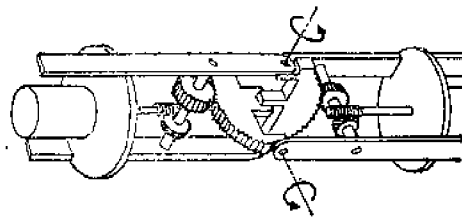


图 2.35 2自由度关节的万向化⁽¹⁾

绳传动可以传递任意方向的回转，可能传递来自根部的更多的运动。图2.36所示是它的几个例子。轮子的数目较多，但无论在重量、体积上都没有齿轮装置那么大，那么复

杂。但是，绳传动只对张紧方向有效，所以为了进行双向传动，必须敷设往复的绳索，如果是6个自由度，就需要12根绳索。图2.36 (d) 所示是绳传动的特殊使用方法，把球面轴承、圆盘和3根绳对应地连接起来，就可以得到如象鼻子那样的自由自在的运动。上述的绳传动与其他传动相比，刚性差，所以可以说绳传动是面向轻负荷、低速机器人的方向。

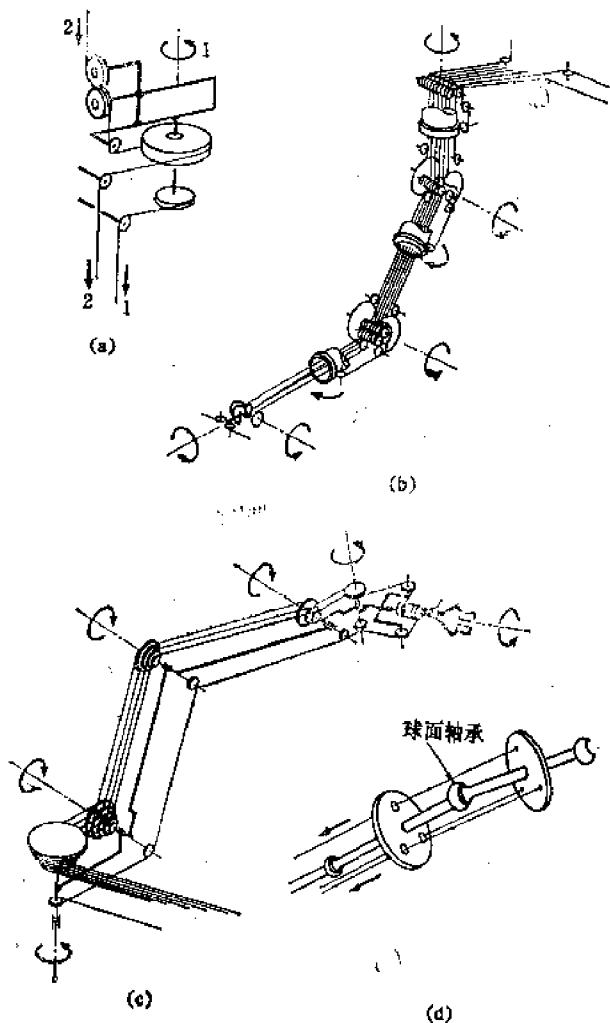


图 2.36 绳传动举例

(a) RPRPRPR⁽⁶⁾, (b) RPPPPR⁽⁶⁾, (c) 用球面轴承和三根绳, 使圆盘做球面运动。

2.4 夹持机构

人的手有五根手指20个自由度，无论什么样形状的物品，手都能抓起来，不仅如此，手还可以做诸如使用剪刀、使用筷子之类的非常灵巧的动作。如果能让机器人不仅能夹持物品，也能做人类的其他一般的动作，虽然不一定要五根手指，也需要相当复杂的机构和控制。

如果只限于夹持物品的动作，并把这些动作分类，可分钳夹形、握形、抓形等三种状态^(1,2)。如在许多工业用机器人的手上我们见到过的，钳形是从两端做夹持动作，运动自

自由度为1个也就够了。握形是弯曲手指，把物体包容在内的夹持动作，运动自由度为1个也行，但也需要有与物体形状相吻合的指关节的柔软性。爪形，是把比手的尺寸小得多的物体立体的包容起来的夹持动作，手指要做三维的运动，自由度也多，换句话说，由于手指是柔软的皮肤状的、且是覆盖着接触传感器的，所以必须要有高度的控制。

目前，用于工业机器人的夹持机构是没有关节的相对配置的两个手指，或是相隔 120° 配置的三个手指，相应于物体的状况可改变手指的形状和尺寸。相对配置的二个手指的开闭如图2.37~2.39所示，有做圆周运动的，有边保持平行边做圆周运动的，有边保持平行边平移前进的。而这些运动是由马达的回转运动或者由空压气瓶的平移运动变换成机构的运动而得到的。在传动机构中，由于绳传动和凸轮传动只能传递一个方向的运动，所以对于相反方向，要用弹簧约束，或必须配备其他的绳索或其他的凸轮。图2.37、图2.38所示是做圆周运动的形式，当所夹持物体大小变化时，就要移动接触的位置，因而不方便。图2.39所示的平移机构就没有那个必要，但滑块机构的摩擦损失较大，所以设计时，做力学计算应把摩擦考虑在内。

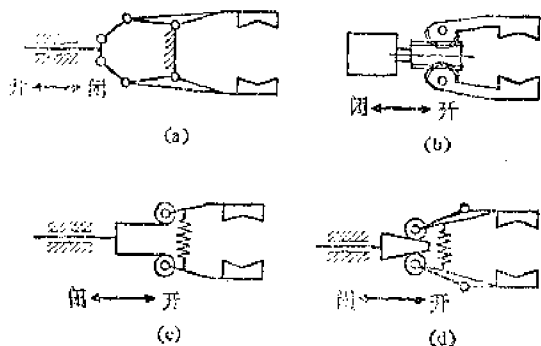


图 2.37 指开闭的各种传动机构
(a) 连杆机构；(b) 齿轮齿条或蜗轮蜗杆；
(c) 绳传动；(d) 凸轮机构。



图 2.38 吊平行曲柄的，不改变姿势的开闭机构

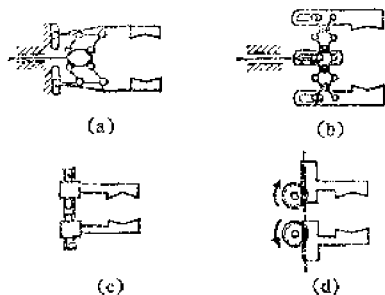


图 2.39 平行的平移开闭机构
(a) 滑块和平行曲柄；(b) 滑块与齿条；
(c) 右螺纹和左螺纹；(d) 齿轮齿条。

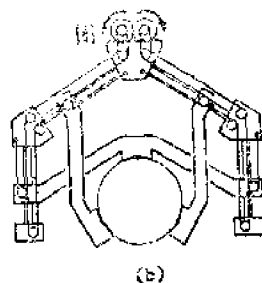
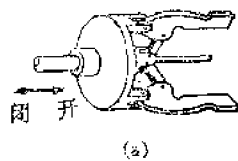


图 2.40 三个手指的手的机构
(a) 典型的三个手指的手的例子⁽¹⁸⁾；(b) 绳传动的同心的三个手指的手⁽¹⁹⁾。

三个手指的手比二个手指的手更能可靠地抓住物体。如图2.40 (a) 所示, 这种机构是把原来的两个手指, 变成设置在圆周上的三个手指, 能较容易地实现。

图2.41是用1个自由度实现的柔软性夹持机构的例子。无论什么样截面的二维物体, 它都能包络而且可靠地夹持。一般来说, 多关节的手指如有多个自由度, 就可以有柔软的夹持能力。

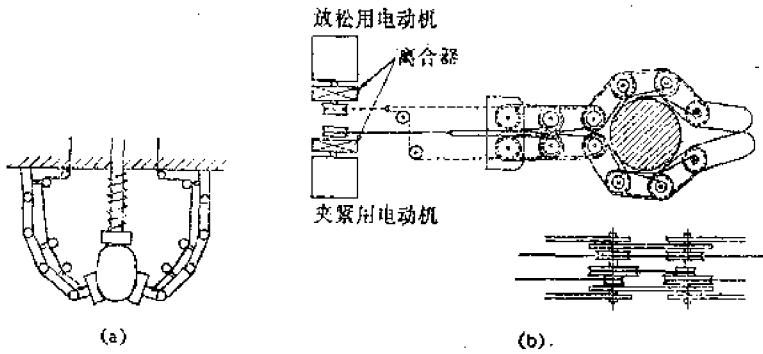


图 2.41 多关节手指

(a) 柔软二指和一个制动器 (1°); (b) 仿物体轮廓的柔软性二指 (1°)。

多关节多自由度的手的例子有不少, 图2.42所示就是其中之一。它有三个手指, 合计有11个自由度, 同时进行位置控制和力矩控制, 它不仅能夹持物体, 而且可以进行相当灵巧的动作。

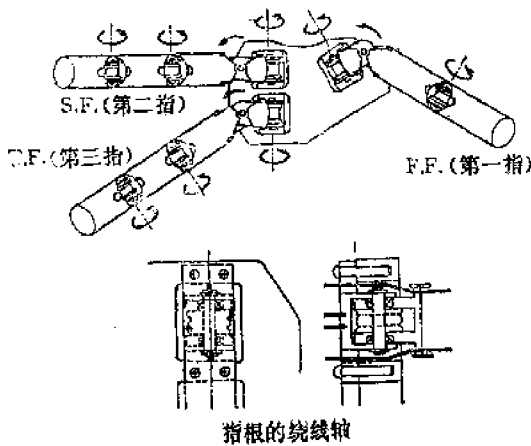


图 2.42 能做灵巧动作的三个手指的手 (11°)

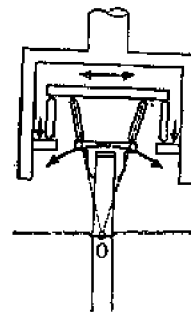


图 2.43 RCC机构 (1°)

(由于物体是以O为中心回转的, 轴的倾斜可以不必移动位置而得到修正)

通用的机器人, 其手的最终姿态, 应是与人手有类似的结构和机能的。我们希望它是灵巧的, 可以经得起高负荷, 具有高速运动的结构、具有必要的充分的受压感觉、滑动感觉的传感器, 具备这样的控制方式: 能在时时刻刻地采纳物体信息的同时, 做出最佳的动作, 它虽然能与臂等机构协调动作, 但结构上又不同于其他机构, 是独立的系统。然而, 当前研制各种作业的专用机器人的手在实用方面却更为重要。图2.43所示为装配作业中的最典型的适合于把销子插入孔内的RCC (Remote center compliance) (细微的

中心适从)机构。它的一大特点:是完全不使用传感器,不仅销和孔心不偏离,而且可以机械地修正轴的倾斜使销能正确地被插入。目前,各公司中使用了许多的RCC的变形机构,可以自动地把销子插入与它仅有数微米间隙的销孔。这样,可把过去在手腕处测量力、力矩,然后进行反馈来控制的插入动作,置换成单纯的机械机构。这件事启示我们,也可能在机构上动些脑筋,使机器人的其他作业单纯化。

2.5 移动机构

移动机构按其结构分类如下:

- (1) 车轮式……三个轮,四个轮,特殊车轮。
- (2) 脚式……二只脚、三只脚、五只脚、六只脚、八只脚。
- (3) 履带式。
- (4) 其他方式。

以下分别论述各机构的特点。

2.5.1 车轮式移动机器人

车轮式机器人动作稳定,自动操纵也简单,在无人工厂中,用来搬运零部件或做其他工作,使用得最多。它最适合平地行走,但如果不是特殊型号就不能跨越高度,不能爬楼梯。普通型号的有三个轮、四个轮或六个轮,它们或有驱动轮和自位轮,或有驱动轮和转向机构。图2.44所示的三个轮的例子,图(a)所示是一个驱动轮和转向机构来转弯的,其他二个轮自由,图(b)所示是由两个驱动轮的速度差和自位轮来转弯的。图2.45所示是四个轮的例子,图(a)、(b)所示是二个驱动轮、二个自位轮,图(c)所示是和汽车的类型相同的移动机构,为了转向,用四节连杆机构,回转中心大致在后轮车轴的延长线上。图(d)所示可以独立地进行左右转向,因而提高了回转精度,图(e)所示是全部轮子都可进向转向,能够减小转弯半径。

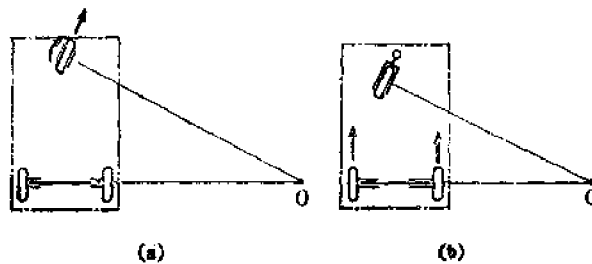


图 2.44 三个轮的行走和转弯机构
(a) 一个驱动轮和转向机构; (b) 二个驱动轮和自位轮。

自位轮沿回转轴回转,直到转至转弯方向为止,这期间驱动轮产生滑动,无法求出正确的移动量。另外,在用转向机构改变运动方向时,缺点是在静止状态下会产生很大的阻力。

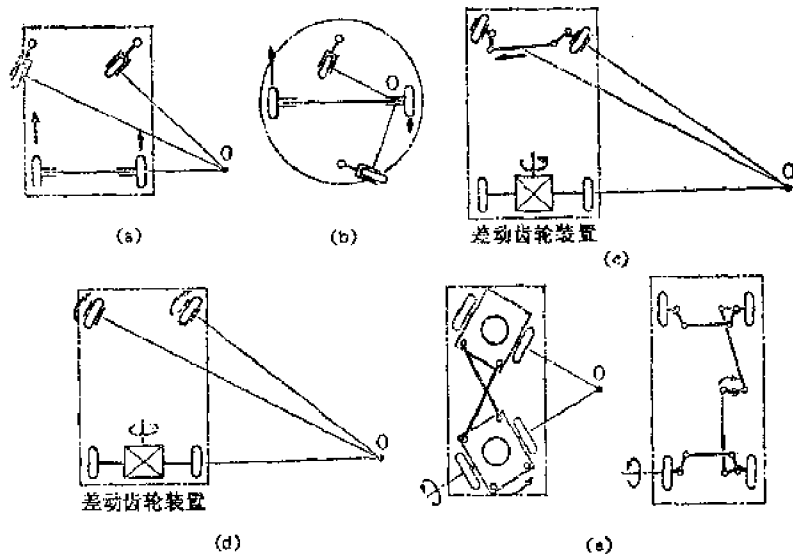


图 2.46 四个轮的走行和转弯机构

(a) 二个驱动轮和二个自位轮；(b) 二个驱动轮二个自位轮；(c) 一个驱动系统和转向轮；(d) 一个驱动系统和二个转向轮；(e) 全部轮都装有转向机构，能减少转弯半径⁽¹⁾。

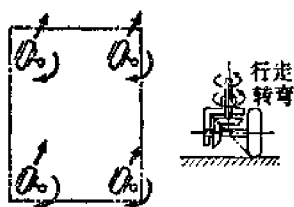


图 2.46 全方位移动机器人⁽²⁾

图2.46所示的四个轮子全装有转向机构，无论朝什么方向都能行走，转弯是全方位的移动机器人。如图所示，由于把车轮的接地点设在伞齿轮圆锥面的沿长线上，所以转弯和行走是相互独立的，没有前面说的缺点，转弯时能高精度地控制移动的距离。

作为特殊的车轮，人们提出了各种各样的机构的方案。图2.47所示是倾斜安装的两个驱动轮的行走和转弯的机构。如果机器人本体向前倾倒时，车轮的接地点变得比重心更朝前，所以能够稳定的站立。图2.48所示是能上、下台阶的机器人，行走时车轮旋转，上、下台阶时臂回转，与脚式的移动机构比较，它的特点是行走、上下台阶的控制较容易。

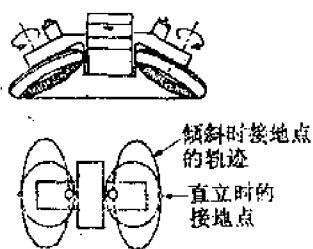


图 2.47 摇动摆线移动机构⁽²⁾

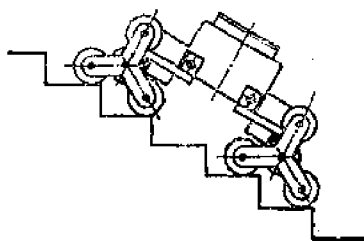


图 2.48 转臂式阶梯升降机构

2.5.2 脚式移动机器人

即所谓的步行机器人。它的一般特征：是不仅能在平地上而且在凹凸不平的地上步

行、跨越沟壑、上下台阶，具有广泛的适应性。但要控制它迈步而不倾倒是很难的，完全实现上述要求的步行机器人的例子极少。

二脚步行的机器人，除了假肢外，不能认为有实用性。但是，多自由度的、一种把倒立振子稳定站立并使其移动的控制是难度极高的控制，如果能让这种机器人以人一样的速度行走、上下台阶，那末，这种技术所产生的效果将是不可预测的。图2.49是模拟人类脚的步行机器人机构图。实现对它的控制，使身体的重心经常在接地的脚掌上，一边不断取得准静态的平衡一边稳定地步行。也有人试验过用自由度较少的其他的二只脚的步行机器人，但是为了能变换方向、上下台阶，被认为这种机构一定要有那样多的自由度。

四只脚的机器人静止状态下是稳定的，具有一切步行机器人的优点，所以它和六只脚的机器人一样有很高的实用性。四只脚在步行中，当一只脚抬起，三只脚支撑自重时，有必要移动身体，让重心落在三只脚接地点所组成的三角形内，如图2.50所示。各脚相应于其支点提起，向前伸出、接地、水平向后返回，像这样的一联串动作均由连杆机构进行，不要特别控制就能实现。然而，为了适应凹凸不平的地面，每只脚必须有2个自由度。图2.51所示是它的例子。图(b)是平移—平移变换，由于是缩放机构，脚尖的位置容易计算。步行方向的改变和上、下台阶，各脚只要有3个自由度就足够了。图2.52所示是有3个自由度的缩放机构，实现了上、下台阶的少数步行机器人的一个例子。

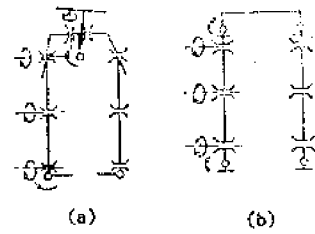


图 2.49 模拟人脚的二足步行机器人
(a) WL-5 (n 个自由度)靠第一股关节可以转换方向；(b) WL-9RD (10个自由度)可以按平滑梯形直线步行。

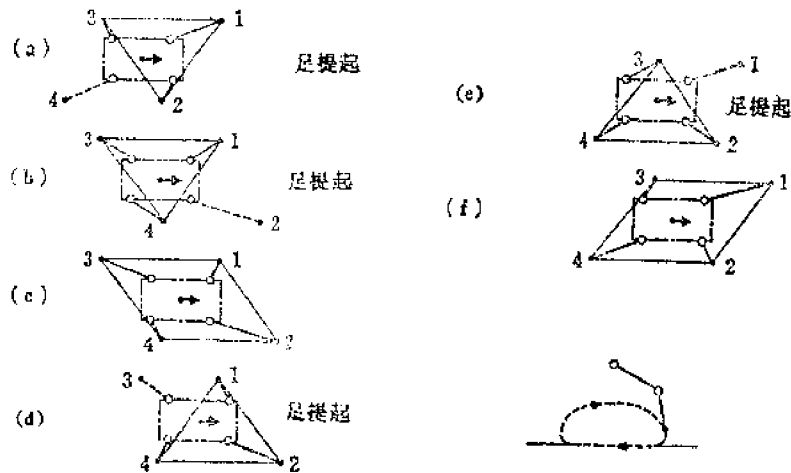
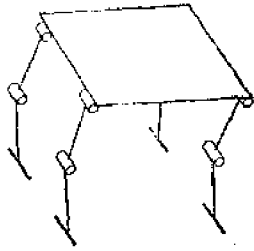
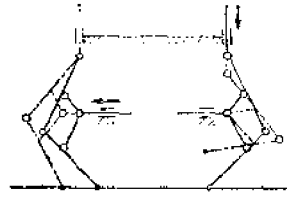


图 2.50 四只脚步行图 (crawling) (4)

五只脚机器人的例子如图2.53所示。在平地上是靠脚尖上的轮子行走的，所以不是“步行”机器人，但腿可以伸缩，能上台阶、能下台阶。它具有的特点



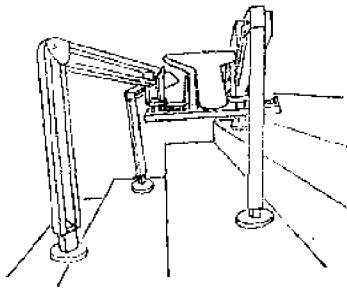
(a)



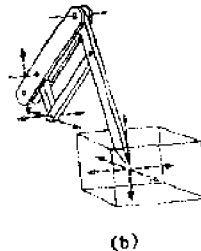
(b)

图 2.51 四脚步行机器人的脚机构举例

(a) 加利福尼亚马 (8个自由度) (25), (b) 利用缩放机构的脚机构 (8个自由度) (26)。



(a)



(b)

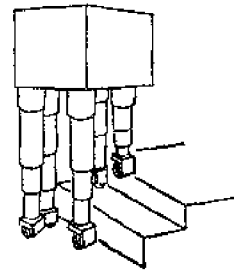


图 2.52 能上下台阶的四只脚步行机器人PV-II (27)

(12个自由度)

图 2.53 五只脚机器人举例

六只脚步行机器人的步行控制比四只脚更容易。也就是说, 如果开始用右脚1左脚2支撑向前移动, 然后用左脚1右脚2支撑向前移动的话 (三脚步态), 能得到稳定的重心位置, 脚的接地的范围宽, 所以能顺利地前进。六只脚的情况和四只脚的情况一样, 如果各脚有2个自由度的话, 就可以在凹凸不平的地上步行。图2.54所示是空气压力驱动的步行机器人的例子。为了能转变方向, 如果各脚有3个自由度的话, 就足够了, 图2.55所示就是其中的一例, 不仅可能有 (三脚步态) 而且可能有相当自由的步容, 但共计有18个自由度, 因此, 包含力传感器、接触传感器、倾斜传感器在内的稳定的步行控制是相当复杂的。

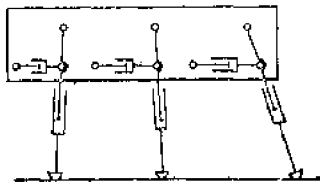


图 2.54 12个自由度的六足步行机器人举例 (28)

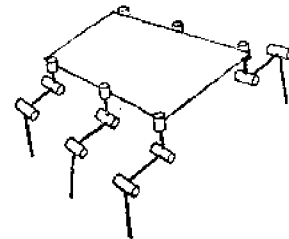


图 2.55 18个自由度的六足步行机器人举例 (29)

步行机器人虽然可望有较广的环境适应性, 但是也存在着控制的复杂性和步行速度低的缺点。

2.5.3 履带式移动机器人

履带式具有很大的特点：可以在有些凹凸的地面上行走，可以跨越障碍物，能爬梯度不太高的台阶。另外，它的缺点是通常由于没有自位轮，没有转向机构，要转弯只是靠左右两个履带的速度差，所以不仅在横向，而且在前进方向也会产生滑动，转弯阻力大，不能准确地确定回转半径等。

图2.56所示是装有转向机构的履带式机器人。它没有上述的缺点，可以上、下台阶。图2.57 (a) 所示的主体前后装有转向器，并装有使转向器绕着图中的A-A旋转提起的机构，这使得上、下台阶非常顺利，能得到诸如用折叠方式向高处伸臂，在斜面上保持主体水平等各种各样的姿势。图 (b) 的履带形状可以适应台阶而改变，也比通常的履带式的动作自如。

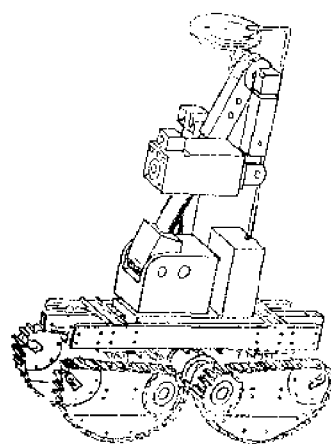


图 2.56 装有转向机构的履带式机器人 T-2⁽³¹⁾

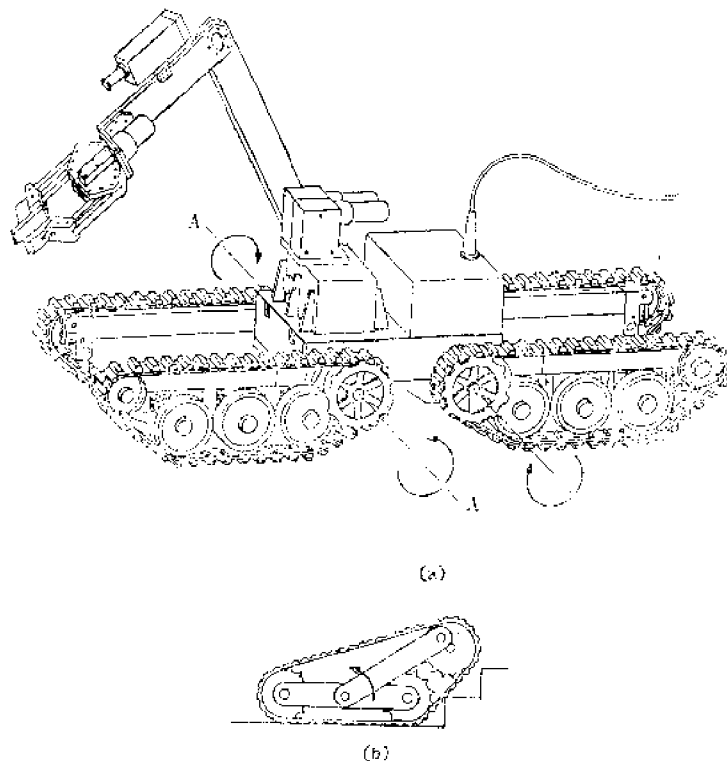


图 2.57 容易上、下台阶的履带式移动机器人
(a) 双履带式MF3 (6个自由度)⁽³²⁾；(b) 形状可变式ROVAC⁽³³⁾。

2.5.4 其他的移动机器人

为了特殊的目的，研究了各种各样的移动机器人机构。图2.58所示是能在壁上爬行的机器人的例子，图 (a) 所示是用吸盘交互地吸附在壁上来移动的，图 (b) 所示的滚子

是磁铁，当然壁面一定是磁性体才行。图2.59所示是车轮和脚并用的机器人，脚端装有球形转动体，除了普通行走之外，可以在管内把脚向上方伸，用管断面上的3个点支持移动，也可以骑在管子上沿轴向或圆周方向移动。其他还有，次摆线机构推进移动车，用辐条突出的3轮车登台阶的轮椅，用压电晶体，形状记忆合金驱动的移动机构等，但当前还缺乏实用性。

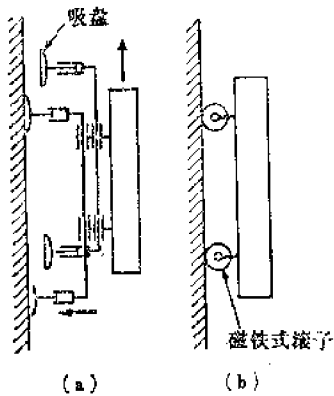


图 2.58 能在壁面上爬行的机器人

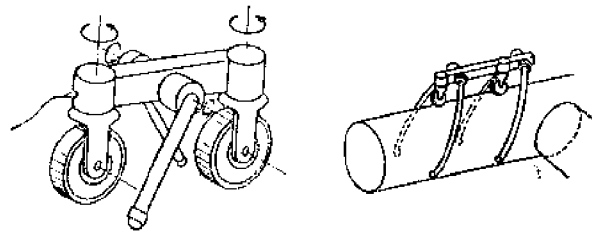


图 2.59 车轮和脚混合式的移动机器人Merite (IPRIV) (34)

参 考 文 献

- (1) Paul, R. P.: "Robot Manipulators", MIT Press (1981).
- (2) Takano, M., Yashima, K. and Yada, S.: "Development of Computer Simulation System of Kinematics and Dynamics of Robot", J. Fac. Eng. Univ. Tokyo B, 36, 4, p. 677 (1982).
- (3) Umetani, Y. and Suzuki, H.: "Piezo-electric micro-manipulator in multi-degrees of freedom with tactile sensibility", Proc. 10th ISIR, p. 571 (1980).
- (4) 三輪敏之, 井口信洋, 本間大, 西村俊則: "形状記憶効果によるマイクロエビュレータ", 昭57年度精機学会秋季講演会論文集, p. 919.
- (5) Asada, H., Kanade, T. and Reddy, R.: "Design concept of direct-drive manipulators using rare-earth DC torque motors", Proc. 11th ISIR, p. 629 (1981).
- (6) Kersten, L.: "The Lemma concept: A new manipulator", Mech. & Mach. Theory, 12, 1, p. 72 (1977).
- (7) 日経メカニカル, 119, p. 60 (昭57-07-19).
- (8) 日経メカニカル, 130, p. 57 (昭57-12-20).
- (9) 高瀬国克, 井上博允: "クラッチサーボを用いたロボットの腕", バイオメカニズム, 2, p. 144 (昭48).
- (10) US Patent 4 259 876.
- (11) 広瀬茂男, 高橋公一, 梅谷陽二: "柔軟能動体に関する研究", 第15回 SICE 学術講演会前刷集, p. 371 (昭51).
- (12) 加藤一郎編: "図解メカニカルハンド", p. 37, 工業調査会 (昭52).
- (13) Chen, F.: "Force analysis and design considerations of grippers", Ind. Robot, 9, 4, p. 243 (1982).
- (14) 加藤一郎編: "図解メカニカルハンド", p. 171, 工業調査会 (昭52).
- (15) Rovetta, A.: "On specific problems of design of multipurpose mechanical hands in industrial robots", Proc. 7th ISIR, p. 337 (1977).
- (16) Hirose, S. and Umetani, Y.: "The development of soft gripper for the versatile robot hand", ibid., p. 353.
- (17) 岡田徳次: "柔軟性のある人工の手", バイオメカニズム, 4, p. 241 (昭53).
- (18) Whitney, D. E. and Nevins, J. L.: "What is the remote center compliance (RCC) and what can it do?", Proc. 9th ISIR, p. 135 (1979).

- (19) 小森谷 清：“車輪方式移動メカニズムとナビゲーション”，ロボット設計ハンドブック（機械と工具別冊），p. 47（昭57）。
- (20) Nakano, E. and Koyachi, N.: "An advanced mechanism of the omni-directional vehicle (ODV) and its application to the working wheelchair for the disabled" Proc. '83 ICAR, p. 277 (1983).
- (21) 日経メカニカル, 139, p. 37 (昭58-04-25).
- (22) 高野政時, 谷 史郎, 米沢宏敏：“移動ロボット TO-ROVER の開発研究”，精密機械, 49, 11, p. 1572 (昭58)。
- (23) 加藤一郎, ほか：“足（人間型油圧歩行機械）”，バイオメカニズム, 2, p. 175 (昭48)；“2足歩行機械システムの研究”，バイオメカニズム, 6, p. 252 (昭57)。
- (24) McGee, R. B.: "Control of legged locomotion systems", Proc. Jt. Auto. Cont. Conf. 1, 2, p. 205 (1977).
- (25) Tomović, R. (加藤一郎訳)：“人間の手足の制御”，p. 242, 学研社 (昭43)。
- (26) 機械研ニュース, No. 6, p. 1 (昭54)。
- (27) 山瀬茂男, 梅谷陽二：“4足歩行機械の基本的運動調整系の構成と歩行実験”，計測自動制御学会論文集, 6, 5, p. 133 (昭53)。
- (28) Ozaki, N., Suzuki, M. and Ichikawa, Y.: "Tele-operated mobile robot", Proc. '83 ICAR, p. 67 (1983).
- (29) Taniguchi, K., Ikeda, K. and Matsumoto, S.: "Four-legged walking machine", Proc. 2nd Romancy, p. 162 (1977).
- (30) McGee, R. B.: "Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain", IEEE Trans. Syst., Man & Cybern., SMC-9, 4, p. 176 (1979).
- (31) Heki, H., Kubo, K. and Maeda, Y.: Proc. 1982 ANS Winter Meeting, p. 297.
- (32) Kühler, G. W.: "Stand der Fernbedienungs-Technik", Proc. 8th ISIR, p. 805 (1978).
- (33) Iwamoto, T., Yamamoto, H. and Honda, K.: "Transformable crawler mechanism with adaptability to terrain variations", Proc. '83 ICAR, p. 285 (1983).
- (34) Vertut, J., Marchal, P., Corfa, Y. and Francois, D.: "Vehicles with wheels and legs. The in pipe remote inspection vehicle and his family", Proc. 3rd Romancy, p. 476 (1978).
- (35) 浅間 一：“保全を目的とする構造可変マニプレータの開発研究”，東京大学工学部精密機械工学科昭58年度修士論文。

第3章 机器人的控制

广泛研究的机器人的控制，有如图3.1所示的控制方式。因为有关程序、示教、机械等内容在其它章节里叙述，所示在本章仅就动作轨道的生成、伺服系统等，即图3.1中用虚线围起来的部分作叙述。

3.1 控制要素

构成控制系统的要素，有如图3.2所示的操作机器人控制对象的驱动系统（电动机、减速器、驱动电动机的放大器等），检测机器人状态的测量系统（码盘、转速器等）。本节将叙述这些要素的构成和工作原理。

3.1.1 驱动器⁽¹⁾

作为驱动机器人的动力，多数使用电力，油压、气压。其中，使用方便、控制特性也好，现在最常使用的是电动机。

直流伺服电机的典型结构如图3.3所示。实际的电动机、随磁铁、线圈数等的增加，因旋转角不同而旋转力的变动就消失，旋转力也增大。其它的不管哪一种电动机，也同直流伺服电机一样，都是磁场中的转子线圈有电流流过时，会产生电磁力，使得它们旋转。

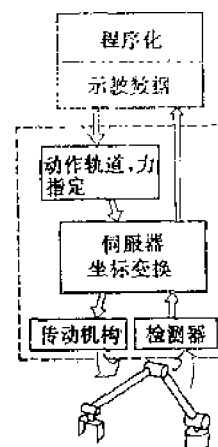


图 3.1 机器人的控制系统

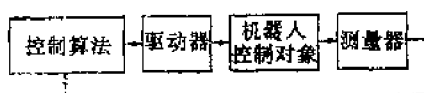


图 3.2 控制系统的构成要素

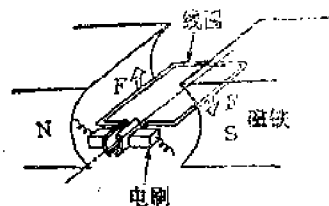


图 3.3 直流电机的构造

这里，首先求直流电动机的传递函数。电动机产生的转矩与转子中的电流 i_a 成正比，即

$$T = K_T i_a \quad (3.1)$$

这里， K_T 是电动机的转矩系数。设转子电路的电阻为 R_a ，电感为 L_a ，转子的反向电动势为 e_b ，那么，输入电压 e_i 和转子电流间的关系如下：

$$e_i = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b \quad (3.2)$$

另外，反向电动势 e_b 与电动机旋转速度 $d\theta/dt$ 成正比，有

$$e_b = K_E \frac{d\theta}{dt} \quad (3.3)$$

这里， K_E 是电动机的速度系数。从上式能得到输出转矩的拉普拉斯变换形式：

$$T(S) = \frac{K_T}{L_a S + R_a} e_i(S) - \frac{K_E S}{L_a S + R_a} \theta(S) \quad (3.4)$$

显然，输出转矩是输入电压和旋转速度的函数。

3.1.2 电动机驱动放大器

因为直流电动机的转子要流经大电流，所以，它的驱动放大器常常是大型的。但是，最近采用脉宽调制（PWM）方式，使大电流容量的放大器容易作成小型的。这里，就脉宽调制放大器（PWM放大器）作简单介绍。图3.4所示的电路是功率500W、大小为 $20 \times$

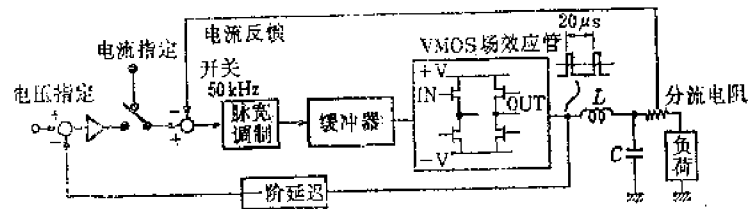


图 3.4 PWM放大电路

20×10 cm的放大器。在额定电流状态下使用时，流经负载的电流用分路电阻检出，与额定值比较，根据比较结果进行开关控制，输出正、负的方波电压。随后，经LC电路滤波。开关的速度是50kHz左右。用晶体管作大电流开关，因工作在ON和OFF两种状态，晶体管上的功率损耗就非常小。作电流控制的情况时，它的响应能近似成具有1ms时间常数的一阶延迟。因此，电动机的输出转矩能表示如下：

$$T(S) = K_T i_a(S) = \frac{K_T}{1 + tS} I(S) \quad (3.5)$$

式中， I 是额定电流， t 是放大器的响应时间常数。

在额定电压工作时，对LC电路前的输出电压，用一阶延迟元件滤波，和负载电流一样进行反馈，控制负载电压。进行电压控制时，式（3.4）的 e_i 被控制。一般放大器的响应能比电动机的响应快得相当多。

3.1.3 减速器

减速器是为增大电动机的输出转矩、为改善控制操作器的加速性能、为提高伺服性能等而使用的。常用的减速器中，有齿轮、谐波驱动器、滚珠丝杠等。滚珠丝杠利用螺丝的旋转变换成直线运动的原理，让滚珠环绕丝杠旋转槽旋转，使摩擦变小。谐波驱动器靠称作阿形齿的内齿齿轮和称作椭圆形齿的有可动性的外齿齿轮的齿数差，实现减速作用。输入轴转一周，齿的啮合点转一周，椭圆形齿仅旋转几齿（通常是2齿）。设圆形齿的齿数

为200，则减速比为1/100。

减速比依据转矩特性、加速特性、伺服特性、最大速度等决定，但其中以考虑加速特性为准，可得到最佳减速比。假设 I_1 、 I_2 各自为电动机端和负载端的惯量，这时，机器人轴的加速度为

$$\ddot{\theta} = \frac{nT}{I_2 + n^2 I_1} \quad (3.6)$$

式中， n 是减速比， T 是电动机的驱动转矩。使得 $\ddot{\theta}/T$ 最大的减速比，从(3.6)式求得，为 $n = \sqrt{I_2/I_1}$ 。实际减速比在这个值附近，也考虑其他各种特性来最后决定。

减速器最简单的功能模型是转矩 n 倍，旋转 $1/n$ 。此外，齿隙、弹性、磁滞、摩擦等也必须考虑，但这里省略。

3.1.4 测量器

作为机器人关节角的检测器，代表性的有码盘、分解器。图3.5、图3.6是它们的构造

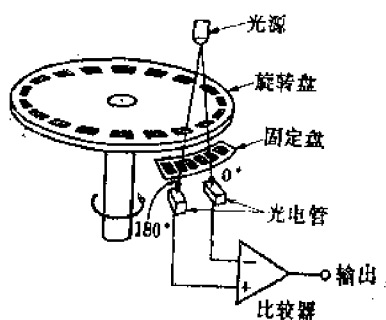


图 3.5 码盘构造原理图

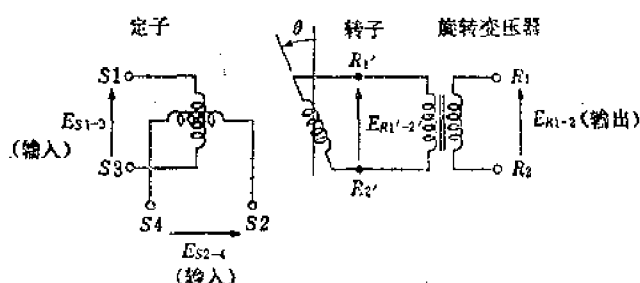


图 3.6 分解器的构造原理图

原理图。如图3.7所示，码盘的轴旋转，产生相差 90° 的A相、B相波形。对这波形微分，在上升沿形成脉冲，由A相、B相的关系，决定正转、反转符号。分解器有定子、转子，

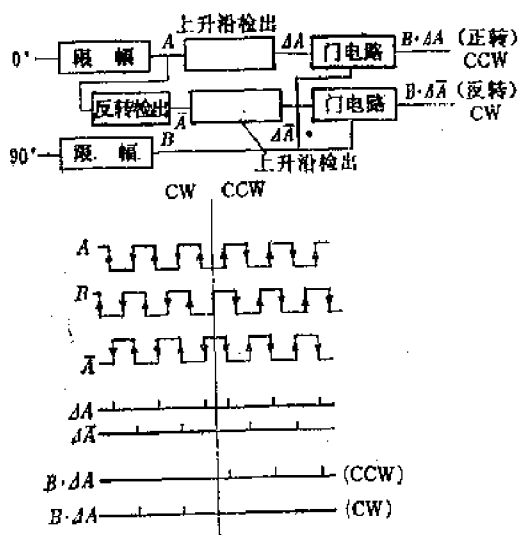


图 3.7 可逆脉冲的形成

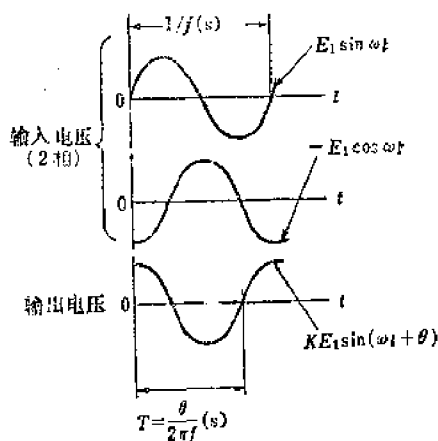


图 3.8 分解器的角度测定

E_1 : 输入电压
 f : 电源频率 (Hz)
 K : 变压比
 ω : $2\pi f$
 t : 时间 (s)
 θ : 轴角度 (rad)

定子中的两个正交线圈决定旋转磁场，放置在该磁场中的转子线圈产生电压相位差，能标出旋转角，如图3.8所示。

代表性的速度检测器是转速传感器。它的原理是利用直流电动机的旋转轴一旋转，转子线圈中就产生电压的现象做成的，构造也基本与直流电动机一样。每隔一定间隔测量码盘的输出脉冲数，也可以测出速度。

用码盘测角度和角速度时，会发生量化误差。另外，给出角速度的时候也包含有延迟时间。

3.2 关节的伺服系统

3.2.1 伺服系统的方框图

考虑由上述控制要素组合构成关节伺服器。这里设用1:n的减速器，围绕电动机的机器人轴的等效惯性

$$I_M = n^2 I_M' \quad (3.7)$$

式中， I_M' 是电动机端的惯量。另外，电动机的生成转矩也为n倍。系统的运动方程

$$(I_M + I_L) \ddot{\theta} = nT \quad (3.8)$$

式中， I_L 是机器人手臂端的惯量， T 是电动机的输出转矩，使用电流控制的放大器时，用式(3.5)、(3.8)画出系统的方框图，如图3.9所示。 K_V 、 K_E 分别是关于速度和位置的反馈增益。使用电压控制的放大器时，用式(3.4)得图3.10的方框图。

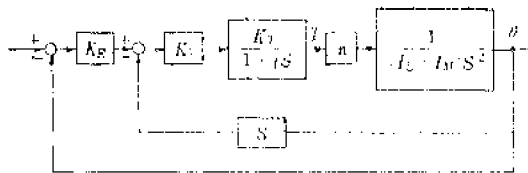


图 3.9 基于电流控制的伺服系统

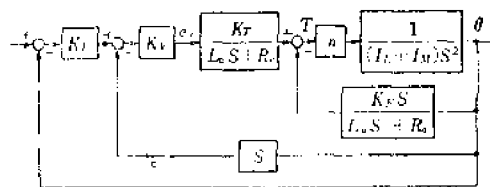


图 3.10 基于电压控制的伺服系统

在一定时间(L)内对码盘产生的输出脉冲计数作为速度信息的场合，图3.11引入了用于过去信息的延迟时间。这时，速度反馈环路中必须插入 $e^{-\frac{L}{s}}$ 。另外，用微机处理控制信息时，也引入延迟时间。

3.2.2 速度控制系统

对伺服系统，第一重要的是速度反馈控制系统的稳定性。假如把系统作为单一的二阶系统处理，那速度反馈增益(K_V)作得多么高，系统也是稳定的。实际上，若系统是三阶以上，延迟时间的影响也必须考虑。因此，找出 K_V 的临界值是重要的。

以图3.12为例，考虑速度反馈控制系统中 K_V 值的决定问题。 K_V 、 K_T 、 n 合起来用 K_V' 表示， K_V' 的单位是 $N \cdot m / \text{rad/s}$ ，即转矩/转速。这里决定速度反馈增益时，只考虑电动机的惯量，其详细理由省略。这样，系统的传递函数是 $K_V' / 15S (1 + 0.001S)$ 。 $1/15S (1 + 0.001S)$ 的伯德(Bode)图是图3.13的实线。

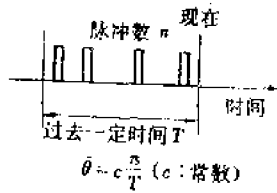


图 3.11 速度的计算

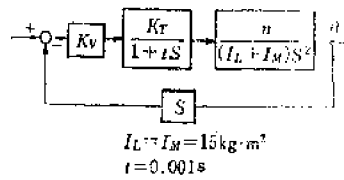


图 3.12 速度反馈控制系统

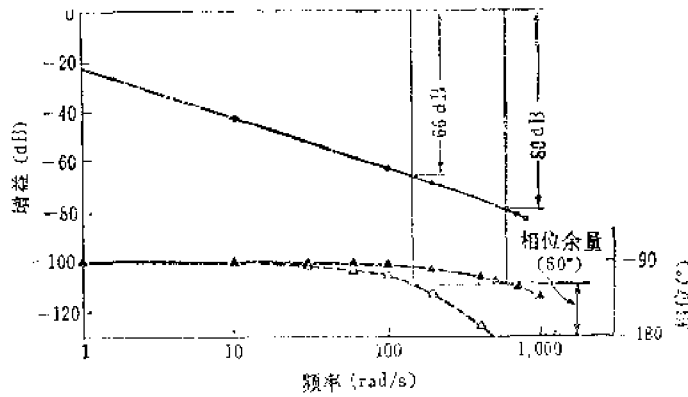


图 3.13 速度反馈控制系统的Bode图

若相位余量为 60° ，这时频率约为 570rad/s 。把 60° 相位余量点的增益看成是1，即 0dB ，从图3.13可知， K_V' 约为 80dB ，也就是 $10,000\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad/s}$ 。其次，考虑对码盘 5ms 间隔中输出的脉冲计数作为速度信息的情况。这时，引入速度反馈环路中延迟时间因子 $e^{-LS/2}$ ，相位图是图3.13中的虚线。相位余量为 60° 的频率大约是 150rad/s ， K_V' 为 66dB ，即 $1995\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad/s}$ 。

对位置反馈增益 K_E ，用上面求出的 K_V' ，整理速度反馈系统，构成图3.14的框图，求出位置控制环路的传递函数，照上述同样的方法设计就行。

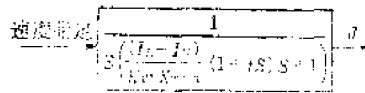


图 3.14 速度控制系统的传递函数

以上，叙述了带有减速器的关节控制系统。下面论述不用减速器的、靠直接驱动的伺服系统⁽⁶⁾。用减速器有各种优点，也有多种缺点。例如，因摩擦力传递的不确定性、齿隙、弹性、磁滞等引起的位置传递的不确定性，因高减速比引起的最大速度不够，维护的好坏等。下面我们看看把电动机转子直接装在机器人关节轴上的直接驱动方式。

直接驱动方式也有种种问题，但这里只考虑作为伺服系统的问题。从伺服的观点看，直接驱动方式的特点是电动机的等效惯性比起机器人手臂的惯性来非常小。机器人关节的驱动模型如图3.15所示。引用弹簧把电动机的惯性与手臂的惯性连起来。这是造成比较容易变形的机器人单臂结构的原因。假设这模型中输入是电动机的驱动转矩，输出是电动机轴的旋转角，那输入输出之间的传递函数 $G(S)$ 为

$$G(S) = \frac{S^2 + \frac{K}{I^2}}{I_1 S^2 [S^2 + (\frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2})K]}$$

若用码盘的时间差分来进行速度反馈，速度控制系统的方框图如图3.16所示。这里， $I_1 =$

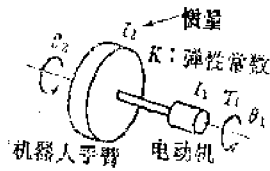


图 3.15 关节驱动模型

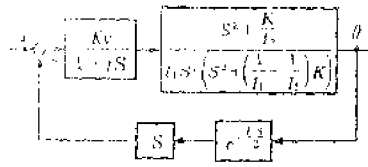


图 3.16 直接驱动的速度控制系统

$0.15\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ， $I_2 = 15\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ， $K = 4.52 \times 10^4 \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ， $L = 5\text{ms}$ ， $t = 1\text{ms}$ 时，系统传递函数的相位曲线是图3.17中的实线。把传递函数分解成 Kv' 、 S 、 $\frac{1}{1+tS}G(S)$ 来表示，增益曲线就如图3.17上半部的实线。 $20 \log \left| \frac{G(S)}{1+tS} \right|$ 和 $-20 \log |S|$ 曲线之间的距离相当于传递函数增益为 0dB 时 $20 \log Kv'$ 的值。从图3.17可知 $G(S)$ 有谐振点。要电动机的惯量小，谐振频率就要相当高。通常在它附近引起相位交变(相位延迟 180°)。有弹簧效果的部分没有

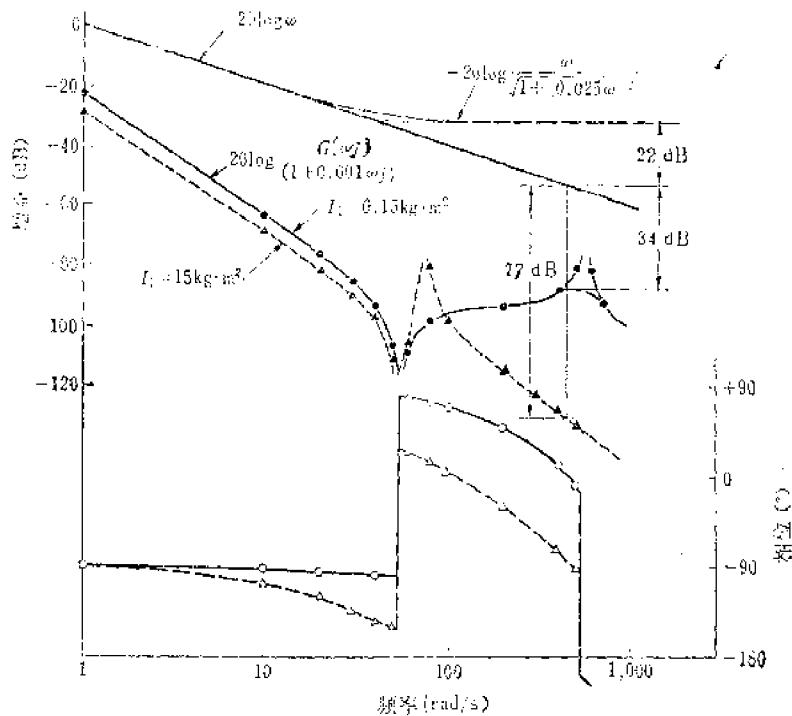


图 3.17 直接驱动的速度控制系统的Bode图

振荡衰减特性，谐振幅度无限大，系统不稳定，而实际上，具有相当大的衰减特性，谐振点附近的增益用图3.17的间断线所示，是饱和的。本例中， Kv' 的稳定临界值是约 34dB 。若增益余量为 10dB ， Kv' 为 24dB ，即 $15.84 \text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{s}$ 。显然，这个值与使用减速器的前述例比较是非常小的。

对于该系统，使用1:10的减速器，其电动机的等效惯性为100倍时， $\frac{1}{1+tS}G(S)$

的增益曲线由虚线给出。这时，相位交点约是 $\omega = 450\text{rad/s}$ ， $K_{V'}$ 的稳定临界值约为77dB，比不用减速器的场合高约40dB。

作为改善直接驱动的速度控制系统特性的好方法，是在速度反馈环路引入低通滤波器。这里叙述关于使用一阶延迟元件提高速度反馈增益的方法。设一阶延迟的时间常数 $t = 25\text{ms}$ 。这时，传递函数的相位曲线是图3.17的虚线，代替 S 的 $S/(1+0.025S)$ 的增益是增益曲线中的虚线。应该注意，尽管引入了一阶延迟元件，相位交点的位置几乎没有变化，但这点的 $K_{V'}$ 值，即 $K_{V'}$ 的临界值大幅度地被改善(22dB)。直接驱动的伺服方式还在研究中，靠使用最佳的滤波器进行变形小的构造设计、开发能适应实际使用条件的控制系统。

3.2.3 位置控制系统

因为位置控制系统的响应频率低，可以忽略在高频区的特性变化，如图3.18那样能近似为二阶系统。这里把代表重力转矩的外扰转矩 T_g ，也考虑进去。调整速度控制系统用方框图表示，如图3.19。输入输出间的误差 $\theta - \theta_r$ 的拉普拉斯变换如下：

$$e = \theta - \theta_r = - \{ (IS^2 + K_V S) / (IS^2 + K_V S + K_V \cdot K_E) \} \theta_r + T_g / (IS^2 + K_V S + K_V \cdot K_E) \quad (3.9)$$

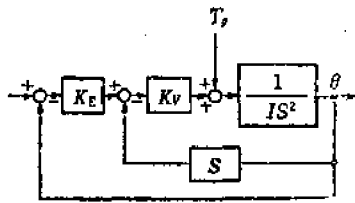


图 3.18 位置控制系统

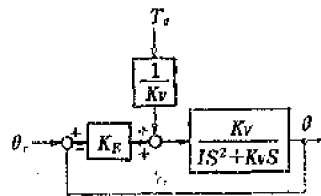


图 3.19 速度反馈环路

它的特征方程式是

$$IS^2 + K_V S + K_V \cdot K_E = 0 \quad (3.10)$$

它的根决定了这个系统的响应特性。若衰减系数为1，即有重根，由 $K_V^2 - 4K_V K_E = 0$ 得 $K_E = K_V/4$ 。

现在研究稳态误差。设 θ_r 为阶跃输入，稳态误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} e$ 是

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{S \rightarrow 0} -S \{ (IS^2 + K_V S) / (IS^2 + K_V S + K_V \cdot K_E) \} \frac{1}{S} = 0 \quad (3.11)$$

若 θ_r 是斜率一定的速度输入，稳态速度误差是

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{S \rightarrow 0} -S \{ (IS^2 + K_V S) / (IS^2 + K_V S + K_V \cdot K_E) \} \frac{1}{S^2} = 1/K_E \quad (3.12)$$

显然，与位置反馈增益成反比。若 θ_r 为一定加速度输入，误差是发散的。实际使用时，由于加减速是断续进行的，不会有大的问题。

考虑重力转矩 T_g 是阶跃的，因加上 T_g 引起的误差为

$$\lim_{s \rightarrow \infty} e = \lim_{s \rightarrow \infty} -S \{T_g / (JS^2 + K_V S + K_V \cdot K_E)\} \frac{1}{s} = T_g / K_V \cdot K_E \quad (3.13)$$

3.3 多自由度系统的控制算法

3.2节叙述了机器人各关节的伺服方式。本节叙述各关节的动作怎么协调，怎么实现机器人整体的协调动作。

3.3.1 轨道的生成

最简单的是点对点的移动，在轨道上指定的各点停止的情况，如图3.20所示给予了各关节角 $\theta_i (i=1 \sim 6)$ 各点的值。从中取出一区间，如图3.21所示给出了各关节角的两端点。问题是这两点间怎么内插呢？通常简单的作法是用直线把两点连接起来。把这区间分成 N 等分，设第 n 个等分点的角度为 $\theta_i(n)$ ，为

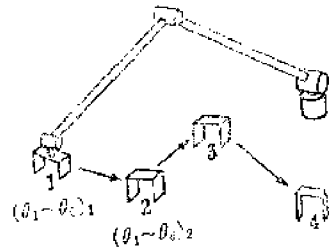


图 3.20 点对点动作

$$\theta_i(n) = \theta_{iA} + \left(\frac{\theta_{iB} - \theta_{iA}}{N} \right) n \quad (i=1 \sim 6) \quad (3.14)$$

θ_{iA} 、 θ_{iB} 各自是 θ_i 在那区间的初值和终值。

下面叙述同样是点对点的动作，但在各点不停止，一气从最初点移动到最终点的方法。更主要的是动作的圆滑。圆滑动作在轨道上所有点的位置、速度、加速度都是连续的。如图3.22所示，给出了各时刻点的关节角。为把这些点圆滑的连结，要把各区间的轨道用时间 t 的多项式来表示。第1区间和最后区间用4阶多项式，其余的区间都用3阶的多项式表示。有 N 个区间时，多项式的参数数目有

$$5 \times 2 + 4(N - 2) = 4N + 2$$

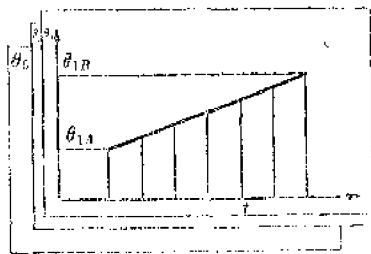


图 3.21 关节角的内插

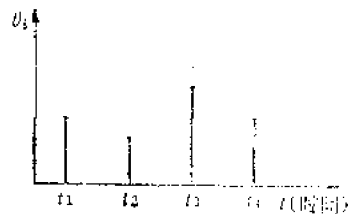


图 3.22 轨道的规划

从连续性条件可知，在出发点和到达点，位置被指定，速度和加速度为0。在各点两侧多

项式的与被指定的角度必须一致。另外，在各点两侧多项式的一阶微分（速度）、二阶微分（加速度）也必须一致。以上的条件的数目是

$$6 + 2(N + 1 - 2) + 2(N + 1 - 2) = 4N + 2$$

这与多项式的参数数目一致。各参数值由解联立一阶方程组得到。

以图3.23为例求多项式的参数。问题是设计最初是 0° ，1s后 90° ，2s后 45° ，3s后停止在 -45° 的轨道。它的多项式建立如下：

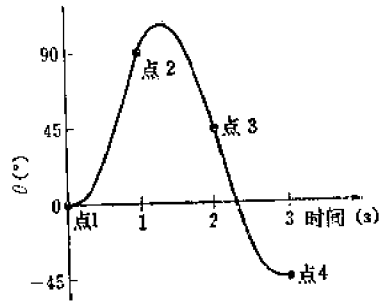


图 3.23 轨道规划例

$$\left. \begin{array}{l} \text{区间 1 } [0 \sim 1 \text{ 秒}] \quad \theta = a_{11}t^4 + a_{12}t^3 + a_{13}t^2 + a_{14}t + a_{15} \\ \text{区间 2 } [1 \sim 2 \text{ 秒}] \quad \theta = a_{22}t^3 + a_{23}t^2 + a_{24}t + a_{25} \\ \text{区间 3 } [2 \sim 3 \text{ 秒}] \quad \theta = a_{31}t^4 + a_{32}t^3 + a_{33}t^2 + a_{34}t + a_{35} \end{array} \right\} \quad (3.15)$$

为简单，各多项式的时间 t 以各区间的开始为起点（ $t=0$ ）。

对上式微分得到速度和加速度：

$$\left. \begin{array}{l} \text{速度 区间 1} \quad \dot{\theta} = 4a_{11}t^3 + 3a_{12}t^2 + 2a_{13}t + a_{14} \\ \text{区间 2} \quad \dot{\theta} = 3a_{22}t^2 + 2a_{23}t + a_{24} \\ \text{区间 3} \quad \dot{\theta} = 4a_{31}t^3 + 3a_{32}t^2 + 2a_{33}t + a_{34} \end{array} \right\} \quad (3.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{加速度 区间 1} \quad \ddot{\theta} = 12a_{11}t^2 + 6a_{12}t + 2a_{13} \\ \text{区间 2} \quad \ddot{\theta} = 6a_{22}t + 2a_{23} \\ \text{区间 3} \quad \ddot{\theta} = 12a_{31}t^2 + 6a_{32}t + 2a_{33} \end{array} \right\} \quad (3.17)$$

在点1，从角度、速度和加速度条件，有

$$a_{15} = 0, \quad a_{14} = 0, \quad a_{13} = 0$$

从区间1多项式的点2（ $t=1$ ）的角度条件，有

$$a_{11} + a_{12} = 90$$

从区间2多项式的点2（ $t=0$ ）的角度条件，有

$$a_{25} = 90$$

从点2区间1多项式和区间2多项式的速度和加速度的连续性条件，有

$$a_{24} = 4a_{11} + 3a_{12}$$

$$2a_{23} = 12a_{11} + 6a_{12}$$

其次，从区间2多项式在点3（ $t=1$ ）的角度条件，有

$$a_{22} + a_{23} + a_{24} + 90 = 45$$

从区间3多项式在点3（ $t=0$ ）的角度条件，有

$$a_{35} = 45$$

从点3区间2、区间3多项式的速度和加速度的连续性条件，有

$$a_{34} = 3a_{22} + 2a_{23} + a_{24}$$

最后，从区间3多项式在点4 ($t=1$) 的位置、速度和加速度条件，有

$$\begin{aligned} a_{31} + a_{32} + a_{33} + a_{34} + 45 &= -45 \\ 4a_{31} + 3a_{32} + 2a_{33} + a_{34} &= 0 \\ 12a_{31} + 6a_{32} + 2a_{33} &= 0 \end{aligned}$$

解这联立方程组，能得到 $a_{11} = -157.5$, $a_{12} = 247.5$, $a_{22} = 45$, $a_{23} = -202.5$, $a_{24} = 112.5$, $a_{25} = 90$, $a_{31} = -112.5$, $a_{32} = 247.5$, $a_{33} = -67.5$, $a_{34} = -157.5$, $a_{35} = 45$ 。其它的参数是0。各区间的多项式就为

$$\left. \begin{aligned} \text{[区间 1]} \quad \theta &= -157.5t^4 + 247.5t^3 \\ \text{[区间 2]} \quad \theta &= 45t^5 - 202.5t^4 + 112.5t^3 + 90 \\ \text{[区间 3]} \quad \theta &= -112.5t^4 + 247.5t^3 - 67.5t^2 - 157.5t + 45 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

图3.23是这些多项式的图示，得到的是圆滑的轨道。

3.3.2 用软件伺服的系统补偿⁽⁷⁾

在3.2.3节，给出了位置控制系统存在的种种误差。为使机器人的控制得到提高，消除这些误差因素是重要的。从前，用固定电子电路的伺服算法进行复杂的补偿是非常困难的，但最近用微型机的软件伺服算法，那就变得可能。软件伺服是计算机直接指定电动机的驱动力及类似的操作量的方式，这能给予伺服系统构成以极大的适应性。

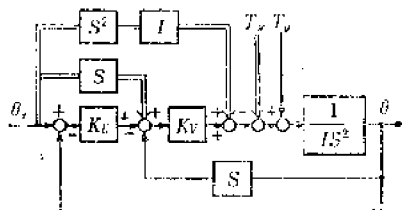


图 3.24 加速各种补偿的伺服系统

图3.24给出了误差的因素，并附加了为消除由重力转矩 T_g 、加速度、速度引起的误差的反馈环路和前馈环路（双线部分）。如果输入函数 θ ，用多项式的形式给出，速度 $S\theta$ ，和加速度 $S^2\theta$ ，就能很容易地求出。而关于基于机器人各关节值计算 I 、 T_g 在以后叙述。关于这个系统的误差方程式是

$$(IS^2 + K_vS + K_v \cdot K_t)(\theta - \theta_r) = 0 \quad (3.19)$$

误差的因素全被消除。

其次，响应的动态特性由如下特征方程支配。

$$IS^2 + K_vS + K_v \cdot K_t = 0 \quad (3.20)$$

这里应注意，惯量 I 随机器人手臂的取形 [θ_i ($i=1\sim 6$) 的值] 不同变化大。结果，伺服系统的响应因手臂的状态有时会出现振荡。为改善这点，使响应的动态特性不依手臂的状态改变，要让增益如图3.25所示那样自适应变化。所以，关于误差的方程式为

$$(S^2 + K_vS + K_t \cdot K_e)(\theta - \theta_r) = 0 \quad (3.21)$$

仅由 K 和 K_e 值决定的动态特性会变得总保持着。

要进行以上那样的补偿， T_g 、 I 的计算变得不可欠缺。对此，有必要建立系统的运动

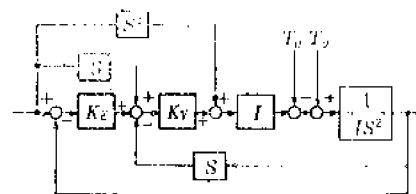


图 3.25 让增益自适应变化的伺服系统

方程式。因动态特性在第2章叙述过了，详细的请参考那章，这里从围绕各关节轴的运动方程式出发， T_{σ} 、 I 的计算法也就明白了。

$$T_i = \sum_{j=1}^6 a_{ij} \ddot{\theta}_j + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 b_{ijk} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + T_{\sigma i} \quad (i=1\sim 6) \quad (3.22)$$

这里， T_i 是各关节转矩（力）， $\dot{\theta}_i$ 、 $\ddot{\theta}_i$ 是各关节变量的速度和加速度， a_{ij} 是惯性系数， b_{ijk} 是离心力、动量力等的系数， $T_{\sigma i}$ 是各关节的重力转矩， a_{ij} 、 b_{ijk} 、 $T_{\sigma i}$ 是 $\theta_1 \sim \theta_6$ 的函数。这样，控制的力学系统为各关节相关的非线性系统。

这里把式(3.22)简化成能用于控制的形式。首先，因离心力、动量力在速度不太大时没影响而忽略。下面，设各关节间的没有干扰，并 $a_{ij}=0$ ($i \neq j$)，式(3.22)为

$$T_i = a_{ii} \ddot{\theta}_i + T_{\sigma i} \quad (3.23)$$

回到 I 的决定问题，可知图3.25中的 I 能用 a_{ii} 来近似。从上靠实时计算是 $\theta_1 \sim \theta_6$ 函数的 a_{ii} 和 $T_{\sigma i}$ ，能构成图3.25的自适应伺服系统。另外，当那样高速实时计算不可能时，把在轨道上各点的 a_{ii} 和 $T_{\sigma i}$ 值预先计算出来，执行时参照它，代入伺服系统的参数中，也能实现同样的控制。

考虑图3.26所示的简单又自由度的系统。

姿态的运动方程式是

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{5}{3} ml^2 \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3} ml^2 \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2} mgl \\ T_2 &= \frac{1}{3} ml^2 \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3} ml^2 \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2} mgl \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

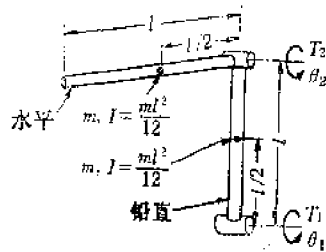


图 3.26 二自由度操作器的例

这里，速度的二次项省略了。有 $a_{11} = \frac{5}{3} ml^2$ ， $a_{22} = \frac{1}{3} ml^2$ ， $T_{\sigma 1} = -\frac{1}{2} mgl$ ， $T_{\sigma 2} =$

$-\frac{1}{2} mgl$ 。因此，第1关节的重力平衡转矩用 $-\frac{1}{2} mgl$ ，消除加速度误差的转矩用 $\frac{5}{3} ml^2 \ddot{\theta}$ ，

I 用 $\frac{5}{3} ml^2$ 为好。按适当的时间间隔进行这样的计算，能实现自适应伺服系统。

3.3.3 坐标变换

到此为止的论述，都是给定了在各移动点的关节角值之后的控制问题。接下来必须考虑怎么给出各关节角呢？教育、工作机器人的场合，操作员让控制器实际动作，在必要点停止并读取该处各关节的值。对连续总线方式，把轨道作为各关节角的时间模型记住为好。但是，这方法有几个缺点。有效利用人造眼睛等传感器来的位置信息难，在工作坐标系，例如固定在工作台的直角坐标系，示教直线运动、圆弧运动等非常难，就是缺点。在工作坐标系中，用固定在控制器前端（手）的坐标系的态度和原点位置来表示运动的方法有普遍性，人们也容易明白，如图3.27所示。这里叙述用工作坐标系的位置、姿态表示法和从工作坐标系向关节坐标系的坐标变换。

表示坐标系的位置和姿态用仿射变换⁽⁶⁾方便。仿射变换（以后仅叫变换）如图3.28

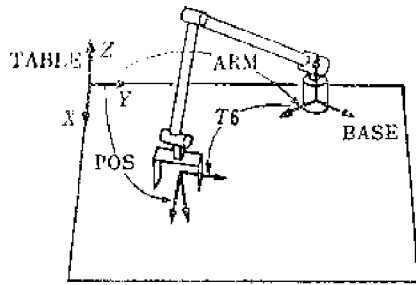


图 3.27 工作坐标系

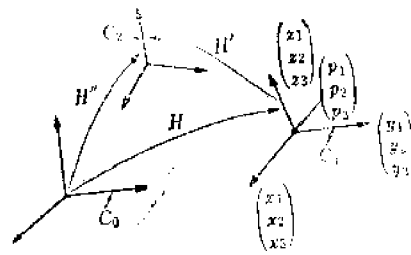


图 3.28 仿射变换

所示，有坐标系 C_1 用

$$H = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & p_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & p_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

的 4×4 阶矩阵表示。这里， $(x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ 、 $(y_1 \ y_2 \ y_3)^T$ 、 $(z_1 \ z_2 \ z_3)^T$ 是从坐标系 C_0 看坐标系 C_1 的3轴方向的单位矢量； $(p_1 \ p_2 \ p_3)^T$ 是 C_1 的原点坐标； T 是表示转置。考虑从坐标系 C_1 看坐标系 C_2 ，其变换是

$$H' = \begin{bmatrix} x_1' & y_1' & z_1' & p_1' \\ x_2' & y_2' & z_2' & p_2' \\ x_3' & y_3' & z_3' & p_3' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

设从坐标系 C_0 看坐标系 C_2 的3轴方向的单位矢量为 $(x_1'' \ x_2'' \ x_3'')^T$ 、 $(y_1'' \ y_2'' \ y_3'')^T$ 、 $(z_1'' \ z_2'' \ z_3'')$ ，从 C_0 看 C_2 的位置、姿态能用下式计算：

$$\left. \begin{aligned} x_1'' &= x_1'x_1 + x_2'y_1 + x_3'z_1 \\ x_2'' &= x_1'x_2 + x_2'y_2 + x_3'z_2 \\ x_3'' &= x_1'x_3 + x_2'y_3 + x_3'z_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1'' &= y_1'x_1 + y_2'y_1 + y_3'z_1 \\ y_2'' &= y_2'x_2 + y_2'y_2 + y_3'z_2 \\ y_3'' &= y_3'x_3 + y_3'y_3 + y_3'z_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

$$\left. \begin{aligned} z_1'' &= z_1'x_1 + z_2'y_1 + z_3'z_1 \\ z_2'' &= z_2'x_2 + z_2'y_2 + z_3'z_2 \\ z_3'' &= z_3'x_3 + z_3'y_3 + z_3'z_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

原点的位置坐标 p_1'' 、 p_2'' 、 p_3'' 为

$$\left. \begin{aligned} p_1'' &= p_1 + p_1'x_1 + p_2'y_1 + p_3'z_1 \\ p_2'' &= p_2 + p_1'x_2 + p_2'y_2 + p_3'z_2 \\ p_3'' &= p_3 + p_1'x_3 + p_2'y_3 + p_3'z_3 \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

因此，从坐标系 C_0 到坐标系 C_2 的变换 H'' 能记为

$$H'' = H * H' \quad (3.31)$$

式中，*表示4×4阶矩阵乘法。这样，用相似变换表示坐标系的位置、姿态，坐标系间的关系就能简洁地表示出来。

如图3.27所示，设从工作坐标系TABLE到操作器基座坐标系的变换为ARM，基座坐标系到手指头的坐标系的变换为 T_0 ，从工作坐标系直接到手指头坐标系的变换为POS，如下关系成立：

$$POS = ARM * T_0 \quad (3.32)$$

假若用POS给出了控制器最前端的位置、姿态，由下式能得到6个关节角的函数的 T_0 ：

$$T_0 = ARM^{-1} * POS \quad (3.33)$$

其中，ARM必须由定标决定。

现在考虑，得到 T_0 后求解关节角。因坐标变换的基本内容已在第2章叙述过，这里就举简单的例题。考虑图3.29所示的3自由度的手臂。 T_0 的 P_1 、 P_2 、 P_3 是从基座(BASE)坐标系看手臂最前端的位置坐标。用它求解 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 为

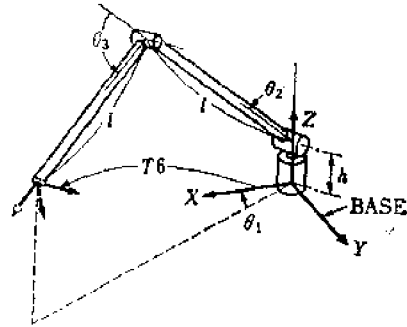


图 3.29 关节角的变换

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \tan^{-1}(p_2/p_1) \\ \theta_3 &= \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2l^2} (p_1^2 + p_2^2 + (p_3 - h)^2) - 1 \right\} \\ \theta_2 &= \tan^{-1} (\sqrt{p_1^2 + p_2^2} / (p_3 - h)) - \theta_3/2 \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

$T_0 \rightarrow \theta_i$ 的坐标变换，仅在具有单纯几何结构的场合，才能进行代数求解。一般必须解高次代数方程式，非常困难。

以上进行了 $POS \rightarrow T_0 \rightarrow \theta$ 的坐标变换。假如准备好了各种变换办法，随后若给与了POS，就能控制操作器。假若给与了 $POS_1, POS_2, \dots, POS_N$ ，在工作坐标系上的位置、姿态值序列变换成各自对应的关节值序列，能进行3.3.1节叙述过的轨道控制。为实现工作坐标系上的轨道控制，无论按适当间隔在轨道上取点，也必须对所有的点作坐标变换。为此，有必要准备高速的变换系统，或要有记忆预先变换了的 θ 的大容量存储器。

3.3.4 工作坐标系上的轨道生成

工作坐标系上的轨道能考虑成各种各样的，这里考虑，直角坐标系内各点用直线连结，进而对得到的折线轨道的转折点用曲线平滑地连结所生成的轨道，如图3.30所示。连结各点的直线轨道（图3.31）用下式给出：

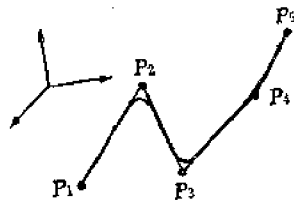


图 3.30 工作坐标系的轨道规划

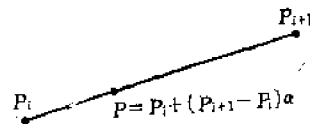


图 3.31 直线轨道的表示

$$P = P_i + (P_{i+1} - P_i) \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3.35)$$

P_i 是第*i*个点的位置矢量， P 是轨道上的位置矢量， α 是轨道参数。 α 作为时间*t*的函数，能决定各时刻的位置。 $\alpha = at$ 时为等速轨道， $\alpha = at^2$ 时为加速度轨道。

现在考虑图3.32所示的用折线平滑连结的轨道， $P_{i-1} - P_i$ 的单位矢量为 a ， $P_i - P_{i+1}$ 的

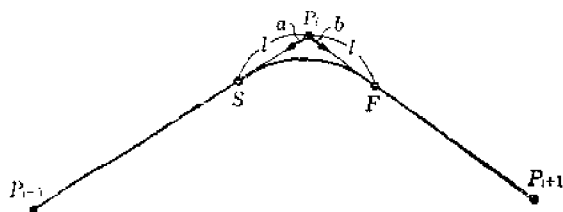


图 3.32 平滑连结折线的轨道

单位矢量为 b ，从 P_i 到曲线开始点*S*的距离为*l*，从点 P_i 到曲线终点*F*的距离也同样是*l*。另外，曲线从开始到终止的时间为*T*，在*S*点和*F*点的速度为*V*。这时，轨道为

$$P = P_i + b \cdot f(t) + a \cdot f(T-t) \quad (3.36)$$

$$f(t) = (6l - 3T \cdot V) \left(\frac{t}{T}\right)^5 + (-15l + 7T \cdot V) \left(\frac{t}{T}\right)^4 + (10l - 4T \cdot V) \left(\frac{t}{T}\right)^3$$

在点*S*和点*F*加速度为0，其它条件也全满足。各系数与3.3.1节中轨道的系数计算一样求解。式(3.36)中的上式右边第2项是进入新的直线轨道要的，第3项是让在那儿停止运动要的。

这里讨论一个简单的例。如图3.33所示，设轨道的折线90°相交、 $V = 100\text{cm/s}$ 、 $l = 10\text{cm}$ 、 $T = 0.2\text{s}$ ，这时，有

$$f(t) = -10 \left(\frac{t}{T}\right)^4 + 20 \left(\frac{t}{T}\right)^3 \quad (3.37)$$

这个函数*f(t)*如图3.34所示。

$t = T/2$ 时的速度为

$$f'(t) = -40 \left(\frac{t^3}{T^4}\right) + 60 \left(\frac{t^2}{T^3}\right) = 50 \text{ cm/s}$$

加速度在 $t = T/2$ 时最大，为

$$f''(t) = -120 \left(\frac{t^2}{T^4}\right) + 120 \left(\frac{t}{T^3}\right) = \frac{30}{T^3} = 750 \text{ cm/s}^2$$

对 a 方向和 b 方向，在各时刻各自以 $f(T-t)$ 和 $f(t)$ 的值定标，经矢量求和得到轨道形状(图3.40)。因为 a 与 b 正交， $t = T/2$ 时的速度和加速度为

$$\left| \frac{dP}{dt} \right| = \sqrt{(f'(t))^2 + (f'(T-t))^2} = 70.7 \text{ cm/s}$$

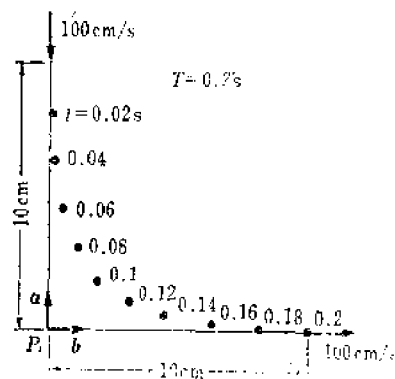


图 3.33 轨道规划的例

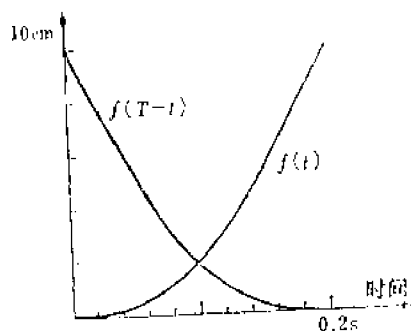


图 3.34 函数*f(t)*

$$\left| \frac{d^2 P}{dt^2} \right| = \sqrt{(\ddot{r}(t))^2 + (\ddot{r}(1-z))^2} = 1060 \text{ cm/s}^2$$

加速度过大时，要调整 T 和 l 使其变小。

3.4 工作坐标系伺服器

到目前为此介绍的控制系统，都是控制各关节的角度和位置的关节伺服器，和建立在此上面的控制系。现在使用的机器人几乎都是基于这种控制系统的东西。各自由度的伺服技术在出现机器人之前就开发出来了，靠应用这些技术发展了机器人技术。作为机器人的伺服方式是不是仅有关节伺服器就充分了呢？答案即能说充分，也能说不充分。回答充分的理由是，现在的机器人几乎所有工作都使用专门的附件，靠认真注意示教训练机器人的移动轨迹来实现。回答不充分的理由是，每当进行新的工作，有必要作非常麻烦的示教训练，单单完成决定位置的机器大概就称得上是机器人了吧。万一让机器人实现人的手臂能进行那样的工作，这里要叙述的工作坐标系伺服器就变得必要起来了。

这里列举几种进行工作是非常重要的，用关节伺服器实现却困难的动作、控制方式：

- ① 在工作空间，力和位置的混合控制⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾。
- ② 部分的人工操作⁽¹¹⁾。
- ③ 基于传感器的各种操作量的调整。

① 对受环境的约束进行动作是不可缺的，例如门的开闭等。通过力的反馈调整位置的动作方式，为可靠性不高的力传感器变为控制系统的中心的难点，不能指望简捷快速动作。开始就应该从门受到约束的方向省去作用力。在工作空间，力和位置，甚至可塑性、粘滞性等适当分配对进行工作都非常重要。

② 对难于自动动作的场合，一部分操作由人进行的情况。向空间某方向运动用手动，其它动作自动的控制方式组合起来进行是必要的。

③ 针对传感器信息的控制，这时有必要准备好适合传感器坐标系方向的各种操作量（位置、力、加速度等）。

这些动作控制方式，不要关节位置伺服器，只构成工作坐标上的直接控制环路，依靠控制电动机的转矩（电流或电压）来作力的基本控制，从而实现。下面叙述这样的工作坐标系伺服器中的三种方法。

3.4.1 生成力矢量的方法⁽¹²⁾

为简单，考虑图3.35所示的有3个自由度的操作器。为控制它前端的力和位置，导入力矢量的生成概念。各关节固定，前端一加力 F 各关节上发生的转矩是

$$T_i = -(\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}) \cdot \mathbf{a}_i = -(\mathbf{a}_i \times \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{F} \quad (i=1 \sim 3) \quad (3.38)$$

式中， \mathbf{r}_i 是关节中心到前端的距离矢量， \mathbf{a}_i 是关节中心轴的单位矢量， \times 表示矢量乘积， \cdot 表示标量乘积。设 $\mathbf{T} = (T_1, T_2, T_3)^T$ ，式(3.38)能改写为

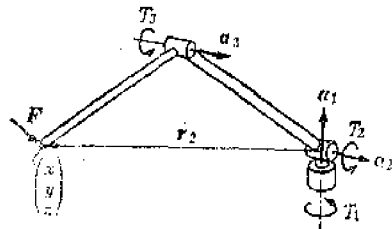


图 3.35 力和转矩的关系

$$\mathbf{T} = - \begin{pmatrix} (\mathbf{a}_1 \times \mathbf{r}_1)^T \\ (\mathbf{a}_2 \times \mathbf{r}_2)^T \\ (\mathbf{a}_3 \times \mathbf{r}_3)^T \end{pmatrix} \mathbf{F} \quad (3.39)$$

式中， $()^T$ 表示转置。这式的系数矩阵为用 J 表示的雅可比矩阵转置，即

$$\mathbf{T} = -J^T \mathbf{F} \quad (3.40)$$

雅可比矩阵是满足如下变量变换关系的矩阵：

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} &= J \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} &= J \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} &= J \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (\dot{\theta}_i = 0 \text{ 时}) \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

如果除去力 \mathbf{F} ，在各关节施加满足式(3.40)的转矩 T_i ($i=1\sim 3$)会怎么样呢？这时，建立运动方程式一看，与关节转矩为0在前端施加 $-\mathbf{F}$ 的力的效果相同。假如固定前端，变成对固定物给予了 $-\mathbf{F}$ 的力。假如不固定就开始加速运动。这就叫做力矢量的生成。若生成的力为 \mathbf{F} ，与转矩 \mathbf{T} 的关系是

$$\mathbf{T} = J^T \mathbf{F} \quad (3.42)$$

操作器的控制方案能靠生成力矢量来直观地描述。设工作坐标各轴的单位矢量为 x, y, z ，设各轴的力成分为 f_x, f_y, f_z 图3.36，工作空间的控制力以

$$\mathbf{F}_1 = f_x \mathbf{x} + f_y \mathbf{y} + f_z \mathbf{z} \quad (3.43)$$

为好。进行位置控制时，生成与位置误差成比例的逆向力矢量为

$$\mathbf{F}_2 = +K_{ex}(x_r - x)\mathbf{x} + K_{ey}(y_r - y)\mathbf{y} + K_{ez}(z_r - z)\mathbf{z} \quad (3.44)$$

K_{ex} 是反馈增益， x_r 是目标值。要稳定的阻力用

$$\mathbf{F}_3 = -K_{vx} \dot{x} \mathbf{x} - K_{vy} \dot{y} \mathbf{y} - K_{vz} \dot{z} \mathbf{z} \quad (3.45)$$

来实现。整个生成的力矢量为

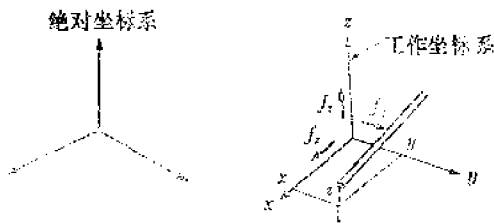


图 3.36 工作坐标系的力矢量

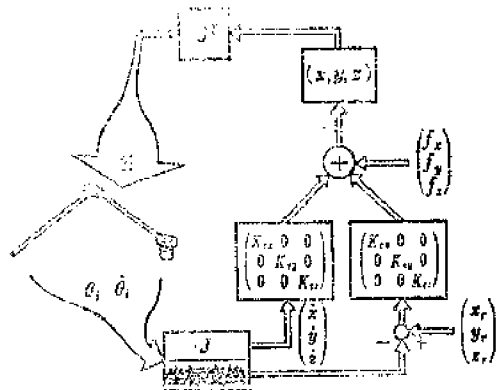


图 3.37 生成力矢量的工作坐标伺服器

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (3.46)$$

决定各系数、增益时，在力控制方向考虑使位置的反馈增益为0是必要的。图3.37所示的是整个伺服系统。

假定操作器的整个质量集中在手指，看位置伺服系统的情况。这时，下式成立。

$$F = m\ddot{x}x + m\ddot{y}y + m\ddot{z}z \quad (3.47)$$

式中， m 是操作器的全部质量。设 X 轴方向作位置控制，为

$$m\ddot{x} = -K_{v\dot{x}}\dot{x} + K_{e\dot{x}}(x_r - x) \rightarrow m\ddot{x} + K_{v\dot{x}}\dot{x} + K_{e\dot{x}}x = K_{e\dot{x}}x_r \quad (3.48)$$

从该式能确认这个位置控制系统是稳定的。

实际的操作器全部质量不会都集中于手指，加速度和关节转矩的关系，式(3.22)用矢量表示，为

$$T = A\ddot{\theta} \quad (3.49)$$

式中， A 是惯性矩阵， $\ddot{\theta} = (\ddot{\theta}_1 \cdots \ddot{\theta}_n)^T$ 。加速度以外被忽略。把式(3.49)的 T 代入式(3.42)，得

$$A\ddot{\theta} = J^T F \quad (3.50)$$

把式(3.41)写成通用式，得到的 $\ddot{\theta} = J^{-1}\ddot{x}$ 代替 $\ddot{\theta}$ ，得到

$$AJ^{-1}\ddot{x} = J^T F \rightarrow \ddot{x} = JA^{-1}J^T F \quad (3.51)$$

式中， \ddot{x} 是 $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})^T$ 。

式(3.51)给出了力矢量和由它产生的加速度矢量的关系。

把图3.26的简单操作器设定如图3.38，计算系数矩阵 $JA^{-1}J^T$ 的值。从图3.38明白 θ_1 、 θ_2 和 x 、 y 的关系式是

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= l\dot{\theta}_1 + l\dot{\theta}_2 \\ \dot{y} &= -l\dot{\theta}_1 \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

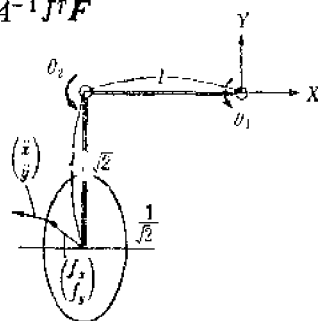


图 3.38 力矢量和加速度矢量的关系

这时，从式(3.41)雅可比定义式，有

$$J = \begin{pmatrix} l & l \\ -l & 0 \end{pmatrix} \quad (3.53)$$

从式(3.24)的加速度和转矩的关系，有

$$A = \begin{pmatrix} \frac{5}{3}ml^2 & \frac{1}{3}ml^2 \\ \frac{1}{3}ml^2 & \frac{1}{3}ml^2 \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

这样， $JA^{-1}J^T$ 为

$$\begin{aligned} JA^{-1}J^T &= \begin{pmatrix} l & l \\ -l & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{3}{4ml^2} & \frac{-3}{4ml^2} \\ \frac{-3}{4ml^2} & \frac{15}{4ml} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l & -l \\ l & 0 \end{pmatrix} \\ &= \frac{3}{4m} \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.55) \end{aligned}$$

因此，

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{3}{4m}(Af_x) \\ \ddot{y} &= \frac{3}{4m}(f_y)\end{aligned}\quad (3.56)$$

这里引入如下函数：

$$2f_x^2 + \frac{f_y^2}{2} = C \quad (\text{一定}) \quad (3.57)$$

力和加速度的关系更明瞭。取微分，上式变为

$$4f_x(df_x) + f_y(df_y) = 0 \quad (3.58)$$

矢量 $(4f_x, f_y)^T$ 和 $(df_x, df_y)^T$ 正交，即 $(4f_x, f_y)^T$ 的方向是式 (3.57) 给出的椭圆的法线方向。因此，图3.38中的椭圆中心到圆周上点的距离矢量表示为 (f_x, f_y) ， (\dot{x}, \dot{y}) 朝向它的法线方向。

这种控制方式适合于进行较静止的力的控制。

3.4.2 生成速度矢量的方法^{(13)、(14)}

为控制远程操作器，有速度分解控制法。这是操作器通过TV摄像机监视装置来观察所属手臂的动作，用手指坐标系的前进速度和旋转速度来控制动作的手指的的控制方式。图3.39所示是这个控制系统。有雅可比逆矩阵 J^{-1} 乘 \dot{x}_r ，变换成 $\dot{\theta}_r$ 的特征。操作器对此角速度积分变成角度，作为位置伺服系统的输入。速度分解控制不包括在工作坐标系控制位置的概念。人们通过速度控制来控制位置。

为从这速度分解控制得到启发，可考虑如下那样的在工作坐标系上的伺服系统。工作坐标系上位置偏差为 $x_r - x$ 时，可以想到要消除这偏差的速度为 $V_r = K_E(x_r - x)$ 。若现在的速度为 \dot{x} ，速度的偏差为 $K_E(x_r - x) - \dot{x}$ ，这个速度偏差要变换成关节坐标，即乘 J^{-1} ，就能产生各自关节比例于那偏差的转矩：

$$T = K_V J^{-1} [K_E(x_r - x) - \dot{x}] \quad (3.59)$$

式中， K_V 、 K_E 分别是速度和位置的增益矩阵，以对角矩阵为好。从式 (3.49) 和式 (3.41) 的一般表达式：

$$T = A\ddot{\theta} = KJ^{-1}\ddot{x} \quad (3.60)$$

及式 (3.59)，得到

$$\begin{aligned}AJ^{-1}\ddot{x} &= K_V J^{-1} [K_E(x_r - x) - \dot{x}] \rightarrow \\ \ddot{x} &= JA^{-1}K_V J^{-1} [K_E(x_r - x) - \dot{x}]\end{aligned}\quad (3.61)$$

这式表示了速度误差 $[K_E(x_r - x) - \dot{x}]$ 和实际加速度 \ddot{x} 的关系。

再用一个简单的例 (图3.33) 来讨论稳定性。从式 (3.53)、(3.54) 有

$$J = l \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow J^{-1} = \frac{1}{l} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

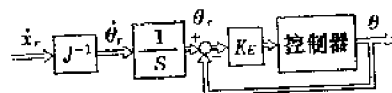


图 3.39 速度分解控制

$$A^{-1} = \frac{3}{4ml^2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 5 \end{pmatrix}$$

为简单, 让

$$K_V = \frac{4ml^2}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.62)$$

则

$$J A^{-1} K_V J^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & 4 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (3.63)$$

进一步假设

$$K_E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.64)$$

若 $x_r = 0$, $x = (x, y)^T$, 则

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= 4(-x - \dot{x}) + 4(-y - \dot{y}) \\ \ddot{y} &= (-x - \dot{x}) + 2(-y - \dot{y}) \end{aligned} \right\} \quad (3.65)$$

这里作如下的坐标变换:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1 + \sqrt{5}}{4} x + y \\ Y &= \frac{1 - \sqrt{5}}{4} x + y \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

得到

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X} + (3 + \sqrt{5}) \dot{X} + (3 + \sqrt{5}) X &= 0 \\ \ddot{Y} + (3 - \sqrt{5}) \dot{Y} + (3 - \sqrt{5}) Y &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.67)$$

这里 x, y 稳定地收敛到零。即使 $K_E = \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{pmatrix}$ 对时间若能进行适当的单位变换, 式 (3.64) 的条件也成立。

把 $x = J\theta$ 的关系代入式 (3.39), 有

$$T = K_V (J^{-1} K_E (x_r - x) - \dot{\theta}) \quad (3.68)$$

这种场合的复杂计算只对位置控制是必要的, 对速度控制处理却非常简单。图3.40所示是这种控制系统的构成。速度控制系统有特别的高速处理, 所以具有简单速度控制机构的这种方式实用上容易实现。

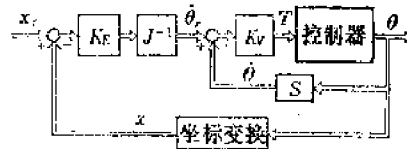


图 3.40 生成速度矢量的工作坐标伺服器

3.4.3 生成加速度矢量的方法⁽¹⁶⁾、⁽¹⁸⁾

上述两种方法能比较简单地在工作坐标系上实施控制, 但对位置的控制不简便。实际上, 其可控性多半凭直观和经验确认, 工作空间上的伺服特性也不能正确给定。那是因为惯性矩阵 A 没反映在控制中。

伺服系统基本上是二阶系统, 是能靠变动加速度来控制速度和位置的系统。这里叙述依靠准备好可精确实现在工作空间指定的加速度的变换结构, 能在工作空间自如控制速度、位置的伺服方式。设用工作坐标表示的加速度为 a , 关节角加速度为 $J^{-1}a$, 实现它所必要的转矩是

$$T = AJ^{-1}a \quad (3.69)$$

为简单, 这里忽略速度的二次项和重力的影响。实际加速度设为 \ddot{x} , 从式 (3.60)

$$\ddot{T} = AJ^{-1}\ddot{x}$$

和式 (3.69), 假如消去 T , 为

$$AJ^{-1}\alpha = AJ^{-1}\ddot{x} \iff \alpha = \ddot{x} \quad (3.70)$$

这意味着, 假如给予了式 (3.69) 那样的转矩, 就能得到所希望的加速度。这保证能以独立的任意模式控制在工作坐标系的各成分。设 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots)^T$, $x = (x_1, x_2, x_3, \dots)^T$, 假如设定加速度的各成分为

$$\alpha_i = K_E(x_{ir} - x_i) + K_V(\dot{x}_{ir} - \dot{x}_i) + \ddot{x}_{ir} \quad (3.71)$$

这样,

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i &= K_E(x_{ir} - x_i) + K_V(\dot{x}_{ir} - \dot{x}_i) + \ddot{x}_{ir} \\ \rightarrow (x_{ir} - x_i) + K_V(x_{ir} - x_i) + K_E(x_{ir} - x_i) &= 0 \end{aligned} \quad (3.72)$$

能构成跟踪输入位置 x_{ir} , 没偏差的伺服系统。图 3.41 给出了这个伺服系统的结构。

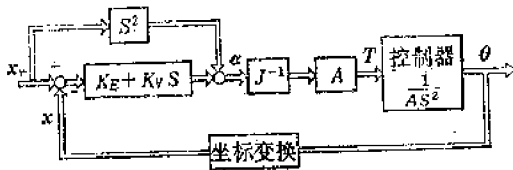


图 3.41 生成加速度矢量的工作坐标伺服器

伺服器的动态特性不影响操作器的姿态等, 这由式 (3.72) 所规定。因此, 假若选定适当的 K_E 和 K_V , 它的特性就能总保持住。

在工作空间让力控制和位置控制混合存在的场合, 对各坐标, 要适当分配由这里叙述过的控制和力矢量的控制为好。这完全不会引起矛盾, 还可能简捷地表示。

这些工作坐标系的伺服器在研究室阶段已实现。尽管稳定性、精度之类问题不少, 但作为机器人的控制方式, 道理是对的。以这些方式为前提, 在工作空间构成怎样的假想机理, 怎么规划调整它的动作, 都是最近的研究课题⁽¹⁷⁾。

参 考 文 献

- (1) 大島, 亮木: "サーボ機構", オーム社 (昭 49)。
- (2) インランドダイレクトドライブトルクモータカタログ (日本パルスモータ社)。
- (3) 伊藤, 俊雄: "産業用ロボットの駆動源としてのハーモニックドライブ", ロボット, 16, pp. 54-59 (昭 50)。
- (4) THK 精密ボールねじカタログ (東洋精工版)。
- (5) 下早: "位置・角度センサ", 知能ロボットマニュアル, pp. 4.1-4.19, トリケップス社 (昭 57)。
- (6) Takase, K., Hasegawa, T. and Sushiro, T.: "Development of a novel manipulator for critical use", Proc. '83 ICAR, pp. 253-260 (1983)。
- (7) Paul, R.: "Modelling, trajectory calculation and servoing of a computer controlled arm", Stanford Univ. A. I. Lab. AIM-117 (1972)。
- (8) Paul, R.: "Robot manipulators mathematics, programming and control", MIT press (1981)。
- (9) 高瀬: "電機研・システム制御研究室におけるロボット研究—ソフトウェアサーボによる作業に適した自由変構造の構成", ロボット, 17, pp. 71-76 (昭 52)。
- (10) Mason, M. P.: "Compliance and force control for computer controlled manipulators", IEEE Trans. Syst., Man & Cybern., SMC-11, 6, pp. 418-432 (1981)。
- (11) 平井, 佐藤: "言語介在型マスタ・スレーブマニピュレータシステム", 計測自動制御学会論文集, 20, 1, pp. 78-84 (昭 59)。
- (12) 井上, 高瀬: "ソフトウェアサーボによる作業向き自由度の構成", 情報処理学会マシ・マンシステム研究会, 知能ロボット特集, pp. 15-20 (昭 59)。
- (13) 長谷川, 水谷: "自律的軌道発生機能をもつ経路制御", 計測自動制御学会論文集, 19, 4, pp. 107-109 (昭 57)。
- (14) 杉本, 登郎, 毛利: "知能ロボットとその技術課題", 日立評論, 64, 12, pp. 5-10 (昭 57)。
- (15) 高瀬: "マニピュレータの運動成分の一般的分解とその制御", 計測自動制御学会論文集, 12, 8, pp. 92-98 (昭 51)。
- (16) Luh, J. Y. S., Walker, I. and Paul, R.: "Resolved acceleration control of mechanical manipulators", IEEE Trans. Autom. Control, AC-25, 3, pp. 468-474 (1980)。
- (17) Brady, M., Hollerbach, J., Johnson, T., Lozano-Pérez, T. and Mason, M.: "Robot motion planning and control", pp. 473-493, MIT Press (1983)。

第4章 机器人和语言

4.1 工作的程序化

机器人的特点之一是通用性。为让有通用性,机器人作为全套程序化的机器构成,靠替换程序来执行各种各样的工作。把教会机器人工作叫程序化,其方法有教学放音式、脱机数据程序化和机器人语言程序化三种。

教学放音方式,使用叫做教学箱的操作箱,把机器人移动到希望的位置和姿态,读取这时机器人的各关节的目标数据并记忆下来。如果把作好的目标数据序列按顺序给与机器人,教过的动作重现无论多少回都行。因为边移动机器人边示教,所以不要高深的预备知识。但是,由许多示教点形成的复杂工作要被准确地程序化,即费事又费时,效率不太高。这方法适合单纯的重复工作,是在现场使用的方法,正在被广泛地使用。

脱机数据程序化,这是为省去上述示教的麻烦而考虑的方法,使用CAD设计产品的数据,计算机器人应该移动的位置和姿态,示教数据自动的生成。这被认为对作成复杂形状物体的焊接线那样的连续数据是有效的,但用这种方式移动机器人时,因被要求的即不是决定位置的精度也不是重复精度而是绝对精度,所以,无论在演示还是在实用两方面都还没到实用阶段。

还有一种方法是用机器人语言程序化。这和对计算机程序化一样,是使用符号来描述机器人动作的方法。假如使用机器人语言,包含传感器处理的复杂工作逻辑程序也成为可能的。另外,把其他工作也能利用的那些基本动作作成通用的程序库,储存起来也容易。机器人语言,导致机器人有高度的通用性,被认为是今后的发展最有希望的方法。

目前,因为机器人被用来作简单重复的工作,所以用教学放音方法还行。但是,对有感觉的机器人,若让它作组装那样的复杂工作,使用机器人语言就有必要了。以用更简单的描述把更复杂的工作程序化作为目标,真正迎来了机器人语言的研究、开发阶段。

4.2 机器人语言的分类

机器人语言的分类多数按叫做动作级、对象级、工作级的分成三级。简单说来,动作级语言是用命令描述机器人的动作,对象级语言是着眼于对象物的状态变化的程序,工作级语言是只给予工作的目的,自动生成要实现它的程序。分类不是确定的、对它的解释也常见混乱。例如,描述对象物的动作的语言,既可以认为是对象级、也能在动作级给安个位置。因此,在本章把语句处理的机能也考虑进去,把机器人语言分成如下五个级别给予说明:

- (1) 指挥命令级;
- (2) 基础动作级;
- (3) 构造动作级;

(4) 对象状态级;

(5) 工作目标级。

指挥命令级的机器人语言最简单,是为移动机器人的基本命令作为附给参数的指令预备的,指令翻译机执行对这些指令的解释。这些指令没有定义作为语句的文法。如果能说是计算机的程序语言,是相当于汇编语言的语言。

基础动作级语言是着眼于描述机器人手的动作的程序。也就是,动作文体取MOVE TO <destination>的形式。因描述的动作仅限于手的动作,故语言处理用比较简单的构成法就能完成,代之以要具体规划、指定实现复杂工作的手的位置和姿势,则由程序来担当。基础动作级语言多数都整理成BASIC式的简单语句。为表示位置、姿势,引入坐标型变量,而因坐标系间相互关系的管理交给程序,所以一作复杂动作数据的管理就变得很费事,容易发生差错。

构造动作级语言是对Pascal那样的高水准语言,再追加描述机器人动作的各种语句扩张而构成的。工作程序也有可能构造性的描述,作为机器人语言有相当的通用性。表示对象物、手的位置和姿势的坐标系和它们的结合关系的管理也由系统担任,所以也允许着眼于对象动作的MOVE<object> TO<destination>形式的动作描述。因为能从抓物体时手和物体间偏差的计算、多个坐标系的值相互不矛盾的变动中解放出来,程序的负担就大为减轻。便于描述三维环境的各种数据型式和它们的演算式,各种各样的感觉处理和同步方法也被语句化,使复杂的工作得到有效地描述,使它称得上是有通用性的程序语言。

对象状态级语言是把工作看成对象物之间状态变化的观点作程序的。作为描述状态变化的单位一旦允许可相当大,完成其状态变化的动作程式的生成就困难。如像部件放置在不同的场所呀、某个部件和其它部件组合起来呀、那些简单的状态变化作为单位来区分工作,组建程序。另外,描述对象物间相对关系时,为把具体数据与程序划分开要花工夫。

工作目标级语言是把对象状态级语言一般化,仅给出工作的最终目标,要完成它的详细动作程序全部自动生成。作为机器人语言是理想的,但要实现它一定要有高度解决问题的机能。这种语言,对人工智能的应用是十分有趣的课题。

4.3 指挥命令级语言

指挥命令级的机器人语言,由要进行机器人基本动作和系统操作的子程序群、用带有参数的指令起动它们的指令编译器构成。把机器人看作系统时,这是必要的一步,几乎所有的机器人都具有这级语言。但是,以该语言为题名,汇编成论文集的少。本节以ML语言⁽¹⁾为例,说明指挥命令级的机器人语言的大概。

ML是IBM在机器人研究的初期使用的语言,即使在指挥命令级语言中也属于比较简单的。作为对象的机器人全部有9个自由度。由XYZ形机构的三轴决定手的位置,手有万向架构造的三个旋转轴来决定姿势(α 、 β 、 γ)。它的前端用两个相对的电动机 g_1 、 g_2 来驱动两个指头。而且,这整个都放在平台上,绕Z轴旋转(θ)。作为机器人的机构,不能说是相当精练的,但机构和坐标系容易对应,有能省略复杂坐标变换的计算的优点。

ML的指令为如下的简单形式。

<语句号> <指令码> <参数>

语句号能从1用到5000，而一旦给予省略语句号的指令，就立即被执行。参数是用整数型的常数或变量。变量的关连参数（字母）允许到六位。表4.1是ML指令码的一览表。因能从汇编、BASIC等语句类推的指令多，这里仅就特殊的作简单补充说明。

表 4.1 ML的指令

Control	DISABLE, ENABLE, LEFT, RIGHT, RUN, TRACE, EXIT, TRY, PRINT, LN
Flow	BAL, BRANCH, RRCOMP, BROVFL, IF, DELAY, LOOP1, LOOP2, NEXT1, NEXT2, GOSUB, RETURN, STOP
Motion	MOVE, DMOVE, MOTOR, DMOTOR, HAND, DEFPOINT, GOPOINT, JOY
Sense	CALIB, SENSOR, WAND
Data	POINT
Arithmetic	LOAD, DLOAD, ADD, DADD, MULT, DIVD, GET, PUT, GETSEN, GETPOS, GETGOL, LT?, LE?, GT, GE?, EQ?, NE?, COMPO, COMPOFF, OVFLON, OVFLOFF
Edit	ERASE, FILE, LIST, QUERY, QPOINT
Test	TESTAI, TESTAO, TESTDO
Host	CMSLOAD, CMSDUMP, VMCNTL, QUIT, UPROCA, UPROCB, UPROCC, UPROCD, GROT, GTRANS, GOLINE, GOMEAN, DHAND

DISABLE、ENABLE是开、关油压泵的指令。用两支手臂时，程序是针对左右哪一支手臂呢？用LEFT、RIGHT指定。GOSUB是调出没标识编号的子程序，RETURN是它的返回。调有标识编号的子程序用BAL (Branch And Link)。BRANCH指令依据传感器的逻辑条件进行计算路径选择。IF指定对应标识数为负、零、正的三个路径。

MOVE是把手臂移动到用九个参数(θ 、 X 、 Y 、 Z 、 α 、 β 、 γ 、 g_1 、 g_2)指定点的指令。MOVE是向工作空间内的绝对位置移动，而DMOVE是从现在位置作相对移动的命令。MOTOR、DMOTOR仅启动一个电动机时用。HAND是动手指的指令。DEFPOINT把手臂九个轴的现在位置作为一个点给记忆下来。GOPOINT是向这样记忆下来的点移动手臂。JOY指令是让手臂随操作杆移动。

SENSOR是决定给出的传感器的上下限门限值的指令。GETSEN、GETPOS、GETGOL是读取各种传感器的值、电动机现在位置、电动机的目标值代进变量的指令。

ML的操作系统是表格驱动形。主要表格有电动机表格、传感器表格、任务表格三种。电动机表格中写入电动机各轴的取样值、目标值、控制参数。传感器表格里写各传感器的值、上下限的值、表示是否在容许范围内的标识。这两个表格都由实时系统管理，用它来控制手臂，监视传感器。任务表格可拥有到5000行的ML程序，通常被存入磁盘，必要的部分调往主记忆。作为处理表格的指令，有FILE、QUERY。ERASE是ML程序的删除，LIST是进行ML程序的列表。

ML指令也能由主计算机发出。CMSLOAD、CMSDUMP把ML程序在主计算机之间转送。UPROC是为让执行包含用主机作成的ML指令在内的FORTRAN程序的指令。

ML的指令使用法难于说明，举个简单程序例表明。机器人程序化时，写出在有感觉的某种保护条件下移动机器人的顺序往往是必要的。这叫做带有保护条件的运动。这种程序如图4.1所示，首先，有表示保护条件的几个传感器指令，其次写出几个动作指令，最后基于判别传感器条件设置分路指令。下面说明图4.1的程序。

```

200  SENSOR  5  -178  450
210  SENSOR  8      0  1000
215  SENSOR 14  -180  -600
280  GOPOINT 5
285  MOVE   00  2000  60  4000  -9000  650  190
288  MOTOR  3  4000
295  DMOTOR 2  -100
400  BRANCH 500 400  5  11
410  BRANCH 500 600  8
500  (传感器5或11的标识出现时的动作程序)
550  (传感器8的标识出现时的动作程序)
600  (上述情况之外的处理程序)

```

图 4.1 ML的程序例(1)

语句号200的指令，设定第5传感器的容许范围下限为-178、上限为450，超出该范围这个传感器的标识就消除。语句号210、215的指令也是同样的指令，这三个表示了保护条件。

机器人的运动只有在传感器标识全部被清除(OFF)后才能执行。一旦到传感器被指定的允许范围之外，那个传感器的标识就为ON，执行中的动作指令被中断，机器人被冻结在那时的位置。而且下面写着的动作指令也被跳越，移到程序控制的条件判别指令。从语句280到295是一连串的动作指令。语句280把机器人移动到定义过的点5。语句285是MOVE指令，移向 $\theta = 0^\circ$ 、 $X = Z = 0$ 、 $Y = 2$ 英寸、俯仰角 40° 、偏转角 -90° 、倾斜角 0° 的点。用语句288，移动电动机3、即仅Y轴移到4英寸的地方。用语句295，相对移动电动机2(X轴)-0.1英寸。

现在假定正执行语句288，正好到 $Y = 3$ 英寸时，第5传感器的值就越过了允许范围。这时，第5传感器的标识就是ON，语句288中断、电动机3停止在3英寸的地方。而且ML程序的控制跳过语句295，移到从语句400开始的条件判别部分。语句400是BRANCH指令，第一参数是传感器条件为真时的分路地址(语句)，第二参数是为假时的分路地址。第三参数以后表示传感器标识的逻辑和。按假定，第5传感器的标识建立起来，语句400的传感器条件为真，程序到语句500分路。

4.4 基础动作级语言

基础动作级语言中的动作语句限定为MOVE TO (destination)形式。既然动作语句着眼于机器人的手的动作，就应该指定它的目标点。手的动作是工作的手段，因为工作的

目的是移动物体,采用MOVE <object> TO <destination> 的语句方式能更自然地表现工作。但是,一般进行这语句的处理中,因为对象物数据的管理很麻烦,所以基础动作级语句不支持移动对象物的语句。

有代表性的基础动作级机器人语言是VAL。VAL是开发叫PUMA的机器人的程序用的语言。这是仅针对实用化的语言,语句简单,但在数据的示教上花了工夫,全体汇编成使用非常方便的程序系统。下面根据文献(3)说明VAL的梗概。

4.4.1 数据表示和它的示教

把装在机器人手臂前端的手(一般是工具)的位置和姿势合在一起叫位置(location)。VAL中作为表现位置的数据型有精密点数据(precision point; p-point)和变换数据(transformation; trans)两种。p-point是用机器人的六个关节角度表示位置的。这种表现法依赖机器人的机械结构,只看数据而理解手的位置和姿势为怎么样的呢却是困难的。但因直接给出应该最终决定位置的关节角的值,成为精度最好的数据。p-point型的变量名在前面附加#,以示区别。另一方面,用trans型数据表示位置是用表示工具位置和姿势的参数来表示的。考虑固定工具(tool)的坐标系,在基准(world)的直角坐标系用工具原点的坐标(X、Y、Z)来表示位置。姿势用决定工具和基准间相对旋转的三个旋转角(O、A、T)来表示。这种表示法不依存机器人的机械结构,因与工作空间内的位置、姿势很好对应,数据本身好理解。这是对人比较容易明白的表示法,而因包含有求位置、姿势的坐标变换的计算误差,所以比p-point型精度低。在plate(物体)上放上一个block(物体名)时,block的位置、姿势以相对于plate的位置、姿势来定义方便很多。为表现这种相对的位置,在VAL中引入复合trans的记述法。在复合trans中,使用冒号,以plate:block:grasp来表示连结坐标系。这里,plate是从基准坐标系看plate的位置和姿势,block是对于plate堆积物的相对位置、姿势,grasp是从block看堆积物支撑点的相对坐标。假若用复合trans表示位置和姿势,即使母体坐标系放置在别的场合,若单单仅表示plate的值,不调整示教放在它上面的堆积物和它支撑点的值,也能用计算求出,这是优点。

VAL中,把位置改为变量,各变量值靠手动机器人来示教。示教数据的指令有如下语句。

HERE <location> 是为定义位置(location)的值所准备的非常方便的指令。用教育箱把工具引导到所希望的位置、姿态,如果为HERE place指令,计算时工具的位置(X、Y、Z)和姿势(O、A、T)作为变量place的值代入(在place中,因不带#识别符,被看作trans型)。如果为HERE #Place指令,#place的p-point型变量由那时的六个关节角配套。

定义复合trans的场合是从母体的坐标系开始顺序定义的。首先决定工具对plate的代表点的位置,为HERE plate指令。以此决定在基准坐标系的plate值。接着,把工具移向代表堆积物的点,为HERE plate:block指令。靠这个指令,用叫plate:block的复合trans表示的location与那时的工具的location一致那样,计算对于plate的block的相对坐标来定义block的值。同样,用HERE plate:block:grasp指令,定义对于block的grasp的相对坐标。定义复合trans时,因为计算最右边的变量值来定义,那它的左边,即作为母体的变量全部必须早已被定义了。

WHERE trans型及p-point型的值表示工具的location。

TEACH(location) 这是对一连串的location数据逐个示教时方便的指令。例如，发出TEACH p的指令，能一边移动机器人一边压下纪录开关，每到这时一连串的数据就以 p_1 、 p_2 、……的名字被定义下来。

POINT <trans> [= <trans 2>] …… [: <trans n>] }
POINT <p-point> [= <p-point 2>] }

这指令修正数据用。一旦只给予POINT #place那样的第1标定数据，首先表明#place的值是p-point型。想变更这个数据时，按对应表示打字输入就行。如果使用POINT pick1 = pick的形式，pick的值被代入pick1。

DPOINT [<location 1>], …… , [<location n>] 删除指定了的location。

BASE [<dx>], [<dy>], [<dz>], [<z rotation>] 变更机器人基准坐标系的指令。给出从初始基准坐标对标定数据的变位和绕Z轴的旋转。

TOOL [<trans>] 定义表示从安装在手臂前端的、为装备各种工具的法兰盘到装备着工具的代表点的相对关系的矩阵。这个矩阵在进行工具坐标系的计算时，供系统内部使用。

4.4.2 工作的程序化

VAL语言的语句主要的都汇集在表4.2里。下面就表4.2给出的语句作补充说明。

(1) 动作语句 VAL中，对机器人的移动轨道，有由关节角空间在初值和终值之间插值的控制方法，和沿工作空间的直线轨道运动的方法。MOVE语句是前一种，MOVES是后一种。另外，和手臂动作并行操作工具的场合，用末尾加个T的MOVET语句和MOVEST语言。向目标点傍的接近点移动用APPRO语句，向离开点移动用DEPART语句指定。让这时的移动按直线轨道进行，用末尾附加个S的APPROS语句、DEPARTS语句。DRAW语句指示从现在点向只移dx, dy, dz的点作直线移动。DRIVE语句在仅移动一个关节时使用。

(2) 语句OPEN和CLOSE 该语句指示手指的开闭。实际的开闭动作与写在它后面的语句一起执行。OPENI语句和CLOSEI语句是立即执行手指的开闭动作。用GRASP语句在关闭手指后检查手指不闭合的张开幅度，它比 <opening> 的值小时就向 <label> 分路。

(3) 整数型变量的运算符 VAL中定义了加、减、乘、除及剩余5个运算，用它们能描述简单的计算。

(4) 数据语句的意思和用作数据示教的指令相同 INVERSE语句是求坐标系的逆矩阵。即atob表示b对a的相对坐标时，用INVERSE btoa = atob语句，计算a对b的相对坐标并代入dtoa。用FRAME base = a, b, c语句，像定原点为a、ab为X轴、 $\triangle abc$ 为XY平面那样，定义trans型变量base。这里，假定c点是接近Y轴的。

(5) 控制语句 GOSUB语句是句子程序分路。VAL中子程序不带标定数。用RETURN语句表示返回跳过由 <skip count> 给出的数目的语句的地方。能使用IF关系的有EQ、NE、LT、GT、LE、GE六种。IFSIG语句依据外部信号进行条件判别。例如，IFSIG 2, -3, THEN50的语句是在信道2ON、信道3OFF的条件下跳到语句50。SIGNAL

表4.2 VAL的主要语句

动作句	MOVE<loc>[1]	MOVES<loc>[1]
	MOVET<loc>, <opening>	MOVEST<loc>, <opening>
	APPRO<loc>[1], <distance>	APPROS<loc>[1], <distance>
	DEPART<distance>	DEPARTS<distance>
	DRAW[<dx>], [<dy>], [<dz>]	
	DRIVE<joint>, <change>, <speed>	
手用句	ALIGN READY NFST	
	OPEN[<opening>]	CLOSE[<opening>]
	OPENI[<opening>]	CLOSEI[<opening>]
数学运算	GRASP<opening>], [<label>]	
	SETI<i.var> = <i.var2>[<operatin> <i.var3>]	
数据句	TYPE<i.var>]	
	HERE<loc>	TOOL[<trans>]
	SET<trans> = <trans2>[: <trans3>] ... [: <transn>]	
	SHIFT<trans>BY[<dx>], [<dy>], [<dz>]	
	INVERSE<trans> = <trans2>[: <trans3>] ... [: <transn>]	
控制句	FRAME<trans> = <trans2>, <trans3>, <trans4>	
	GOTO<label>	
	GOSUB< p:ogname >	RETURN[< skip count>]
	IF<i.var><relationship><i.var>THEN<label>	
	IFSIG<ch>, [<ch>], [<ch>], [<ch>]THEN<label>	
	SIGNAL<ch>, [<ch>, ..., <ch>]	
	REACT<ch>, [<prog>][ALWAYS]	
	REACTI<ch>, [<prog>][ALWAYS]	
	WAIT<ch>	IGNORE<ch>[ALWAYS]
	PAUSE[<string>] STOP[<string>]	HALT[<string>]
控制方式	SPEED<val>[ALWAYS]	
	COARSE[ALWAYS]	FINE[ALWAYS]
	NONULL[ALWAYS]	NULL[ALWAYS]
	INTON[ALWAYS]	INTOFF[ALWAYS]
	DELAY<time>	
其它	ENABLE<switch>	DISABLE<switch>
	REMARK[<string>]	TYPE[<string>]
	BASE[<dx>], [<dy>], [<dz>], [<z rotation>]	
	ABOVE BELOW FLIP NOFLIP LEFTY RIGHTY	

语句是装好输出信道的值。REACT语句起动的指定的输入信道信号的监控。假若输入信号指定了条件，待执行中的动作语句完了后跳向指定的子程序。WAIT是等待到外部信号的条件成立就进入环路。IGNORE语句停止正启动的信号监控。还有，像IFSIG语句的例所示的那样，外部信号的状态用带信道正负描述来指定信号的ON/OFF。

4.4.3 程序例

VAL的程序例如图4.2所示。用这个程序抓住由馈线供给的部件，运送到检查站。

在检查站判别部件是A型还是B型。根据这个判别结果,跳向进行各自适当处理工作的子程序。用这个程序的外部信号的意义如下:

传感器1: ON的时候,馈线供给部件结束。

传感器2: ON的时候,部件进入检查站完。

传感器3、4、5: 用于部件判别的特征信号。

传感器6: ON的时候,检查完成了。

	REMARK	VAL	PROGRAM	EXAMPLE
	SIGNAL	-2	;	设定初始
	OPENI	100.00		
10	REACTI	7, ALWAYS		开始紧急信号的监视
	WAIT	1		等待部件供应
	SPEEP	200.00		
	APPRO	PART, 50.00		经过部件上方50mm位置
	MOVES	PART		向PART移动
	CLOSEI	0.00		抓住它
	DEPARTS	50.00		垂直拿上50mm
	APPRO	TEST, 75.00		送到检查位置
	MOVE	TEST		
	IGNORE	7, ALWAYS		停止监视紧急信号
	SIGNAL	2		部件装好
	WAIT	6		等待完成检查
	DEPART	100.00		取出部件
	SIGNAL	-2		超动信号2
	IFSSG	-3, -4, -5	THEN 20	若部件是A型, 去语句20
	IFSIG	3, -4, -5	THEN 30	若部件是B型, 去语句30
	GOSUB	REJECT		既不是A, 也不是B, 去放弃程序
	GOTO	40		
20	REMARK	PROCESS PART "A"		
	GOSUB	PART,A		
	GOTO	40		
30	REMARK	PROCESS PART "B"		
	GOSUB	PART,B		
	GOTO	40		
40	REMARK	PART PROCESSING COMPLETE.GET ANOTHER PART		
	GOTO	10		

图 4.2 VAL的程序例(1)

还有, 信道7的信号为ON时表示处于紧急状态。到IGNORE语句, 都进行这个紧急状态信号的监视, 假若信道7的信号变为ON, 执行中的工作立即停止, 跳向紧急处理子程序。

4.5 构造动作级语言

构造动作级的机器人语言, 在通常的程序语言的格式中添加了关于机器人控制的语

句。构造程序能描述机器人的工作，动作语句也被整理成可移动对象物坐标系那样的语句格式，所以，被认为作为机器人语言具有充分的通用性。有代表性的是斯坦福大学开发的AL⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。1974年AL发表以来给予机器人语言的研究很大的影响。在微机上执行AL的例⁽⁶⁾也发表了，把与AL同样机能植入Lisp的语言AL/L⁽⁷⁾也开发出来了。还有，IBM最近开发的AML⁽⁸⁾、⁽⁹⁾是与AL不同系统的语言，是具有强语言功能的构造动作级语言。

在AL之前，斯坦福大学里还开发过WAVE系统。WAVE把机器人的工作作成宏汇编样的程序，大体上属于指挥命令级语言。但是，WAVE的指令包含相当多的内容，具备有远比ML强的功能。AL是WAVE的高版本语言，靠引入Algol式的方框图结构整理好语句格式，成为最早的真实机器人语言被使用。AL是编译方式的语言，由编译和运行时间系统构成。用编译作AL基本码的语句分析，进行误差检验，生成应执行的动作码。另外，分析对象物的相互关系，规划目标点和动作轨道，计算出具体的控制数据。作为编译的目标码的动作码和控制数据交给运行时间系统，运行时间系统作轨道插值、伺服器、传感器的监视，控制机器人的动作。这些就是AL系统的构成。AL的程序以BEGIN和END一对包括进的方框图结构作模式，结构性的被描述。在AL的语句中，有关描述机器人动作的主要指令汇集在表4.3中。对这些语句作补充说明的同时，根据文献(4)、(5)，就AL机器人语言的思想作以下说明。

表4.3 AL的主要语句

程序块	{	BEGIN S; S; ...; S END
		COBEGIN S; S; ...; S COEND
定义句	{	SCALAR s1, s2 LABEL i1, i2;
		VECTOR v1, v2; ROT r1, r2;
		FRAME f1, f2; TRANS t1, t2;
		FRAME ARRAY fa1 [s1:s2], fa2 [s3:s4, s5:s6, ...];
		EVENT e1, e2;
顺序句	{	PROCEDURE p1; S;
		SCALAR PROCEDURE s; 1 (SCALAR s1; s2; ROT r1); S;
控制句	{	IF<condition> THEN<statement> ELSE<statement>;
		IF<condition> THEN<statement>;
		WHILE<condition> DO<statement>;
		FOR s ← <scalar> STEP <scalar> UNTIL <scalar> DO<statement>;
		DO<statement> UNTIL<condition>
		CASE<scalar> OF BEGIN [i1] S; <i2> S; ... [in] S END;
坐标系变动	{	AFFIX f1 TO f2 AT t1 RIGIDLY;
		AFFIX f3 TO f4 BY t2 NONRIGIDLY;
		AFFIX f3 TO f4 BY t2 AT t1 NONRIGIDLY;
		UNFIX f5 FROM f6;
动作句	{	MOVE f1 TO <fval>
		MOVE f1 TO <frame> VIA <frame>, <frame>, <frame>;
		MOVE f1 TO <fval>
		VIA <frame> WHERE DURATION = <time>, VELOCITY = <vel>;

```

动作句      <more clauses>;
            MOVE f1 TO<fval> <more clauses>;
            OPEN <hand> TO <distance>;
            CLOSE <hand> TO <distance>;
            CENTER <arm>;
            ON FORCE<<vector>> <rel> <forces> DO <statement>;
            ON TORQUE<rel> <torque,s> ABOUT<vector> DO <statement>;
            ON FORCE <rel> <force,s> ALONG <axis,v> of f1 DO...;
条件监视句  ON TORQUE <rel> <torque,s> ABOUT <axis,v> of f1 IN HAND DO...;
            ON DURATION $\geq$ <time,s> DO <statement>;
            <label>:DEFER ON<event> DO <statement>;
            这里<rel>既作为 $\geq$ , 又作为 $\leq$ 使用。
条件监视的启动停止  ENABLE <label>;DISABLE <label>;

WITH句      FORCE TORQUE DURATION的WITH与ON形式相同
            WITH FORCE-FRAME = <frame> IN <co-ord sys>;
            WITH SPEED-FACTOR = <scalar>
            WITH APPROACH } = <distance,s>|<distance,v>
            WITH DEPARTURE } |<frame>|DEPROACH(f1);
            DEPROACH(<frame>)  $\leftarrow$  <scalar>|<vector>|<trans>|<frame>;
            SIGNAL e1; WAIT e1;
            <var> $\leftarrow$ <expression>;
            <var> $\leftarrow$ <expression>;
            COMMENT <any text without semicolon>;
            RETURN; RETURN(expression);

宏定义句    DEFINE<macro name> = C<macro body>;
            DEFINE <macro name> (m1, m2, ...) = C<macro body>;

```

4.5.1 工作环境描述及数据形式

AL对由机器人及对象物构成的工作环境统一地用直角坐标系和它的相互关系来表示。图4.3所示是工作环境被给定后的坐标系的例子。world是固定在工作空间的基准直角

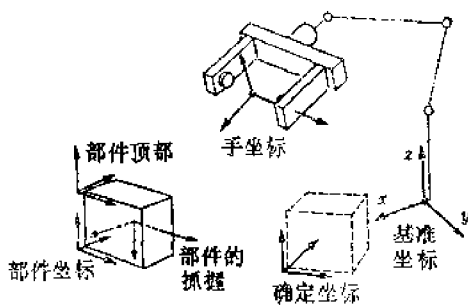


图 4.3 工作环境坐标系的表示

坐标系。hand、block是固定在手上、对象堆积物上的直角坐标系。用相对基准坐标系world的坐标系hand的原点位置矢量来表示在工作空间内的手的位置，用world和hand之间的三阶旋转矩阵来表示手的姿势。作为内部表示把两者合起来用 4×4 阶矩阵。

把机器人的动作程序化时，各种各样的数据是必要的。为此，在AL中备有称作SCALAR、VECTOR、ROT、FRAME、TRANS的数据标准型。SCALAR是表示长度、时间、重量等的常见标量。VECTOR是三维矢量。ROT是表示姿势和旋转的三阶旋转矩

度、时间、重量等的常见标量。VECTOR是三维矢量。ROT是表示姿势和旋转的三阶旋转矩

阵。FRAME是表示固定在对象物等上的直角坐标系的四维矩阵。TRANS是表示FRAME、VECTOR的坐标变换的四阶矩阵。对应于这些标准型数据的各种运算也在AL中准备了，复杂的计算式也能描述。

4.5.2 动作语句

移动机器人的MOVE语句，基本形式表示如下：

```
MOVE <frame> TO <destination>
```

这里，<frame> 是控制坐标系，用表示手和对象物的FRAME型变量。<destination> 是表示目标点的坐标系（一般是有FRAME型的值的式子），意思是让<frame>与<destination>一致那样动作。在MOVE文中，用VIA节指定目标点之外的几个中间点。能通过它们来定运动路径。

MOVE hand TO destination VIA f_1, f_2, f_3 ; 这语句是，hand经由用 f_1, f_2, f_3 的FRAME指定的中间点移动，在destination停止。特殊的中间点是departure点和approach点。提上物体时，在与桌子垂直的方向上设定距离短的中间点，让通过这点来规划轨道。这点叫departure点。接近对象物时也同样考虑，假定在目标点附近的approach点。能使两者同样相对变位时，叫approach点。它们的指定点WITH节作如下描述。

```
MOVE hand TO block WITH APPROACH = 3 * zhat * inches
```

这里，zhat表示world坐标系上Z方向的单位矢量。WITH节在指定动作中的力、转矩、时间等时候也能使用。根据传感器的条件让作某种动作时用ON节。ON节的语句是ON <condition> DO <action>。<condition>成立时执行<action>。用ON节修饰MOVE语句的例如下所示。

```
MOVE hand TO hand * FRAME (ROT (zhat, 90 * deg), nilvect * inches)
ON TORQUE <zhat> ≥ 50 * ounces * inches DO STOP hand;
```

这语句是让hand绕Z轴旋转90°。动作中若转矩变为50_{ounces}以上就停止。

除此之外的动作语句有OPEN、CLOSE、CENTER、STOP。CENTER语句是利用触觉，运动到手的中心与物体的中心一致时抓物体。这语句不移动物体只抓物体也可以。

4.5.3 坐标系的结合

对一个物体，因各种各样的目的设定多个坐标系是常有的。在图4.3中所示的堆积物里，除代表堆积物的位置和姿势的坐标系block之外，还设定有指定抓它位置的block-grasp，表示堆积物上表面的block-top。因为这三个坐标系的相互相对关系不变，block被移动过后，其他两个坐标系也必须原样保持最初的相对关系不矛盾地更新。这样的坐标系的结合关系用AFFIX语句如下给出：

```
AFFIX block-top TO block;
```

```
AFFIX block-grasp TO block;
```

用这两个AFFIX语句把上述三个坐标系结合起来，一致维持它们的相互关系那样地被自动管理。即使手抓住了堆积物的情况也有同样的结合关系。这里如果如下宣布：

```
AFFIX block-grasp TO hand;
```

手和结合好了的堆积物的三坐标系作为一体被管理。因此，如果移动手block的值也要变，

另外，假若书写了移动block的语句，为完成block的移动要求出hand的必要移动。这样，假若坐标系的结合关系的管理自动地进行，用

```
MOVE block TO final;
```

着眼于对象物的移动能描述工作那样，程序能写成更自然、更容易明白的形式。即使两个物体组合成一体的场合，也不要忘记宣布结合关系。坐标系的结合关系有两种：RIGID结合和NONRIGID结合。

```
AFFIX f1 TO f2 RIGIDLY;
```

是f₁和f₂用螺栓固定起来的结合。这时，若f₁动f₂也动，若f₂动f₁也动。

```
AFFIX cup TO saucer NONRIGIDLY;
```

是杯子放在盘子上的结合。saucer如果移动cup也移动，而cup移动saucer不动。

解除结合关系用UNFIX语句。

4.5.4 控制语句

在AL中，作为要组成程序的控制构造的语句，有IF-THEN-ELSE语句、FOR环路、WHILE环路、CASE语句、DO-UNTIL语句等众多的语句被准备着，能描述各种各样的控制构造。

4.5.5 并行动作描述及其同步

几个手臂的协调动作程序化时，用COBEGIN-COEND程序块。这个程序块内的语句并行执行。

为取得并行动作的同步要利用信号。首先用EVENT语句。

```
EVENT e1, e2, e3;
```

来发布信号。各信号都带有信号计数器。信号计数器的初值为0。用

```
SIGNAL e1;
```

语句，信号e₁的计数器增加1。假如它的结果是0或负，允许等待这个信号的程序执行。

```
WAIT e1;
```

语句一出现，信号e₁的计数器的值减去1。假如它的计数器结果是负，变成等待状态。结果是0或正的话，不进入等待状态而进入下一条语句。获取并行动作同步的程序例如图4.4所示。这是蓝手臂抓上block，把它交给黄手臂的工作程序。

```
BEGIN
  EVENT passed, caught, ready-pass;
  FRAME block, pass, catch;
  COBEGIN
    BEGIN "blue"
      MOVE la:m TO block;
      CENTER ba:m
      AFFIX block TO ba:m;
      MOVE block TO pass;
      SIGNAL ready-pass;
```

```

    WAIT caught;
    OPEN bhand TO 3.0*inches;
    UNFIX block FROM barm;
    SIGNAL passed;
END "blue" ;
BEGIN "yellow"
    OPEN yhand TO 3.0*inches;
    MOVE yarm TO catch;
    WAIT ready-pass;
    CENTER yarm;
    SIGNAL caught;
    WAIT passed;
    MOVE yarm to pallet;
END "yellow" ;
COEND;
END;

```

图 4.4 AL中两手工作的程序例(4)

4.5.6 宏功能

按定义，宏功能是代替本文写的程序技法。如果把屡次使用的基本动作使用宏功能定义，源程序能简捷地被整理写出。简单的宏功能定义的例子如下：

```

DEFINE grasp (object) =
    ◁MOVE barm TO object; CENTER barm;
    AFFIX object TO barm RIGIDLY▷

```

grasp是定义的宏功能，object是标定数。用◁和▷括起来的部分是宏功能定义的本体。原程序中假若使用叫grasp (block) 的宏功能，上面定义的宏功能被调出，宏功能本体中的假定标定数object变成block后放进本文。宏功能展开的结果grasp (block) 能换写如下：

```

    MOVE barm TO block;
    CENTER barm;
    AFFIX block TO barm RIGIDLY

```

4.5.7 AL的程序例

简单的AL程序例如图4.5所示。这个程序作力的反馈，进行把管脚插入孔洞的工作。程序的前半部分，用式子定义的是工作对象物的管脚和它的抓握点，孔洞的上下面坐标数据。

```

BEGIN "insert peg into hole"
    FRAME peg-bottom, peg-grasp, hole-bottom, hole-top;
    MOVE barm TO bhome WITH DURATION = 3*seconds;
    OPEN bhand to 3* inches;
    (设定手臂初值, 在原位张开手)
    peg-bottom←FRAME(nilrot, VECTOR(20, 30, 0)*inches);
    hole-bottom←FRAME(nilrot, VECTOR(25, 35, 0)*inches);

```

```

AFFIX peg-grasp TO peg-bottom RIGIDLY
  AT TRANS(ROT(xhat, 180*degrees), 3*zhat *inches);
AFFIX hole-top TO hole-bottom RIGIDLY
  AT TRANS(nilrot, 3*zhat*inches);
  (以上, 确定引线和孔洞的坐标值)
MOVE barm TO pag-grasp;
CENTER barm;
AFFIX peg-grasp TO barm RIGIDLY;
MOVE peg-bottom TO hole-top;
MOVE peg-bottom TO hole-bottom DIRECTLY
WITH FORCE-FRAME = station IN WORLD
WITH FORCE(zhat) = -10*ounces
WITH TORQUE(xhat) = 0*ounces
WITH FORCE(yhat) = 0*ounces
SLOWLY
END "insert peg into hole;

```

图 4.5 用AL把管脚插入孔洞的程序⁽⁵⁾

FRAME (<rot>, <vector>) 是作出FRAME型数据的函数。nilrot意思是与基准坐标平行的坐标系。把管脚插入孔洞的时候, 控制X方向及Z方向的反力为0, 接着向下施加一定的力。用这程序把管脚移到hole-top时, 就认为管脚和孔洞按正确位置被决定了。一般, 在这里探测孔洞的动作变得特别必要。

4.6 对象状态级语言

靠对对象物状态的变化给出大概的描述, 把机器人的工作程序化, 这叫对象状态级语言。AUTOPASS⁽¹⁰⁾、LAMA⁽¹¹⁾、RAPT^{(12)~(14)}等都属于这一级的, 遗憾的是都属于没完成的语言。

AUTOPASS是IBM的一个研究所提出来的机器人语言, 它像给人的组装说明书那样, 是针对描述机器人程序的。程序把工作的全部规划分解成放置部件呀、插入呀那样的宏功能状态变化指令来描述。AUTOPASS的编译, 用称作环境模型的数据库, 边模拟工作执行时环境的变化边决定详细动作, 作出对机器人的工作指令和数据。AUTOPASS的指令分成如下四组:

(1) 状态变更语句 PLACE, INSERT, EXTRACT, LIFT, LOWER, SLIDE, PUSH, ORIENT, TURN, GRASP, RELEASE, MOVE.

(2) 工具语句 OPERATE, CLUMP, UNCLUMP, LOAP, UNLOAD, FETCH, REPLACE, SWITCH, LOCK, UNLOCK.

(3) 紧固语句 ATTACH, DRIVE-IN, RIVET, FASTEN, UNFASTEN.

(4) 其他语句 VERIFY, OPEN-STATE-OF, CLOSED-STATE-OF, NAME, END.

试看有一个状态变更语句PLACE的文本例。PLACE语句的文本像如下那样被决定。

PLACE <object> <preposition phrase> <object>
 <grasping phrase> <final condition phrase>
 <constraint phrase> <then hold>

这里, <object>是对象名。<preposition phrase>表示ON或IN那样的对象物间的关系。<grasping phrase>是把对象物在哪儿、怎么样抓住等教给编译器。<constraint phrase>是工作中的位置、方向、力、时间、速度、加速度等约束条件的描述选择。<then hold>是这语句执行完了之后,指示机器人保持它的位置的选择。

AUTOPASS的程序例如图4.6所示。程序中,大写是指令语句,小写是表示部件

```

1. OPERATE nutfeeder WITH car-ret-tab-nut AT fixture, nest.
2. PLACE bracket IN fixture SUCH THAT bracket, bottom
   CONTACTS car-ret-tab-nut, top
   AND bracket, hole IS ALIGNED WITH fixture, nest
3. PLACE interlock ON bracket SUCH THAT
   interlock, hole IS ALIGNED WITH bracket hole
   AND interlock, base CONTACTS bracket, top
4. DRIVE IN car-ret-indk-stud INTO car-ret-tab-nut
   AT interlock, hole
   SUCH THAT TORQUE IS EQ 12.0 IN -LBS USING air-driver
   ATTACHING bracket AND interlock
5. NAME bracket interlock car-ret-indk-stud car-ret-tab-nut
   ASSEMBLY support-bracket

```

图 4.6 AUTOPASS的程序例(0)

名。因程序近似于英语书籍文章,比较容易明白。但是,这样高水平的描述,用文章不能描述的不明确度怎么也残留着。因为这些处理用人工智能的方法自动地解决这是现在还不可能的,在AUTOPASS系统中,提出了程序的调整由用户的交互作用进行的方针。也就是,源程序变换成低级别的动作码时,它的正确性的最终检验交给用户作。用户变更一部分程序时,假若对系统残留有不明确的地方,编译器就问用户。这样就建立了用户和编译器互相支持,尽可能有效的作出正确程序的方法。为实现这级别的语言,环境模型为相当高级的东西是必要的。另外,例如物体在什么地方,用什么姿势抓呢这样简单的一个问题拿出来,一般决定它的方法也不简单。虽然AUTOPASS的设想是非常有意思的,但技术上没解决的问题还多,遗憾的是还没有实用的报告。

RAPT是一个大学正在研究的对象状态级语言。它有描述对象物空间关系的独特特征。例如,两个面互相接起来、两个物体的端面对齐、孔和轴一致,这些以描述关系为基础,使用数学处理等,决定物体位置和姿势的具体数据。这种考虑对今后的发展很有意义。

4.7 工作目标级语言

这级别的语言是对象状态级的一般化,只给予初始状态和工作目标状态,自动生成中间的状态变化,把它们变成机器人的动作程序。例如,图4.7所示的目标状态是「blue在

yellow上、而yellow在red上。而blue上什么东西也没有。为达到这个目标，首先有必要自动生成几个子目标，求出从初期状态到目标状态转移的状态变化序列。这个问题要归结为人工智能领域的问题解决，而问题解决本身在现阶段只能处理简单的问题，要解决组装工作那样的复杂问题还必须等待今后的研究发展。假若能求出子目标，那么就变为前面的对象状态级的机器人语言问题。图4.7中表示了这工作场合的子目标及状态转移所必要的动作。

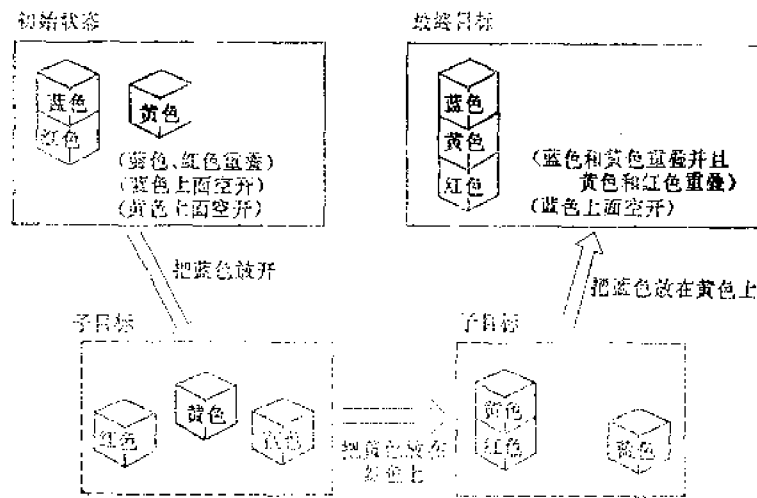


图 4.7 为达到工作目标的目标生成

4.8 小 结

本章把机器人语言分成指挥命令级、基础动作级、构造动作级、对象状态级、工作目标级五种，举出了代表性的具体例，对话句格式和考虑方法进行了说明。

在研究室实际被执行使用的最完备的机器人语言是AL，这是构造动作级语言。在产业应用中实用的机器人语言的代表是VAL，这属于基础动作级语言。相当于对象状态级的举出了AUTOPASS、RAPT，它们都是处在研究阶段，作为语言还没有完成。工作目标级语言不可欠缺的应具备解决问题的能力，而解决问题的方法本身还处在基础研究的阶段，有待今后的研究进展。

到目前为止，推进到机器人化的工作多数是单纯重复的工作，使用机器人语言的必要性不大。最近，随着组装感觉的机器人的开发，应用到复杂组装工作的活动活跃起来，而这些应用中，必须指定基于感觉的判断和复杂工作理论，因此，用从前的教学放音方式作工作示教不能处理，用机器人语言程序化是必要的。可以认为机器人语言的研究开发从现在起要真正发展起来了。

参 考 文 献

- (1) Will, P.M. and Grossman, D.D.: "An experimental system for computer controlled mechanical assembly", IEEE Trans. Comput., **C-24**, 9, pp. 879-889 (Sept. 1975).
- (2) Paul, R.: "WAVE: A model based language for manipulator control", Ind. Robot, **4**, 1, pp. 10-17 (March 1977).
- (3) "User's Guide TO VAL", Unimation (June 1980).
- (4) Mujtaba, M.S., et al.: "Stanford's AL robot programming language", ASME Computers in Mechanical Engineering, **1**, 1, pp. 50-57 (Aug. 1982).
- (5) Mujtaba, M.S. and Goldman, R.: "AL User's Manual", Stanford Artificial Intelligence Laboratory (Jan. 1979).
- (6) Blume, C.: "A structured way of implementing the high level programming language on a mini and micro computer configuration", Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 663-674 (Oct. 1981).
- (7) Inoue, H., et al.: "Design and implementation of high level robot language", *ibid.*, pp. 675-682.
- (8) Taylor, R.H., et al.: "AML: A manufacturing language", Int. J. Robotics Research, **1**, 3, pp. 19-41 (Fall. 1982).
- (9) Lavin, M.A. and Lieberman, L.I.: "AML/V: An industrial machine vision programming system", *ibid.*, pp. 41-56.
- (10) Lieberman, L.I. and Wesley, M.A.: "AUTOPASS: An automated programming system for computer controlled mechanical assembly", IBM J. Res. & Dev. **21**, 4, pp. 321-333 (July 1977).
- (11) Lozano-Perez, T. and Winston, P.H.: "LAMA: A language for automatic mechanical assembly", Proc. of 5th Int. Joint Conf. Artificial Intell., pp. 710-716 (Aug. 1977).
- (12) Popplestone, R.J., et al.: "RAFT: A language for describing assemblies", Ind. Robot, **5**, 3, pp. 131-137 (Sept. 1978).
- (13) Ambler, A.P. and Popplestone, R.J.: "Inferring the positions of bodies from specified spatial relationship", Artif. Intell., **6**, pp. 157-174 (1975).
- (14) Popplestone, R.J.: "An interpreter for 'a language for describing assemblies'", Artif. Intell., **14**, pp. 79-107 (Aug. 1980).
- (15) Takase, K., et al.: "A structured approach to robot programming and teaching", IEEE Trans. Syst., Man & Cybern., **SMC-11**, 4, pp. 274-289 (April 1981).
- (16) Grossman, D.D. and Taylor, R.H.: "Interactive generation of object models with a manipulator", IEEE Trans. Syst., Man & Cybern., **SMC-8**, 9, pp. 667-679 (Sept. 1978).
- (17) Falek, D., et al.: "An evolutive language for an intelligent robot", Ind. Robot, **7**, 3, pp. 163-171 (Sept. 1980).
- (18) 井上博允: "環境の理解と行動", 情報処理, **19**, 10, pp. 977-985 (昭53-10).
- (19) 高瀬国克: "ロボットの動作記述と言語", 信学誌, **65**, 4, pp. 426-432 (昭57-04).
- (20) 新井民夫: "ロボット言語", 計測と制御, **21**, 12, pp. 1102-1107 (昭57-12).
- (21) 井上博允: "組立のシステムとソフトウェア", 機学誌, **66**, 773, pp. 360-366 (昭58-04).
- (22) Bonner, S. and Shin, K.G.: "A comparative study of robot languages", Computer, **15**, 12, pp. 82-96 (Dec. 1982).

第5章 机器人的感觉

5.1 机器人的感觉功能和安装位置

要机器人和人一样有效地完成工作，对外界状况判别的感觉功能是必不可少的。没有感觉功能的原始机器人，遵从预先给定的顺序，仅仅重复地进行一定动作。假若有感觉，就能随处理对象的变化而变更动作，例如排除混入的另外对象，对某种供应的零乱位置也可作适当纠正而抓起对象物等等，自适应动作将成为可能。另外，如果能用某些感觉功能感知自己执行的工作结果的信息，就可能凭经验学习更好的工作法，其结果，对工作能熟悉起来。这样，机器人的感觉功能是把机器人作成智能机器人的第一关，近十多年正进行着众多的研究。

人的感觉有视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉、平衡感觉等，靠经过各种考验的精巧的装置能实现。这些感觉在人类一般生活中输入外界信息的比例，视觉最大（占83%）。这对指望代替人工作的机器人是重要的，依赖某些视觉传感器检测外界就成为重要的工程课题。

通常，视觉多数是靠拍摄外部的电视摄像机和处理它的信号的装置组合而实现的，作为中心的运算装置是数字计算机，所以过去对称作计算机视觉的进行过许多研究。另外，作为中心技术是被摄像的图像的平滑、增强、区域分割等图像处理技术，发现图像中的对

表 5.1 机器人的感觉

感 觉		用 途
外 部 传 感 器	视 觉	有无对象，对象形状、大小、种类的识别； 对象的位置、姿态的识别； 对象的伤痕、缺陷、好坏的识别； 对象上的图样、文字的识别； 指令的识别
	触 觉	对象重量、硬度、表面状态的识别； 位置偏差的控制，握力的控制
	听 觉	指令的识别； 异常状态的检测，障碍物的检测
	其 他 (温度、振动等)	各种检查，自我保护等
内 部 传 感 器	平衡感觉	机器人自身的平衡
	其 他 (位置、速度、转矩)	运动器官的控制，自我保护等

象、区分识别它的种类或位置的模式识别技术。

在人的感觉中仅次于视觉重要的是听觉，从前在机器人中并不那么被重视。这是因为听觉的用途有限，对机器人控制来说不是本质性的技术。但在将来，随着语音处理、音响处理技术的进一步发展，从用声音来指挥、控制机器人那样的人机接口的观点看来，它的重要性在增加。另外，在原子反应堆或大楼火灾现场等极端工作区域工作的机器人，作为特别异常状态的检测技术其重要性在不断增加。

与机器人的控制最紧密相关的是触觉。视觉适合于对象有无、大概的位置、姿势等粗看起来的状态输入，相比之下，触觉协助视觉，适合检出对象更微细的状态。而且能用于重复实时检出和修正动作那样的实时控制。其他的，对味觉、嗅觉除检测煤气那样的特殊场合外，还没开发检测法，与机器人的动作控制直接关系弱的感觉还没有被实现。还有，平衡感觉对固定型机器人一般是不需要的，即使移动型机器人也设计成在无控制时自身是姿态稳定的结构，所以迄今不需要。但包括人在内的一般动物，本来就具有在无控制时会跌倒那样的不稳定构造，要靠控制来稳定。特别是若要在工程上实现两脚步行机能，这平衡感觉是极其重要的。可以想象到这有效地被实现后才能实现最有效的步行机器人。

机器人的感觉及其用途见表5.1。温度、振动等特殊的外部传感器是用于对象的检查、机器人自己的安全等，此外，位置、速度、转矩等内部传感器用于机器人的自身控制。

5.2 视觉功能及其应用

5.2.1 图像处理的方法

给机器人添加视觉的研究作为人工智能机器人研究的一环，六十年代中期在美国开始，后来在日本接着也开始研究。由于机器人应该处理的对象一般是三维物体，作为数学上能最简单地描述的对象例，马上会选棱柱、棱锥那样的多面体的堆积物。用电视摄像机对在桌子上七零八落放置这些堆积物从斜上方摄像，把那图像送入计算机处理，来识别各个对象的种类、位置等。研究这些，图像处理应用上的问题点就清楚了，在此基础上开发了几种实用的处理方法，发展到工业应用。本节首先概要说明图像处理的基本方法。

(1) 图像的输入 对象物的图像，用图5-1所示的输入装置存入内存。也就是，用电

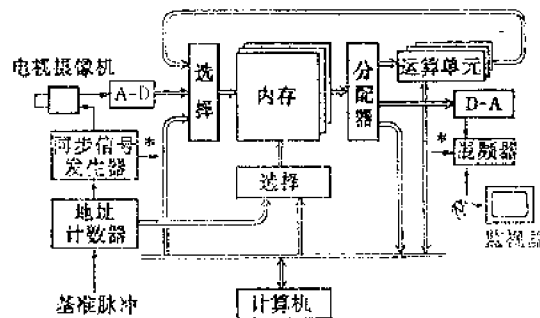


图 5.1 图像输入装置例

视摄像机摄下的图像信号，按一定周期被取样，变换成4~8bit左右的数字信息逐个输入，结果，图像按水平、垂直两方向分格，各标点上的图像值分配在内存上。这格点上的信息

图 5.2 二维滤波器

叫像素，表为 $f(x, y)$ ， $f(x, y)$ 是水平第 x 、垂直第 y 格上像素的信息，因此，它们的集合就是数字图像。通常工业用的电视摄像机，基准频率用 6MHz，除 382 行再分为 1/262，成 15.71kHz，59.95Hz 的水平、垂直同步信号，这时，能得到分割成 320×240 个（正方格子）像素的有效画面。

(2) **图像校正处理** 图像一般都包含有噪声或失真。为除去它们以得到更正确的图像，有各种校正处理。电视摄像机的白色噪声性图像噪声，能用连续摄影的数枚图像作加法平均来减轻。还有，如果图像的对比度有些偏、反差不够，靠对比度变换处理能把它扩展到适当的对比度范围。这种场合，用对数函数那样的非线性变换，能扩展到有意义的对比度范围，或者变更作为图像中位置函数的参数，用这个可变参数进行对比度变换处理，图像的黑点校正是正能的。还有，对光学系统的失真用仿射变换等进行图像的重构为好。这个变换能如下表示：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ a' & b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ c' \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

对数字图像，逐个变更变换后的图像位置 x, y ，从那个坐标计算变换前的坐标 X, Y ，对它周围格点的图像浓淡值作插值的方法是一般的。除了这种插值要的数个像素的存取例外，一般图像的校正处理是一个像素存取一个像素输出的形式。

$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,n}$
$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,n}$
$a_{n,1}$	$a_{n,2}$	$a_{n,n}$

图 5.2 二维滤波器

(3) **滤波** 像把周围像素的状况加进去作处理那样，多个像素存取一个像素输出的处理在图像处理中容易进行。即由图像上某个空间运算的滤波处理。数字图像的线性空间运算一般用图 5.2 所示的数值 $a_{1,1}, \dots, a_{m,n}$ 的二维排列来表示。这时，对图像 $f(x, y)$ 作滤波后的图像 $g(x, y)$ 用

$$g(x, y) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{i,j} f(x+i-1, y+j-1) \quad (5.2)$$

来计算。这样的滤波处理能用于图像的噪声消除、平滑、信号增强等，是图像处理的基本处理。例如，强调对象物体像的棱线、轮廓作成线条画抽出，有如下两种：

空间微分…… $\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$

拉普拉斯算子…… $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$

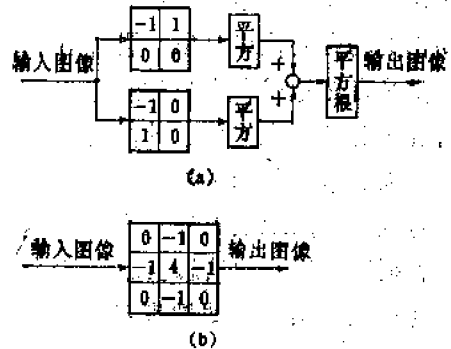


图 5.3 滤波处理（方框图）

(a) 空间微分；(b) 拉普拉斯算子。

对离散化的数字图像，图 5.3 是一例。

(4) **特征化** 如滤波那样对图像的各个坐标给予均匀处理的处理（光栅扫描）之外，有根据状况变更坐标扫描的场所和顺序的处理方法。例如，用空间微分滤波从棱线的线刻跟踪这棱线，是找到棱线及其方向变化点为顶点的处理。一般，对物体的认识要掌握其对象具有的构造特征，例如用求顶点形态的分类、顶点间的连接状况等的结构处理，或者用求图像中的物体的面积、周长、要点、孔洞的个数等特征参数的特征参数提取处理。一般

把这些叫做特征化处理。

从图像输入到特征化处理的一连串处理是对图像数据直接存取的图像处理，特征化之后的处理，主要是与库比较的识别处理。从图像处理开始到识别处理一般都称为模式识别。

若这图像处理用通常的计算机进行，图像信息一般有庞大的数据量，而且要作逐个存取的处理，根据应用对象要花几分钟到几十分钟的识别时间是常见的。在工业应用中，因为作过对象提示，通常要求0.1~1秒钟左右输出识别结果。因此，把图像处理应用于工业实现具有视觉的机器，首先第一必要的是解决这个处理速度问题。

5.2.2 二值图像处理

物体具有的性状见表5.2，能分成几何的性状、质的性状、附加的性状。所谓几何的性状是能用尺度测量的量，是与物体的大小、形状、种类有关的，是与在哪儿、以哪种姿态存在的位置量有关的。形状的认识对选取工作自动化是不可缺少的，而位置识别是组

表 5.2 物体识别的对象

识 别 的 对 象		用 途
几何性状	形状（形态、大小、种类等）	选取、组装
	位置（场所、姿态等）	组装、加工
质的性状	状况（伤痕、缺陷、割伤、渗透、色调等）	检 查
附加性状	表面信息（模样、标牌、文字等）	检查、选取

装工作自动化的基本技术。另外，质的性状是与那物体的好坏最有关系的性状。检查工作自动化的场合要检出对象，假若用一般尺度测量，定量表示困难的场合多。所谓附加的性状，那是自然地或者人为地附加给那物体的东西，与产品的质量没有直接关系，表面的模样等在审美意义上作出各种检查对象，特别是表示产品名、制造编号等字母、文字的附加信息，为选取工作的重要检出对象。

对这种一般工业上处理的物体，因在平面上翻转它时有几个（有限的）稳定姿势，例如，若把这些模式的信息全部记忆下来，只用从垂直上方看见的图像就可能识别那个物体。还根据应用，主动地规定对象物体的姿势，减缩成在二维平面内处理，能简化成只用从某一面看的图像来处理的问题。进一步依靠背景单一化和照明上的工夫，使对象和背景有尽可能高的对比度，把得到的图像二值化。这样，图像处理的相当大部分，特别是滤波处理仅用逻辑运算就行，所以用附加的比较小规模的专用硬件就能指望图像处理的高速化。

(1) 二值化的方法 把图像信号二值化有固定门限值法和浮动门限值法。固定门限值法是用某个一定的门限值分离图像的亮度信息，变换成黑、白（1或0）的二值图像的方法。门限值即有对图像区域全体是一定的情况，也有为对付电视摄像机等摄像装置的感光

不均或对比度失真，把它作为场所的函数预先决定下来的情况。这种情况，可以依靠把扫描位置 x 、 y 作为输入的函数发生器来产生门限值，也可以把记忆在只读存储器(ROM)里的门限值用 x 、 y 的扫描信号读出的参照表法。

另一方面，浮动门限值法是让门限值随图像状况变化，经常用符合识别的门限值作二值化的方法。例如，有以检出图像信号中微妙变化为目的的图5.4所示的方式⁽¹⁾。这是根据图像信号的时刻变化控制门限值，大体上不断跟从图像信号，同时，能提取白中的黑、黑中的白的微小变化。这种方法被用来发现印刷板上的伤痕。还有以分析一幅画的图像数据结果为基础决定门限值的方法。例如，找出亮度频度分布的谷点位置，用那个亮度值作二值化的方法是一般的方法。还有，把几个门限值预先准备好，用哪个门限值识别是可能的呢的最新结果为基础，也能把那门限值的试用顺序动态地切换。

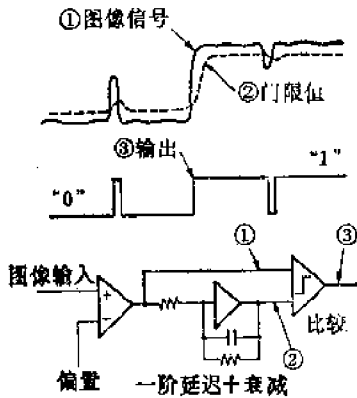


图 5.4 变动门限值法

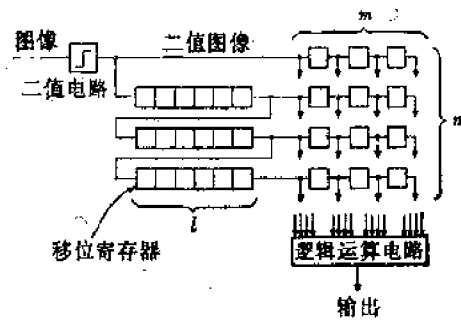


图 5.5 二维专用内存原理

(2) 二维滤波电路 保持二维的排行并行给出二值化的图像信息，对它们实行滤波处理的时候，能使用图5.5所示的二维专用内存⁽¹⁾。由输入的图像信号转变成 $m \times n$ 的二维像素信息的时候，准备好长相当于水平像素数 l 的移位寄存器 $n-1$ 个，长 $m-1$ 的移位寄存器 n 个，依次把二值图像信号移位，这就是专用内存的构造。对于从各移位寄存器得到的 $m \times n$ 的输出，能实行各种逻辑型滤波处理。这个二维专用内存的移位寄存部分，实际上如图5.6能由通常的存储元件和计数器组合实现。这种情况使用计数器控制地址位置来实现移位功能。二维专用内存和逻辑运算电路组成与图像输入同步实时的二维滤波电路，能实现各种功能。例如作 3×3 像素的逻辑和，因为无论在哪儿有1输出都为1，结果二值模式被扩大⁽²⁾、⁽³⁾。同样，逻辑积为缩小处理。另外，假如某个逻辑模式正好输出1，就能提取局部特征模式。进一步，与预先记忆下的模式作异或，如果找出有输出为0的像素个数，就能实时知道与记忆模式的匹配程度⁽⁴⁾、⁽⁵⁾。

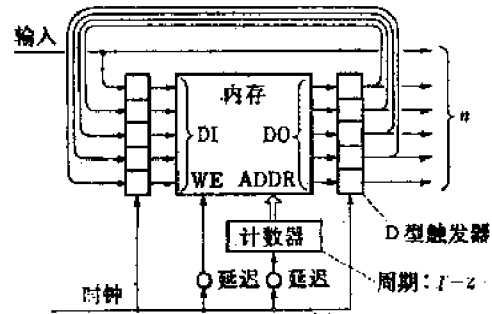


图 5.6 二维专用内存的移位寄存器构成法

这样构成以二值化电路和二维滤波电路为中心的专用处理电路，把它和微机组合起来就能实现高速的工业用视觉装置。

6.2.3 模式匹配法

作为识别物体种类和它位置的一种有效方法是模式匹配法。现在有两个数字图像 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ ，这两个图像的距离表示为

$$A(\xi, \eta) = \sum_y \sum_x [f(x+\xi, y+\eta) - g(x, y)]^2 \quad (5.3)$$

这距离 A 相当于图像间的相似程度，得到 $\min A(\xi, \eta)$ 的 ξ, η 给出了两个图像最一致的相对位置。这里如果认为 $g(x, y)$ 是标准模式，则式 (5.3) 是相对于这个标准模式图像 $f(x, y)$ 的 ξ, η 作为参量的一致度。求得 $\min A(\xi, \eta)$ 的 ξ, η 的运算特别称作模式匹配处理。假如把式 (5.3) 的平方运算展开，显然，这处理与两个图像之间的相关：

$$B(\xi, \eta) = \sum_y \sum_x f(x+\xi, y+\eta) \cdot g(x, y) \quad (5.4)$$

求出使它最大的 ξ, η 是等价的。这里假若考虑 $g(x, y)$ 是仅定义在 $m \times n$ 像素区域的图像，式 (5.4) 与式 (5.2) 的滤波处理等价。也就是，前述的滤波处理只是二维空间算子与输入图像的相关运算。另外，如果标准模式 g 和图像 f 都是二值的，式 (5.3) 的距离就变成

$$A(\xi, \eta) = \sum_y \sum_x f(x+\xi, y+\eta) \oplus g(x, y) \quad (5.5)$$

这里， \oplus 是作异或运算的符号， Σ 是逻辑输出 1 的代数相加。

为用这种模式匹配法识别传送带上移动的物体，研究出图 5.7 所示的办法。这种办法被称做旋转型模式匹配法 (6)，它是利用物体的上部图像。这里把输入模式的二值图像以它

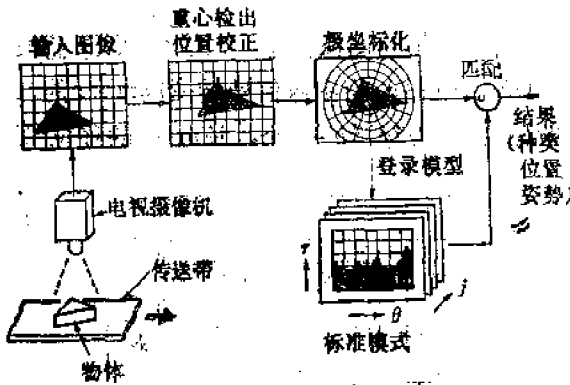


图 5.7 旋转型模式匹配法

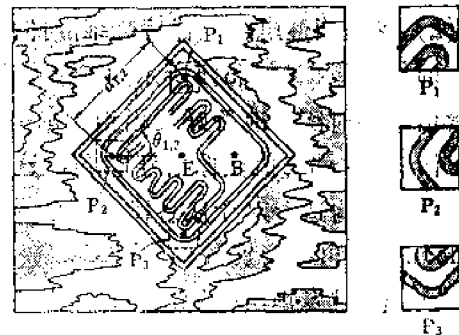


图 5.8 部分模式匹配法

的重心为中心变换成极坐标表示。输入图像的变换图像 $F(r, \theta)$ 和预先记忆的各物体的变换图像 $F_j(r, \theta)$ ， $(j=1, 2, \dots)$ ，按 θ 坐标错位动作匹配，从距离最小的 j 和那时 θ 的偏移量能检出物体的种类和旋转角（姿势）。

按上例，用想识别的物体的全体像与预先准备好的标准像匹配时，一般处理规模都大。因此，开发出以数个部分模式为基础识别对象位置的复合型部分模式匹配法 (4)、(5)，被用于晶体管、集成电路、大规模集成电路的组装自动化。这场合，只要对象的必要部分进入视野就可以了。图 5.8 所示为晶体管的位置检出例，首先把在物体图像中与其他不同类的特征部分模式 P_1, P_2, \dots 预先记忆下来。先按模式匹配从图像中求出与 P_1 最合拍的位置。其次求出与 P_2 最合拍的位置。这时把这两个位置坐标间的距离 $d_1,$

和角度 $\theta_{1,2}$ 与预先记忆的对象标准尺寸、标准角度比较,若它的差小,就断定成 P_1 、 P_2 都正常而结束识别处理。然后,算作为离 P_1 、 P_2 的相对位置记忆下来的发射极位置 E 、基极位置 B 并输出。由此把金属线焊接在 E 、 B 点成为晶体管的接线。图5.9是进行这些工

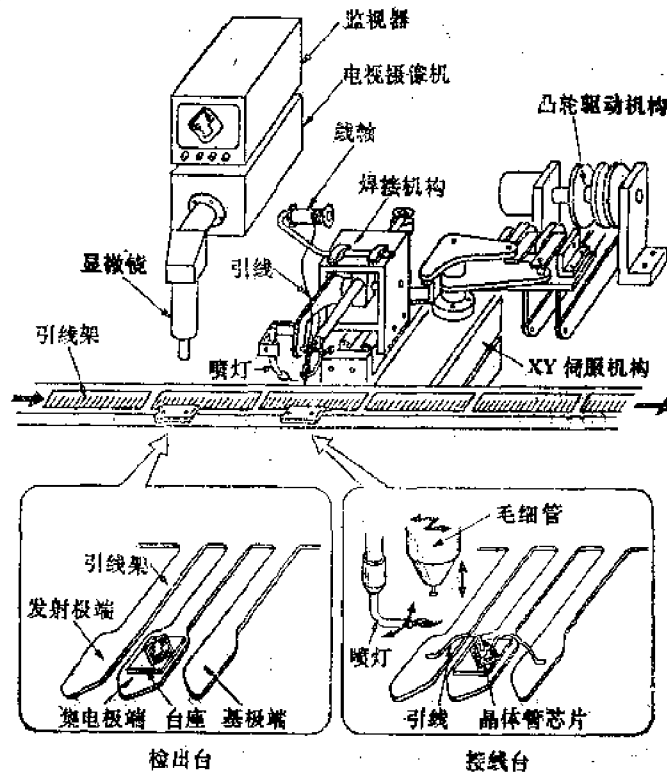


图 5.9 晶体管的自动组装

作的机械实例。假若上述的几何检测为 P_1 、 P_2 间不合格,那是 P_1 、 P_2 的有一个(或者两个)偏离了匹配位置,这时让与 P_3 匹配,在 P_1 、 P_3 、 P_2 、 P_3 间作几何检测,如果再不合格,对 P_4 作重复性地匹配。

对这种复合型部分模式匹配法,假定对一个模式 P_i 的识别概率为 p ,且不管什么 i 都一定,在第 m 次匹配前的成功识别概率 q_m 为

$$q_m = (m-1)p^2(1-p)^{m-2} \quad (5.6)$$

到第 m 次识别完了后的概率(累积概率)为

$$r_m = \sum_{j=1}^m q_j = 1 - (1-p)^{m-1} \cdot (1-p+mp) \quad (5.7)$$

例如,即使 $p=0.9$ 那样单个模式识别概率比较小的场合,有

$$r_2 = 0.81, r_3 = 0.972, \dots, r_8 = 0.9999999$$

随模式数的增加识别概率上升。这是因为在数个模式中至少只要两个模式求出是正常就行。

部分模式匹配高速实现的方法之一有图5.10所示的方法。它把二值化图像信号送进上述的二维专用内存中。随后,例如 12×12 像素的部分图像,与图像扫描同步地并行逐个调出。预先从计算机送进寄存器的 12×12 像素的标准部分模式(P_i)用144个异或电路为主体的一致度检测电路与部分图像比较,这时输出一致的程度量。这个一致度信号与过去的

一致度总在比较，得到比以前的一致度大的一致度时，更新一致度记忆电路，同时把这时的图像扫描坐标读入坐标寄存器。同样，在图像垂直扫描时间（帧）完结时刻，图像中最一致场所的坐标和那时的一致度记忆下来。因此在扫描完结时刻把这些数据送入计算机，在扫描回扫期间计算机作几何检测，同时下一个标准模式送给寄存器。这样，一个垂直扫

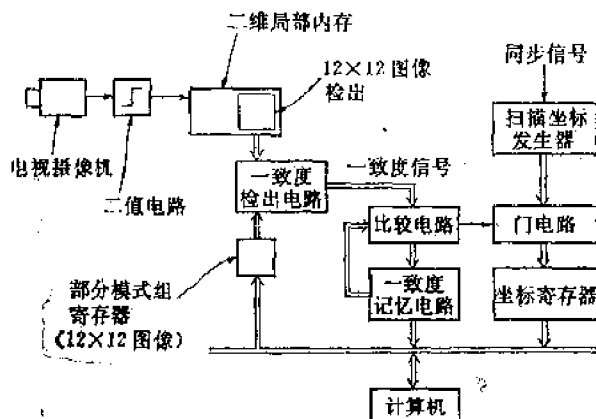


图 5.10 用部分模式匹配的视觉装置

描时间就为单位模式匹配所要时间 τ ，几何检测所要时间等表面上不出现，所以这复合型部分模式匹配的所要时间最少是 2τ ，即使标准部分模式准备好无限个（ $m = \infty$ ），平均所要时间的期望值为 $2\tau/p$ 。即 $p = 0.9$ 也不过2.22倍垂直扫描时间。

5.2.4 窗内像素计数法

在二值图像中设定几个窗，对窗里的明亮像素（或暗的像素）计数，靠这种简单方法

能进行物体存在的确认，物体位置和姿势的识别。这种方法因作计数的积分处理，有对噪声抑制强的特点。图5.11所示是用于大规模集成电路装接的例。因电极、引线是白的，它以外是黑的，所以，应用前述的部分模式匹配法首先检出电极的边缘，求出大概的中心 x_0 、 y_0 ，以此为基础，生成4个四方的窗。对其中亮的像素计数，能检出电极的方向、确认电极的形状（引出线的方向）。其次在把电极平分的位置作小的窗格，从各窗内白的像素的计数结果 $a_1 \sim a_6$ ，用下式计算电极更精密的位置 x 、 y 。计算式是

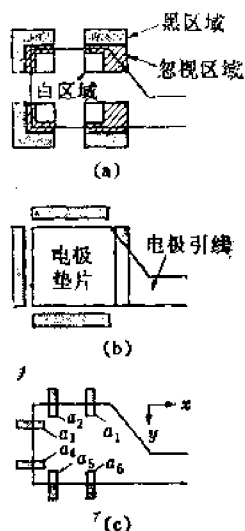


图 5.11 用窗内像素计数法的LSI电极识别
(a) 大概位置检出；(b) 电极形状确认；
(c) 详细位置确定。

$$x = x_0 + \frac{1}{z} \cdot \frac{a_5 - a_3 - a_4}{w}$$

$$y = y_0 + \frac{1}{4} \cdot \frac{a_6 + a_3 - a_1 - a_2}{w}$$

其中, a 是窗的面积, w 是窗格的宽。如果照这样把在LSI片子两端的电极位置一个一个地求出来, 就能求出片子整体的倾斜角, 根据LSI的设计数据能靠计算求出剩下的全部电极位置。

一旦用别的方法决定了物体的大概位置之后, 这种方法是极其有效的, 此外, 找出水泵的出水孔、进入孔, 把软管接上去的机器人也实用。这时候, 用上式的检出数值 x 、 y 移动握有电视摄像机的手臂, 进一步重复检出和移动, 逐渐地 x 、 y 把手臂控制到摄像机的中心位置。就是所谓采用的视觉反馈法。

另外, 对于移动对象开发出了检出它的种类和通过时间的方法 (9)、(10)。如图 5.12 (a) 所示, 用这个方法对物体的几个特征部分在视野内产生数个窗。这里设物体往右移动。如图 5.12 (b) 所示, 各窗分成独立的 4 个小区域, 左边两个区域与右边两个区域按对象的宽度划分一致。这时, 对本来应该是背景部分的却由对象覆盖的面积及本来应该是对象部分的却由背景覆盖的面积计数, 为 a 、 b 、 c 、 d 。这个计数每垂直扫描周期一次作一次能用简单电路实现。这时, 计数

$$\left. \begin{aligned} p &= a + b + c + d \\ q &= a - b + c - d \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

p 表示形状的匹配程度、 q 表示与窗中心的位置接近度。即 p 、 q 随物体的移动为图 5.12

(c) 所示的值。因此, 对数个窗都是 $p \approx 0$, 且 q 从正变为负的瞬间就能知道那个对象通过了。图 5.13 所示的方法实用于卸水泥杆型框螺丝的机器人。这个随型框的移动一检测出螺丝就拆卸, 一检测出肋或轮胎就退避, 这样控制是适应检出对象动作的机器人。

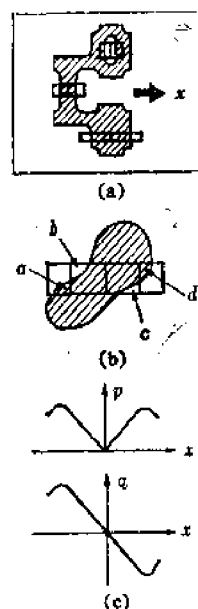


图 5.12 移动物体的识别方法
(a) 窗的生成; (b) 像素的计数;
(c) 伴随移动的 p 、 q 变化。

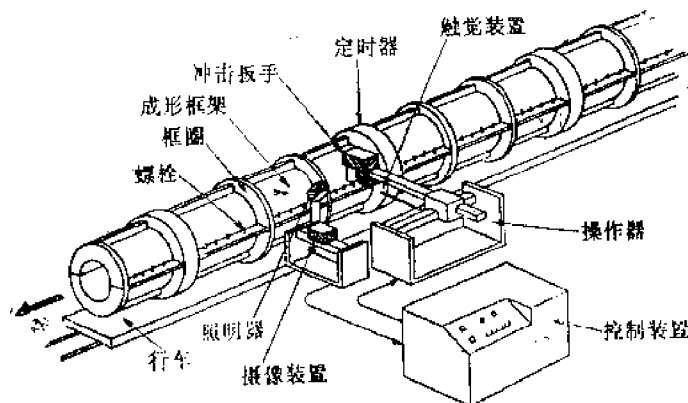


图 5.13 螺丝拆卸机器人

5.2.5 特征参数提取法

物体的图像二值化, 它的二值图像状况用特征参数来描述, 能依赖与这些参数的接近

程度怎样来识别对象。对多边形、圆这些比较简单形状间的区别，定义对象模式在某一直线上影射时的投影长和高，以及面积形状的固有特殊参数，在此基础上能识别对象 (11)。更通用的方法是，首先求出对象具有的重心位置和主轴，以面积、周长之外的主轴方向长度，绕主触的矩、重心和主轴为基准，检测出孔洞的位置和个数、各种通用参数等的方法 (12)。一旦测量这些参数 P_i ($i=1\sim m$)，用预先记忆好的第 j 个物体第 i 个参数的平均值 \bar{P}_{ij} 和标准偏差 σ_{ij} ，能计算出距离 D_{ij} ：

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i \left(\frac{P_i - \bar{P}_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2} \quad (5.9)$$

这时给出 $\min D_{ij}$ 的 j 是对象物。这里 w_i 是表示哪个参数值得重视的加权系数， \bar{P}_{ij} 、 σ_{ij} 是同一物体经数次视觉装置提示、训练而预先自动计算出记忆下来的。

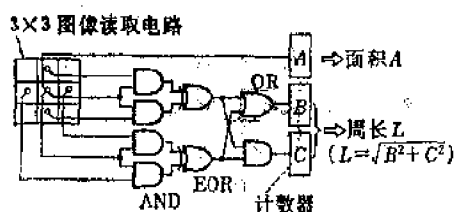


图 5.14 面积、周长的检出电路

另外，在对象比较限定了的用途中，能利用更有效的特征参数。例如鱼的形状识别 (13)、(14)，从它的二值图像提取体长、肚宽、尾高等参数，用它能自动分选捕获的几种鱼。还有黄瓜分选装置 (13)、(14)，同样从二值图像提取黄瓜的中心线，从细的一头起检测出前端和后端、检测出作为它们

之间距离的黄瓜长度。进一步从连结两端点的直线与中心线的偏离，测出弯曲度，以这些作为参数依据尺寸和形状能把黄瓜分出等级。

还有，通常为圆形的制品也很多，例如在二极管芯片的分选 (15)、药片的分选 (16) 的用途中，对象的周长 L 用图 5.14 所示的简单专用电路检测出，还用像素的计数测出面积 A ，求出 L^2/A 。这个参数对圆是定值 4π ，因此按与它的偏离程度能检测出表面有无伤。另外，因为对象对中心是点对称的，所以让得到的像素与它作 90° 旋转后的重合，用不同部分的像素计数也能判断欠缺或伤痕的有无。

5.3 触觉功能及其应用

5.3.1 触觉种类和用途

机器人为正确执行精密的工作，时刻检出与对象物体的配合关系是必要的，作为这种功能的有触觉。视觉用于掌握对象和包括对象在内的环境的大的状况，利用于工作程序的决定等高位置上的判断，触觉具有在工作执行过程的低位置上的判断，用于动作程序的细小变更实时控制机器人。

机器人的触觉可分成①接近觉、②接触觉、③压觉、④滑觉、⑤力觉五种。如图 5.15 所示，这些能装配在单个机器人的手指上，用来判断工作中的各种状况。例如，用接近觉知道对象物体在附近，手臂减速慢慢

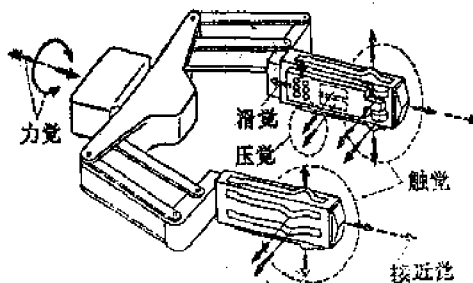


图 5.15 触觉的种类

接近，用触觉知道接触到物体，从它的状况控制手臂让物体到手指中间。合上手指握住物体，靠压觉控制握力。这时，假若物体意外的重靠滑觉来检测滑动，修正设定的握力来防止滑动，靠力觉控制与被测出的物体自重和转矩相应的力，或举起这物体，或移动这物体。

这五种触觉有各自得意的领域，能依据对机器人的要求把它们组合安装起来。特别是接近觉处在视觉和触觉的中间位置，能看成为预知接着要发生接触的检出器，对要机器人具有自我保护功能是特别有效的。还有，以死接触检测出与对象的距离为基础、控制机器人的轨道置于一定距离的检出器也是有效的。电磁式接近觉实用于焊接机器人⁽¹⁷⁾，在半导体晶片制作和检查工艺中，把显微镜控制在一定距离上的空气微电机，也能看成是一种接近觉。

除接近觉外的四种，都是在工作第一线接触对象，检出从对象那儿受到力的检测器，为此，要小型、轻便的同时，检测的稳定性、可靠性特别被重视。过去有使用导电橡胶、感压半导体、压电元件作触觉、压觉的提议，有使用球或滚轴作位置检测的滑觉提议，最近也有用集成电路试作力传感器的。但还是因为有灵敏度不够、磁滞特性或坚固性差等理由，未必适合工业上使用。现在使用应变仪、微型开关、伺服偏差作压觉和力觉的。

这五种感觉中的力觉在实用上也具有重要意义。像螺丝螺帽的旋紧、轴与洞的嵌合那样在受到对象位置的约束下必须控制力的工作，在组装工作中特别用得更多。由机器人作曲轴旋转动作等也是根据对象，机器人抓的前头位置受到约束的控制，对这些工作有必要靠力觉的检测作灵巧的控制^(18~20)。

5.3.2 靠接近觉的控制

作为接近觉的例子如图5.16所示，它是被开发出来的电磁式传感器⁽¹⁷⁾。在激磁线圈 C_0 里流过高频电流，因发生在金属对象物体上的微弱电流造成的磁力线变化由差动式联结的两个检测线圈 C_1 、 C_2 检测。这种方法能得到对距离2~8mm与距离成比例的输出电压，因传感器即能耐200°C以上的高温又能作成牢固的结构，所以适合用作焊接机器人的传感器。

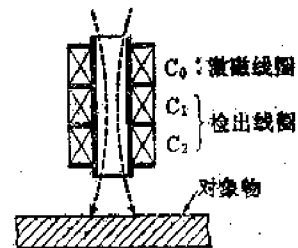


图 5.16 电磁式接近传感器

对焊接机器人使用这种接近觉传感器的

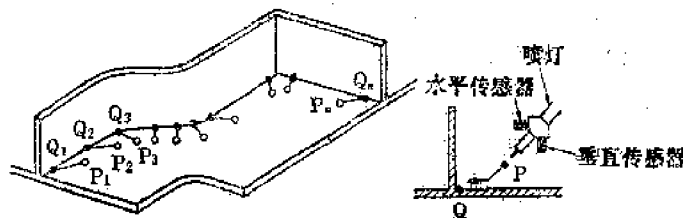


图 5.17 用接近觉的焊接位置示教与检出

优点之一是，即便粗略的示教也能正确的焊接。如图5.17所示，分别地示教点阵 P_1, P_2, \dots 一周，若首先求出决定自动焊接火焰的位置，在焊接线上的点 Q_1, \dots, Q_n ，随后这

些点插值不检测就能自动焊接。

另外，核电站的管道用焊接机器人也同样利用了接近觉⁽²¹⁾。在安装于管道的导向环上，装有触觉单元、焊接单元、驱动单元的载体在圆周方向边移动边焊接。这时如图5.18所示，边摇动传感器边用电位计测量它位置的同时，测量传感器的输出。由此检测出

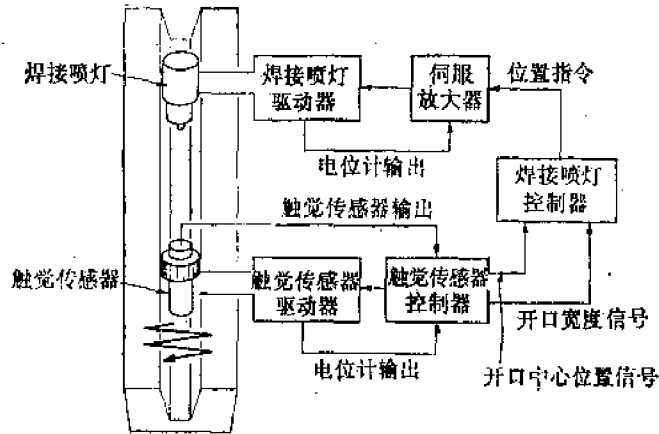


图 5.18 用接近觉的焊接轨道控制

被焊接部分的开口中心位置，由这个数据控制后面焊接火焰的位置。

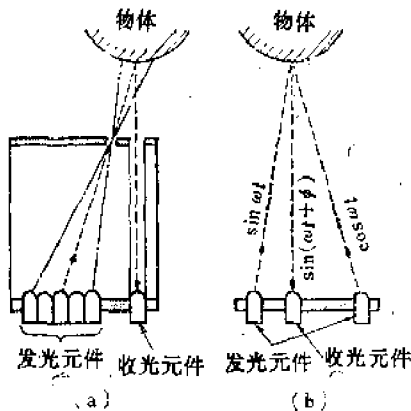


图 5.19 光学接近传感器

除上述电磁式外，还有超声波式、光学式的接近传感器的几种方案。图5.19(a)所示的横向并列的发光元件顺序发光，从反射光的光量变化和时间关系求出发光角度，就可能在2~10mm范围以0.5mm的精度检出⁽²²⁾。图5.19(b)对收光元件非对称安装的两个发光元件由正弦波、余弦波激励时，利用收光信号的相位偏差是距离的函数，能在10~60mm内得到±2mm左右的精度⁽²³⁾。

另外，还有用光纤发射光并接收它的接近觉，能实现检查核反应堆中粗糙内壁的机器人作位置决定用的触觉。

5.3.3 靠力觉控制

组装工作的典型实例是插入工作。这是把轴插入孔洞里的工作，轴的位置如图5.20所示，轴不断进入漏斗状的内部，而进行控制是有必要的。这漏斗的开孔与直径的差要尽可能的小，即使对熟练工人也是极其困难的工作。对这样的工作，靠有纤细手指的力觉反馈，对位置修正动作和插入动作作适宜地控制是必要的，而不熟练的工人不能对力觉和控制作连贯地成功操作，往往出现偏错，为找准洞穴重复作探索动作，在插入上花费时间的事是常见的。

(1) 主动插入 为作这种插入工作，开发了伴随着插入检测反作用力来控制手的位置的主动方法⁽²⁴⁾。这种方法如图5.21所示，采用抓住物体的保持机构，让它在X、Y、Z的三轴方向上移动的位置决定机构，和在它中间柔软连结两者的检测机构。检测机构由

弹簧和用电位计的力检出机构构成，能检测三轴方向的力分量。这个装置如图5.22所示的

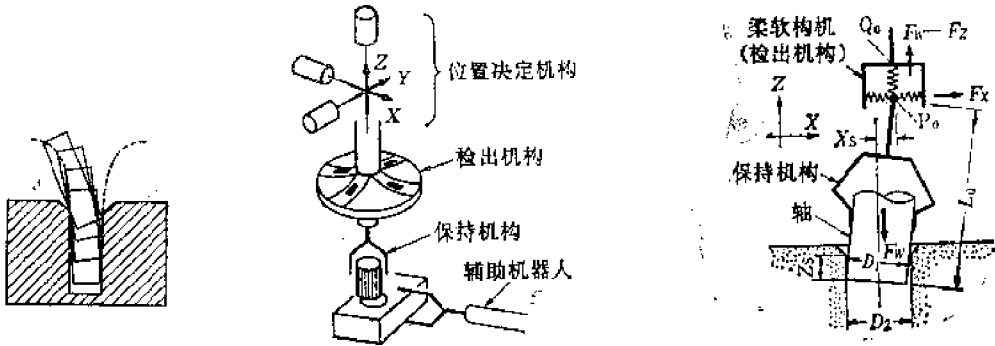


图 5.20 插入的漏斗

图 5.21 插入工作机器人

图 5.22 插入动作的二维模型

二维模型时， P_0 是柔软机构的变位支点，与装有Z方向及X方向上的弹簧的位置决定机构的移动端 Q_0 结合。点 P_0 的Z方向的相对变位由轴与洞穴接触产生的力 F_z 形成，靠把这个力 F_z 控制在一定值以下就可能软接触的插入。

现在不加入X方向的力，因此处在 Q_0 和 P_0 间没有相对变位的状态，相当于上述漏斗形状的式子能近似表示成

$$\frac{X_0}{L_0} \approx \frac{\sqrt{d^2 + 2c} - d}{1 - d\sqrt{d^2 + 2c}} \quad (5.10)$$

这里 $d (= Z_0/D_2)$ 表示插入深度比， $c (= (D_2 - D_1)/D_2)$ 表示空隙比。以此状态为基础再作插入，沿插入的漏斗点 P_0 在 $-X$ 方向上变位，对应弹簧系数的力 F_x 移动点 P_0 。这时，发生与此匹配的力矩的那种力由洞穴壁作用于轴的接触点，因此这个摩擦力妨碍着轴的插入。也就是说，这个力 F_x 一旦在某值以上，由于从洞穴壁来的反作用力形成的摩擦力，使得插入变得不可能。该临界值近似于

$$\frac{F_x}{F_z} \leq \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{Z_0}{L_0} \quad (5.11)$$

这里， μ 是摩擦系数。这时把点 Q_0 往洞穴中心方向($-X$ 方向)移动， F_x 减少，轴再插入就成为可能。能从式(5.10)解出插入深度比 d 就明白， Q_0 的初期位置偏离洞穴中心无论多少，到某个一定深度插入就可能。如果是在不超过用式(5.11)决定的插入临界程度的初始位置，靠这个柔软机构不控制就能插入。

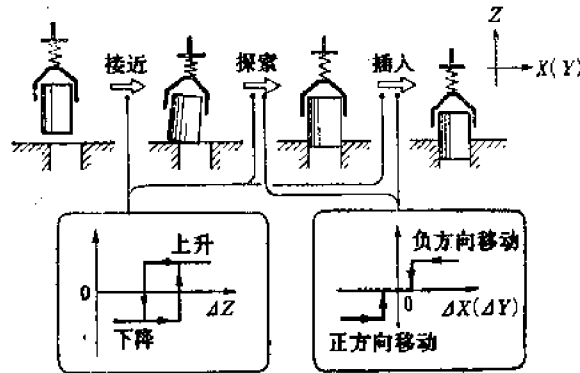


图 5.23 插入的控制算法

这种主动地插入能以图5.23所示的算法为基础进行。就是说让轴接近洞穴，用手腕子的柔软机构从轴倾斜多少就能知道洞穴的方向。这时边进行轴方向的姿势动作修改边找洞穴插入。例如，对直径20mm、空隙7~32 μ m的表面没敞开的洞穴、插入深度10mm的场合，初始位置偏离 ± 2 mm，用上述方法可正常工作。这种场合需要时间1s，单单插入动作是0.2s左右。

假若对象的孔穴预先在面上已取好，仅用Z轴方向的力传感器就可能插入⁽²⁵⁾。在这种场合，用准备好的几个探索模式来移动位置决定机构，检测出沿插入漏斗轴正好稍稍插入来推算洞穴中心的方向。由此控制轴往中心方向，随后使其移动到不要控制也能插入的区域就行。

(2)被动插入 相对于靠上述那样的位置决定机构采用位置的主动控制而插入的方法，开发了位置决定不控制的被动插入方法⁽²⁶⁾、⁽²⁷⁾。这方法的原理如图5.20所示，附加一东西在轴下端中心，类似于把它往洞下伸引导轴进入洞穴的动作。这方法用如图5.24所示的机构构成。它是容许各横向弯斜和角度方向弯斜的双重联系支撑机构。用此机构轴一压到洞穴，轴就滑进洞穴表面敞开部分，无论洞穴倾斜多少都以轴前端为中心旋转，沿着洞穴滑入。因此，这个机构被称作离心弯斜装置(RCC)。

这个机构的特点在于扩宽了不要控制可能插入的区域。但是，缺点是洞穴表面的敞开部分不可缺少，而且轴初始位置的偏差不能超过那表面敞开部分的范围。假若轴的前端正好对准表面敞开部分，靠插入能滑落进入洞穴，插入时间也比0.2s左右能快些，但是，假若超过这个范围，要么把表面敞开部分进一步加大，要么用前述的主动方法作洞穴的探索。

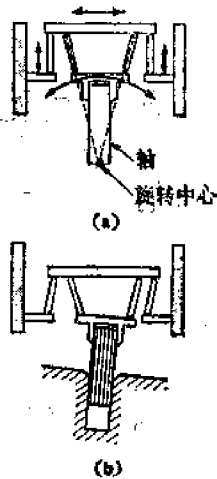


图 5.24 被动的插入机构

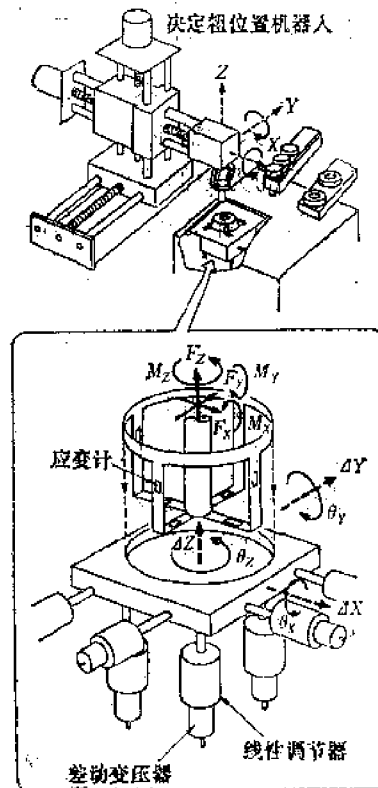


图 5.2 用有传感器的工作台组装

(3)具有传感器的工作台组装 不仅限于插入工作，对一般组装工作力觉和精确位置决定都是必要的。这些功能都装在如图5.25所示的工作台上，在它的上方让通常的机器人进行工作，对传感器的大小，装配等的限制也不严格。这个系统，从8组应变计的输出

计算三轴 (X 、 Y 、 Z) 方向的力 F_x 、 F_y 、 F_z 和绕各轴的力矩 M_x 、 M_y 、 M_z ，依靠用差动变压器检测位置的8个直线传动机构，使工作台在三轴方向移动或绕各轴旋转。以这种构造为基础，进行轴和轴承的插入动作的场合，把插入方向的负荷管理在一定范围的同时，横向负荷、力矩也尽量小的那样控制工作台的位置。要使插入完了时轴和轴承之间的力和力矩保留最小，这时工作台的位置相当准确地表示了插入洞穴的中心位置和洞穴的倾斜。因此，统计预测这两个参数的分布，在下次工作时用这个预测的参数能逐渐缩短工作时间⁽²⁸⁾。这样，从工作结果状况能实现熟习功能。

5.4 智能机器人

5.4.1 智能机器人的基本功能

具有视觉、触觉那样的感觉功能，能自行决定行动的机器人总称为智能机器人。这与仅单纯重复执行由人教会的工作顺序的机器人不同，对于外界变化，它必须能自行决定更好的顺序来进行工作。这种智能机器人的研究开始于60年代，麻省理工学院、斯坦福大学、科学研究所、爱丁堡大学、电子技术总合研究所、日立中央研究所等都进行过开创性研究。

一般，对智能机器人要求的功能基本上有以下三点。

①目的理解功能；②环境理解功能；③行动规划功能。

在5.2节、5.3节叙述过的几个机器人，相当于部分的且小规模的形式实现了这些功能中的几个。从前的工业用机器人是人们以一对一的形式（机器语言、汇编语言等）命令机器人动作。这不得不把人们要机器人完成的目的展开成详细的行动规划给机器人。对人工智能机器人，用与机器人的移动一般没有关系的作法能简单地指挥它，这是所希望的。就是说仅提示目的，随后的详细工作顺序机器人自己考虑，这是最理想的。

一般，对提示目的被认为有①语言 (linguistic) 的方法；②图形 (pictorial) 的方法两种。机器人为理解这些指令、明确自己的全部工作，有恰当充分的知识是必要的。因此，目的理解功能是正确地使用知识来理解人们使用惯了的语言（高级语言、尽可能是自然语言）或图表大体上提示的目的的功能。

相对这种目的理解功能是要明确目标 G ，环境理解功能是要明确现状。就是说，首先明确初始状态 S 。为此，依靠感觉功能理解对象和对象存在的环境、或者理解机器人自身存在的环境是必要的。特别是视觉功能对这种环境理解是不可缺少的。所谓理解环境，首先分析情景 (scene analysis)，识别在其中的各个物体 (object recognition)，作出记述这些关系的环境模型 (image understanding)，都是不可少的。这环境模型成为机器人的一种知识。

行动规划功能是为了达到（或完成）由目的理解功能得到的目标 G ，以环境理解功能得到的初始状态 S 为出发点，规划采取怎样的行动策略的功能。假如解有几个，利用什么评价基准决定最佳策略是必要的。机器人的行动能以工作序列来表现，各工作是单位动作序列。这就存在序列的最佳顺序。因此，可以说行动规划功能是决定这种最佳顺序。倘若在执行那行动的途中出现没有预想到的状况变化时，那行动规划本身在途中要动态变更是

必要的。这种时候，从初值 S 到目标 G 整个过程中都要让环境行动功能一直工作着，有必要随时用最新信息来判断。靠视觉作环境理解的场合，这与称作视觉反馈的技术等价。

对智能机器人，以上述三种功能为中心知识有一定的位置。以知识为基础能理解目的、理解环境、制定行动规划。特别是目的理解和环境理解功能，也要有智能机器人的输入功能，因此要对机器人具有增加知识、丢掉旧知识或错误知识，即更新知识起作用。这种增强知识的功能叫机器人的学习功能。如果利用学习获得的知识、整理成容易的形式并系统化，那更能增加机器人行动规划的最佳适应性，例如能尽早地决定意志付诸行动。这种知识的系统化与机器人的熟悉程度密切相关。

现在，为了能学得这些知识、能有效地利用，正进行着知识的记述法、使用知识的推理法等的研究。在知识记述中考虑到了叙述逻辑、帧型式、制作法则等几种形式，从单个知识引导出更高层的知识的概念形成问题，靠知识推理引导出作为目的结论的问题解决功能，作为计算机科学一个领域的人工智能的研究正广泛地被进行起来。

5.4.2 目的理解功能

所有的工作以图表概要地提示机器人的实例是已开发出来的如图5.26所示的智能机器人⁽²⁹⁾、⁽³⁰⁾。它用三面的图形提示由几个多面体构成的简单组装体，机器人解译这图形，

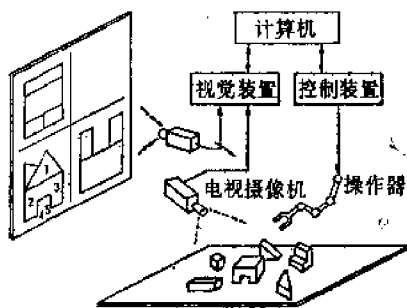


图 5.26 看图组装物体的机器人

找出组装体的立体构造和它的构成零件。为此，首先要依靠图像处理找出各面图形的线段和顶点。这时，立体空间内的点用它的 XY 坐标、 YZ 坐标、 ZX 坐标分别表示在顶视图、主视图、侧视图上，如果调查各面图形所有顶点集合间的对应关系，就能求出空间顶点的集合 P 。这时，一般可在图面上作些省略，使用如下的经验知识：

①如果在某一面上图形的顶点在其他面上没有对应点，有通过该顶点垂直于纸面的线存在的可能性大（图中点2、3、4、5）；

②某个面上的顶点是T字型且在外边上，而在别的图面没有表现出来时，因物体重叠的表现，它是假顶点的可能性大（图中的点1）；经重复地棱线假定和验证能求出空间的顶点。下一步调查这样求出的空间顶点的集合 P ，其任意两个元素 $p_m = (i, j, k)$ 和 $p_n = (i', j', k')$ 之间是不是存在空间棱线。这是调查映射线段 ii' 、 jj' 、 kk' 是不是包含在各图面的线段集合中的基础。这样空间棱线的集合 L 作为端点组求出。同样，也能以各空间面映射在各图面是直线还有闭环线表示为基础，来求解空间面的集合 S 。

下面，对这空间面集合 S 的所有元素 s_i ，设

$$\left. \begin{aligned} L' &= U (s_i \cap s_j) & i \neq j \\ L'' &= U (s_i \cap s_j \cap s_k) & i \neq j, j \neq k, k \neq i \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

L' 是同时包含在两个面以上的棱线集合， L'' 是同时包含三个面以上的棱线集合。因此， $L' - L''$ 是只包含两个面的棱线集合，共有这种棱线的两个面必定构成同一个立体。因而称这两个面为紧接合。另外，共有包含于 L'' 的棱线的面未必构成同一立体，所以叫松接合。

如图5.27示例所示,把紧接合的那些面作为子集,面的集合 S 就分成 S_1, S_2, \dots, S_n 个子集。这些子集是以包含于 L 棱线为切口的壳。这种壳让切口堵塞起来那样接合,就得到单个的立体。对这些立体,判别是不是共有同一空间,如果是共有就分开它们,求出个个零件的集合 B 。图5.28所示是靠这种图形识别求出立体和它的构成零件的例子。使用这样的机器人能理解应该使用什么零件作成什么立体的工作目的。

除了以上靠图形作目的提示之外,还有利用声音识别技术用语言发令的例⁽²¹⁾,这与随后的声音理解的研究、自然语言理解的研究联系起来派生出机器人语言的研究。但是,这种目的理解的研究在工程上总的还没超过初级阶段,不过,能够想到今后,特别是图形信息的机器人的控制在计算机辅助设计(CAD)技术和机器人技术结合进展中,其重要性将进一步增强。

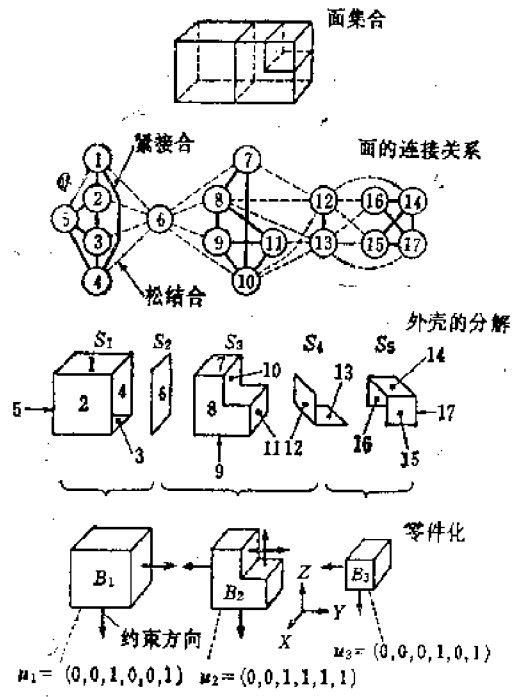


图 5.27 构成部件的理解过程

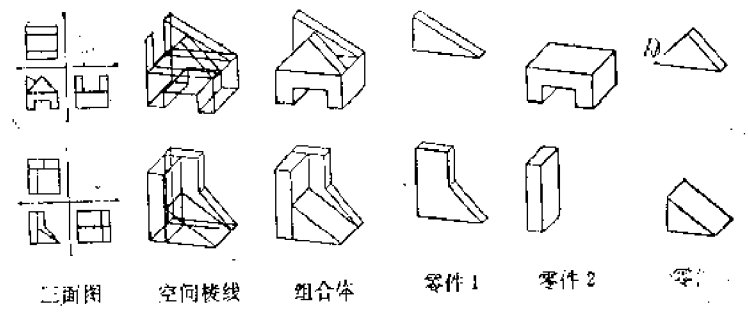


图 5.28 图面识别结果例

5.4.3 环境理解功能

以机器人分析情景(scene)理解环境的功能为基础,当初选择数学上容易描述的堆积物世界(积木)进行了大量的研究^{(28)~(32)}。要识别包含在情景中的各物体,用摄像装置捕捉情景,用计算机对那个图像作图像处理,明确记述各物体具有的构造,并且表明各物体的位置和姿势,根据需要各物体间的相互关系也必须明确。

(1) 用图像处理来构造化 识别物体的方法有①以线的提取为基础的方法;②以面的提取为基础的方法两种。线提取法,靠已经叙述过的二维滤波均匀处理首先增强图像中物体的棱线,再把各棱线作为线段提取出来,适合于直线、曲线。其次从各线段的交叉点计算出图像上的顶点位置,如果有必要,再从线段的连接关系求出面,用列表构造、图形构造记述这些关系。

面提取法是，首先把在近傍状况（明亮、颜色、模样等）非常相似的像素（或包含它们的区域）看成为同一面上的，按这种考虑方法把这些融合起来作为面的元素，进一步把这个面的元素与邻接的面元素结合，融合成更大的面元素。最终会把图像分成几个面的集团。由此记述这些面的形状和与其他面的连接关系的构造。

这样得到的构造，还是在二维画面内的关系，不是描述三维物体的。用一支眼睛看，图像是物体在二维面上的单一映射。因此，为了作三维的描述，某些知识（规则、条件等）是必要的。图5.29所示的线条图像常常被认为是放在桌子上的正方体，而从这同一图像能得到如下结果吧：是放在视点与各顶点连结线上任意空间位置的正方体，或者是分别三块

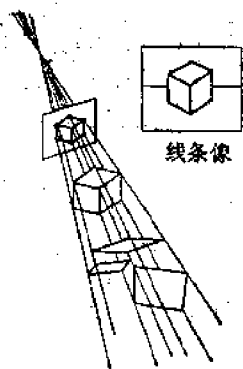


图 5.29 线条图像理解的多样性

纸片的排置。就是说，预先有“对象中有正方体”的知识对识别是必要的，而且知道它的三维位置和大小，例如说与“一个面是放在桌子上的”的先验知识一起，从视点到桌子的距离、角度或视野大小建立某些标准尺度是必要的。用这些在空间上初步识别物体。

从实际图像求物体的构造有几种情况，照明条件不好棱线不能检测出来呀，别的物体重叠盖掉了一部分等原因信息不够呀，或者其他物体的影子作为候补棱线被检出等有多余信息等。有阴影的场合，如果预先知道

光源方向，重复进行假设和验证，分离阴影和真的棱线是可能的。假设棱线能被正确地检测出，即使是复杂的对象，以各顶点的性质（T形、V形）和各棱线的性质为基础分离对象，至少综合属于同一对象的物体区域是可能的⁽⁸³⁾、⁽⁸⁴⁾。但是，现实的视觉问题尽管要得到有这种完全棱线的图像，一般因照明条件难，除去简单的对象场合那几乎是不可能的。物体识别中，根据这种不完全的记述和预先准备好的完全记述库（或者另外的不完全记述库）之间的部分结构匹配，能判断对象。

为更完全地描述物体，首先从容易看到的地方求出棱线，随后利用构造知识从已求出的棱线假定其他棱线的存在，并对那部分详细分析，这就是被提出来的非层次方法⁽⁸⁵⁾。还有，从几个候补物体的构造模型中，利用已看出的信息选择出最有希望的构造模型，接着判断应该从其中提取出的物体特征，再次进行特征提取。这也是被考虑的模型规范化的回归方法⁽⁸⁶⁾。

例如，桌上场面、室内场面、屋外场面那样的情景若进一步复杂化，让这些方法更进一步，添加支持提取棱线或面那样的特征的广泛知识，而且把各对象的性质和各对象间的关系的知识也给计算机的必要性就出现了。

(2) 方向编码法 作为提取棱线和作出构造的有效方法之一有方向编码法⁽⁸⁷⁾。假定真正的图像为 $f(x, y)$ ，从摄像装置得到的明暗图像是 $g(x, y)$ ，由于照明状态和背景物体的变化，容易有如下明显变化：

$$g(x, y) = af(x, y) + b \quad (5.13)$$

a 、 b 分别表示对比度和取像级别的变动的参数，在短时间范围内可以看成常数。因此，利用

$$\mathbf{V}(x, y) = \left(\frac{\partial g(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right) \quad (5.14)$$

$$A(x, y) = \arg [\mathbf{V}(x, y)] + \frac{\pi}{2} \pmod{2\pi}$$

从 $g(x, y)$ 图像变换成方向编码图像 $A(x, y)$ 。这里 \arg 是梯度矢量 $\mathbf{V}(x, y)$ 的偏角。这样，相对于式 (5.13) 的变化方向编码图像 $A(x, y)$ 是不变的，而且各像素值不是单一明亮度信息，而是如图 5.30 所示的明暗边界的方向的几何信息。用这种方向编码图像，如在长方形的识别中，方向编码的频度分布用四个方向的峰值表示，所以依据每经 $\pi/2$ 重复这频度的分布得到大的峰值，能知道长方形的姿态角。长方形与从正上面看长方体相当，即使从斜向看到的图像，考虑到摄像装置的倾斜角，同样从频度分布能出现长方体的棱线部分以识别位置、姿势。这个方法，即使有背景噪声、物体上存在有符号或模样也能很好提取棱线，所以对流通系统中的台球箱等的长方体形状物体的识别是特别有效的⁽³⁸⁾。

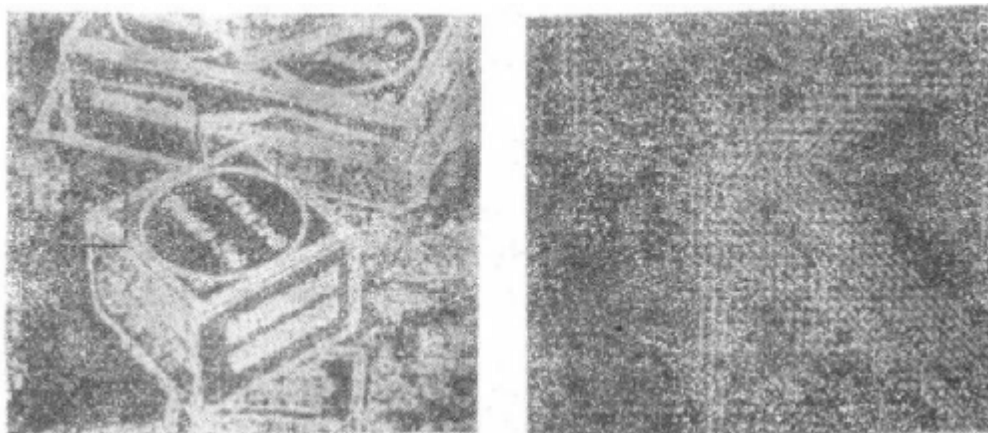


图 5.30 方向编码图像例
(a) 整体图；(b) 部分放大图。

(3) 光切断法 相对于以它明亮度信息识别对象物体的被动方法，有用信息载体的点光源、狭缝光源、栅屏光源等进行投影的主动方法。其中，特别是用狭缝光的方法，因有用光屏轮换照对象的意思，故也被称为光切断法，对此种方法进行过广泛的研究。这种方法如图 5.31 所示，采用了三角测量原理⁽³⁹⁾，由于狭缝光的投影位置和摄像位置的关系是已知的，若观测对象上的辉线就能直接得到到那儿的距离信息。

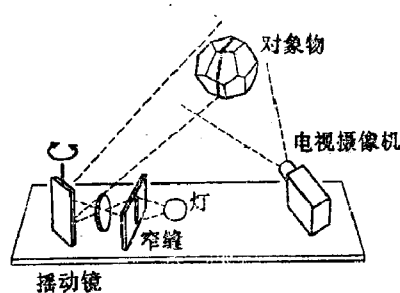


图 5.31 光截断法原理

图 5.32 (a) 是逐次偏错狭缝光投影而的对象像，假若用各狭缝在图像上的间隔、方向把图像作区域分离，平面信息就能提取。还有，利用狭缝的距离信息可计算图像中的小的面元素的空间方向，如图 5.32 (b) 所示，若判断相邻面元素的相似性逐步扩大面元素，曲面也能检出。从这种面信息求面间的连接构造，利用预先存入计算机里的关于对象模型

或对象的知识，能分离对象、识别对象⁽³³⁾。

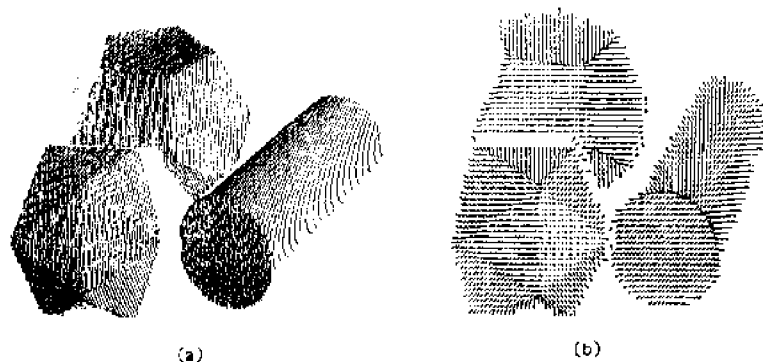


图 5.32 用光截断法处理
(a) 获缝像；(b) 面元素的方向。

被动的的方法有对同一质材的对象，不易得到对比度，因此难于捕捉形状的缺点，而因为这种光切断法采用高亮度的部分照明，具有从光切断线的变化能更好地观测形状的优点。因此，如能利用作焊接机器人的视觉装置，能由它检测出焊线并沿着它自动焊接。还有，检测在传送带上流动的零件，从七零八落的元件箱中取出元件的问题，印刷板上焊接不好的分析等都可应用。

除光切断法，还有是被动的、从能得到的距离信息作相关的立体观测法⁽⁴²⁾。用这种方法是从两个方向观测同一对象，根据相关运算求一个图像中的某一部分模式与另一图像哪部分相当呢。这种方法的缺点是运算要花时间，运算结果若是多峰就未必能找出最大相关的对应位置，等等。

5.4.4 行动规划功能

为了完成给定的目的，这个功能是在给定环境下规划、决定让对象进行的最佳行动的功能。如前面叙述过的那样，按照图形进行组装的机器人，要考虑从对桌子上乱放的各种零件的识别结果组装成图形所示的立体的顺序。

在该例中，因各零件以多种姿态被装配，所以作从（物体放置状况的）出发点到（图形表现出来的组装体的）目的点的前向探索（forward search）运算复杂。与此相反，一旦采用从目的点向出发点的后向探索（backward search），问题就简单了。就是说，不是从零件到组装体的“组装”，而是首先考虑从组装体到零件的“分解”顺序。若求出了分解顺序，相反就为组装的顺序。

如图5.27所示，组装体是各零件的公共面作约束面的连结结果。组装体的最下面也就是桌子的上面是一个约束面。零件 B_i 的约束矢量 u_i 能表示成

$$u_i = (a_{+1}, a_{-1}, a_{+2}, a_{-2}, a_{+r}, a_{-r}) \quad (5.15)$$

这里

$$a_r = \begin{cases} 1 \cdots \cdots r \text{方向上被约束时} \\ 0 \cdots \cdots r \text{方向上不被约束时} \end{cases}$$

显然，自由矢量用各否定的 \bar{a}_r 来置换 u_i 中的各元素为好。这时，原则上能不能分解零件 B_i ，要用下面的逻辑式来计算：

$$\overline{a_{1x}^2 \cdot a_{1y}^2 \cdot a_{1z}^2 \cdot a_{2x}^2 \cdot a_{2y}^2 \cdot a_{2z}^2} = \begin{cases} 1 & \text{可能} \\ 0 & \text{不可能} \end{cases}$$

这表示上方是自由的，且 x 、 y 在哪个方向上都是自由的。但还没考虑零件或抓握机构之类的物理状况。对原理上可分解的物体 B_i ，从除 B_i 的约束面外的构成面出发来运算互相平行的、它们之间的距离在抓握机构的最大抓握范围以内、且在那面垂直方向有一方在其他物上投影重叠出现的相对面存不存在。这些对作为抓握面的候选，并把重叠部分的中央位置作为抓握位置记忆下来。再从这抓握位置往自由矢量方向按某个规定间隔量计算偏离位置。在实际工作时，把零件高速移到这里，从这儿再慢慢地开始接近空间位置。一旦这样求出物理上可分解的零件 B_i ，关于这个零件的连接面就消失，转向下一个零件的运算。这就完成了图5.33所示的分解树。在该例中有三个分解顺序，即有三个组装顺序能求出。

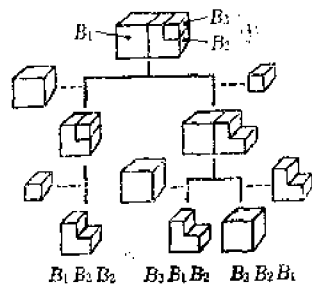


图 5.33 分解树

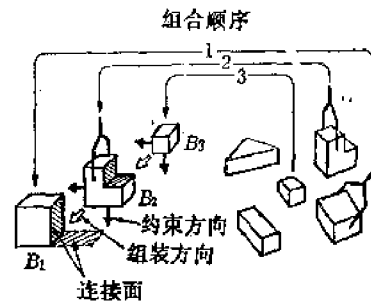


图 5.34 组装顺序的决定

为了从中找出最佳组装顺序，要与物体识别结果对照进行。就是说，要调查用分解过程求出的抓握面作为实际零件不与桌面连接的自由面是不是存在。假若不存在，要抓握别的面就得修正姿势、修正对抓握面的抓握，这种“替换”动作是必要的。这种检验必须对所有的零件都进行，要采用所谓替换的重复动作次数最少的组装顺序。图5.33所示的例按图5.34装配物体时，仅三个组装顺序 B_1 、 B_2 、 B_3 的替换次数为0。接着考虑手的机构、决定抓握方向和位置、执行组装顺序。

除上例之外，水泵的模拟组装、积木难题⁽⁴³⁾之类也能实现以视觉信息为基础的行动规划功能，特别是吸尘器的模拟组装⁽⁴⁴⁾、⁽⁴⁵⁾、开发出了用有感觉的两支手进行相辅协调工作。

5.5 自主型移动机器人

5.5.1 移动机器人和感觉

移动机器人是以移动在对象、环境中工作的机器人。静止机器人用机器人上的某个固定位置作原点的机器人坐标系来描述环境，在其中移动手臂进行工作的。以此对应的移动机器人，是使这工作空间大幅度扩大为目的的东西，必须用以环境内某定点作基准的坐标系描述机器人的位置和姿势。为此，移动机器人一定要有检测出自己位置和姿势的感觉手段。

移动机器人的又一重要感觉，是检测在移动空间内的障碍物的感觉功能。这是要事前

检测随着移动产生的与障碍物的接近、随后要么停止、要么回避的功能,从机器人到障碍物的距离检测就是基础。这也是以障碍物为基准同自己的相对位置的检测。这种功能也能看成是机器人的视觉功能、触觉功能,作为它的实现手段考虑有电视图像处理、利用光传感器、超声波、触针、空气压缓冲器等多种方式。

移动机器人有有轨式和无轨式。有轨式机器人的移动空间是一维的,因此只能用沿着轨道检测位置作位置决定。相对应的无轨式其移动空间是二维的,因此位置、姿势的检测有着重要职责。

即使无轨式移动机器人按引导路线被限制在一维上移动,机器人的控制也是极其有趣的。这引导路线有光学检测贴在地板上的条带方式,有电磁感应检测铺在地板下的电线中流过电流产生磁场的方式。哪一种方式都要在想移动的线路上形成引导路线。这些方式对工厂中自动搬运物体的机器人实用⁽⁴⁶⁾。相应的还有叫作离散引导路线的引导符号方式。它是在地板或墙壁上按适当间隔设置各种符号,从识别这些符号的形状知道引导路线是交叉点、左转、右转等的方式⁽⁴⁷⁾。还有一种无轨移动机器人的位置检测方式:定点观测方式。是与船只双曲线导航基本上相同的原理,在几个定点发射不同的信号,机器人接收它们,或者在几个已知的固定点观测机器人发射的信号,进行运算的方法。

对这种方式、依据识别的外界状况能自适应动作的无轨机器人专门称作自主型移动机器人。自主型移动机器人就是没有前述的环境理解功能和行动规划功能,它也是智能机器人的一种。根据键入的文字发现堆在屋内的堆积物体并把它运到门口的工作,就是这种研究实例⁽⁴⁸⁾,寻找电源插座充电后离开的机器人⁽⁴⁹⁾,探测火星的机器人计划⁽⁵⁰⁾等都是几个尖端的研究。

5.5.2 地图规范的移动机器人

作为自主型移动机器人的环境理解功能最重要的是视觉那样的概要识别功能。但是,一般由于图像处理的处理时间长,作为时刻移动的机器人的视觉今天还不合适。但若把视觉简化成专用硬件,例如利用立体视觉原理,无人驾驶汽车技术上已可能⁽⁵¹⁾。

一般,对自主型机器人希望环境理解和行动规划能并列实时进行。假如预先把机器人移动空间的环境模型作为知识存起来,用某些形式把外界状况的分析结果与这环境模型对照,原则上能决定自己的位置。假若不具有环境模型的先验知识,有必要在自主行动中重复观测外界、逐渐建立起似乎可靠的环境模型。这种场合对机器人来说,自己的脚是唯一的依靠,把初始位置作为基准,准确测出从那儿开始的相对移动位置,用那坐标来描述环境。移动机器人的典型环境模型是地图。有地图时,以初始位置 S 和目标位置 G 为基础,对地图上可考虑的几个路径作动态规划,例如成了所用时间最短来决定最佳路线的问题。随后按地图上规划的要点测量环境,修正与地图的偏差,逐步朝目的地前进。这时,如果检测到地图上没记载的不明白的障碍物就减速或停止,再次修改行动规划,给出从现在到达目的地的最佳路线。

5.5.3 不带地图的移动机器人

不带地图的机器人有探索路线的问题。还有,连目的地 G 也不知道时,机器人有必要用随机操作来发现它。若至少明白了从现在位置看目的地的方向,控制机器人优先向那

方向前进，边判断有无障碍物边修改移动方向。

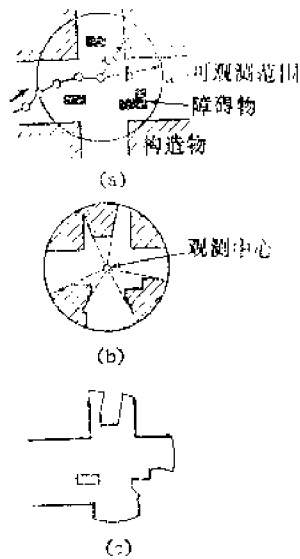


图 5.35 移动机器人的环境识别

(a) 机器人环境；(b) 环境的观测结果；(c) 存储的地图。

现在设机器人要理解环境的感受是具有距离的传感器，这距离传感器可以考虑成视觉，也可考虑成触觉中的接近觉。如图5.35 (a)所示，最大测定距离为 R ，以机器人为观测中心能测定在任意方向 i 到障碍物的

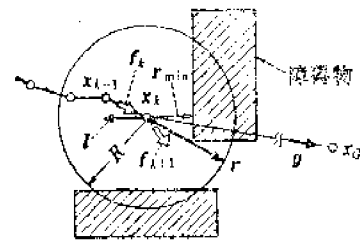


图 5.36 移动路线的决定

距离 r_i 。这时包括障碍物在内的环境被识别成图5.35 (b)那样。综合到此为止观测点的观测结果，地图能像图5.35 (c)那样被存储下来。现在，设机器人时刻 k 在位置 x_k ，目的位置 x_G 是已知的，如图5.36所示到目的的方向矢量 g 能表示成

$$g = x_G - x_k \quad (5.16)$$

现在，把在现在地 x_k 识别的已知环境表示成在 i 方向有大小 r_i 的矢量 r_i ，用

$$r \cdot g = \max r_i \cdot g \quad (5.17)$$

求出最大内积矢量 r ，这是表示在与目的地偏离不大的范围内，似乎最好线路方向矢量。

另外，环境矢量 r_i 中， $|r_i|$ 最小的矢量 r_{min} 表示从机器人到最近障碍物的矢量。这里考虑用

$$l = -r_{min} / |r_{min}|^2 \quad (5.18)$$

表示的矢量，这是与最近障碍物的距离平方成反比的、朝向障碍物相反方向的冲突回避矢量。因此，从现在位置的行进方向矢量 f_k 用适当的加权系数 w_1 、 w_2 、 w_3 ，可计算随后应该的行进方向 f_{k+1}

$$f_{k+1} = w_1 r + w_2 l + w_3 f_k \quad (5.19)$$

这是在参照过去行进方向的同时，把最新发现的行进方向的修正和为回避冲突所要的修正加起来，决定新的行进方向⁽⁶²⁾。这时，一旦冲突回避项 w_2 大，回避、接近、接近、回避那样重复性的振荡动作就增加，惯性项 w_3 若大，小探索就难于奏效。

这样，机器人走过的路线就能与环境模型一起记忆下来。例如从目的地返回出发点时，省略了再观测就能让它高速退回。另外，由于障碍物的形状和放置，钻进死胡同不知从一个地方逃出来的场合也会有，这时就转换成别的行动战略，改作随机操作，至此参照以前的地图、开拓未知部分。可以想象，自主型移动机器人在人不便接近的危险领域上作业，具有越来越大的重要性。

参 考 文 献

- (1) Ejiri, M., et al.: "A process for detecting defects in complicated patterns", *Comput. Graphics & Image Proc.*, **2**, pp. 326-339 (1973).
- (2) 巨瀬道弘, ほか: "複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式", *電学論*, **94-C**, **5**, pp. 89-96 (昭49-05).
- (3) 鳥野 武, ほか: "複雑パターンの傷認識", *電学論*, **95-C**, **3**, pp. 53-60 (昭50-03).
- (4) Kashioka, S., Ejiri, M. and Sakamoto, Y.: "A transistor wire-bonding system utilizing multiple local pattern matching techniques", *IEEE Trans. Syst., Man & Cybern.*, **SMC-6**, **8**, pp. 562-570 (Aug. 1976).
- (5) 柏岡誠治, 江尻正員, 坂本雄三郎: "時分割パターン認識技術による群制御トランジスタ組立システム", *電学論*, **96-C**, **1**, pp. 9-16 (昭51-01).
- (6) 佐田晴夫, 池田貞弘, 江尻正員: "回転型パターンマッチングによる形状選別の試み", *計測自動制御学会論文集*, **10**, **3**, pp. 284-289 (昭49-06).
- (7) Messe, M., et al.: "An automatic position recognition technique for LSI assembly", *Proc. 5th Int. Joint Conf. Artificial Intell.*, pp. 685-693, Cambridge (1977).
- (8) Uno, T., et al.: "An Industrial eye that recognizes hole positions in a water pump testing process", *Computer Vision and Sensor-based Robot*, ed. G. G. Dodd and L. Rossol, pp. 101-116, Prentice-Hall (1979).
- (9) Uno, T., Ejiri, M. and Tokunaga, T.: "A method of real-time recognition of moving objects and its application", *Pattern Recognition*, **8**, pp. 201-208 (1976).
- (10) 鳥野 武, 江尻正員, 徳永 赴: "移動物体の実時間視覚認識方式とその応用", *電学論*, **94-C**, **3**, pp. 49-55 (昭51-03).
- (11) 高野英彦: "形状固有値を用いた凸平面図形の一識別方法", *計測自動制御学会論文集*, **16**, **2**, pp. 222 (昭55).
- (12) Agin, G. J.: "An experimental vision system for industrial application", *5th Int. Symp. Industrial Robots*, p. 135 (1975).
- (13) 野村良忠, ほか: "三菱パターン計測選別システム (MELSORT) の開発製品化とその応用", *三菱電機技報*, **53**, **12** (昭54).
- (14) 前田 暉, ほか: "パターン計測", *テレビ学技報*, **JTA 42-2** (昭55).
- (15) 岡本啓一, ほか: "円形部品の高速自動外観検査法の開発", *計測自動制御学会学術講演会*, 3606 (昭50).
- (16) 芳賀敬二, ほか: "旋削チェッカ", *富士時報*, **52**, **5** (昭54).
- (17) 高野悠敬, 安藤司文, ほか: "アーク溶接用ロボット, ミスターアロス", *日立評論*, **57**, **10**, pp. 17-22 (昭50-10).
- (18) 井上博允: "人工の手の計算機制御", *機学誌*, **73**, **618**, pp. 946-954 (昭45-07).
- (19) 黒野 繁: "一対の人工の手の協調制御", *バイオメカニズム*, **3** (昭50).
- (20) 高瀬國克: "マニピュレータの運動成分の一般的分解とその制御", *計測自動制御学会論文集*, **12**, **3**, pp. 300-306 (昭51-06).
- (21) 岩本太郎, 安藤司文: "原子力配管用溶接ロボットの開発", *ロボット*, **25**, pp. 54 (昭54).
- (22) Okada, T.: "A short-range finding sensor for manipulators", *Bull. of Electrotech. Lab.*, **43**, **6**, pp. 492 (1978).
- (23) 増田良介, ほか: "位相情報に注目した光学式近接センサ", *計測自動制御学会論文集*, **17**, **3**, pp. 945-950 (昭56-12).
- (24) Goto, T., Inoyama, T. and Takeyasu, K.: "Precise insert operation by tactile controlled robot, HI-T-HAND Expert 2", *Proc. 4th Int. Symp. Industrial Robots*, pp. 209-218, Tokyo (Nov. 1974).
- (25) Takeyasu, K., Goto, T. and Inoyama, T.: "Precision insertion control robot and its application", *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **98**, **4**, pp. 1313-1318 (Nov. 1976).

- (29) Drake, S.H., et al.: "High speed robot assembly of precision parts using compliance instead of sensory feedback", Proc 7th Int. Symp. Industrial Robots, Tokyo (1977).
- (27) Nevins, J.L., et al.: "Assembly research", *Automatica*, **16**, 6 (1980).
- (28) Kasai, M., et al.: "Trainable assembly system with an active sensory table possessing six axes", Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 394-404, Tokyo (Oct. 1981).
- (29) Ejiri, M., et al.: "An intelligent robot with cognition and decision-making ability", Proc. 2nd Int. Joint Conf. Artificial Intell. pp. 350-358, London (1971).
- (30) Ejiri, M., et al.: "A prototype intelligent robot that assembles objects from plan drawings", *IEEE Trans. Comput.*, **C-21**, 2, pp. 161-170 (1972).
- (31) McCarthy, J., Earnest, L.D., Reddy, D.R. and Vicens, P.J.: "A computer with hands, eyes, and ears", Proc. Fall Joint Comput. Conf., AFIPS Conf. Proc., **33**, pp. 329-338, Washington D.C. (Dec. 1968).
- (32) "ETL-ロボット, Mk. 1 特集号", *電総研集報*, **35**, 3 (昭46).
- (33) Guzman, A.: "Decomposition of a visual scene into three-dimensional bodies", Proc. Fall Joint Comput. Conf., AFIPS Conf. Proc., **33**, pp. 291-304, Washington D.C. (Dec. 1968).
- (34) Waltz, D.: "Understanding line drawings of scenes with shadows", *The Psychology of Computer Vision*, ed. P.H. Winston, McGraw-Hill (1975).
- (35) Shirai, Y.: "Analyzing intensity arrays using knowledge about scenes", *The Psychology of Computer Vision*, ed. P.H. Winston, McGraw-Hill (1975).
- (36) 谷内田正彦, 辻 三部: "機情部品の学習・認識システム", *信学論 (D)*, **J 59-D**, 3, pp. 149-156 (昭51-03).
- (37) Yoda, H., et al.: "Direction coding method and its application to scene analysis", Proc. 4th Int. Joint Conf. Artificial Intell., pp. 620-627, Tbilisi (Sept. 1975).
- (38) 鳥野 武, ほか: "物体認識システム", 大型プロジェクト, パターン情報処理研究開発成果発表論文集, 日本産業技術振興協会, pp. 127-135 (昭55).
- (39) 大島正毅: "3次元情報を用いる物体認識の研究", *電子技術総合研究所研究報告*, 第 826 号 (昭57-07).
- (40) Holland, S.W., et al.: "CONSIGHT-1: A vision-controlled robot system for transferring parts from belt conveyors", *Computer Vision and Sensor-based Robots*, ed. G.G. Dodd and L. Rossol, pp. 81-100, Plenum (1979).
- (41) 中川泰夫, ほか: "光切線法によるプリント板はんだ部の自動外観検査", 第19回計測自動制御学会学術講演会, 1964, pp. 163-164 (昭55).
- (42) 安江利一, 白井良明: "物体認識のための両眼立体視", *電総研集報*, **37**, 1101 (昭48).
- (43) Feldman, J., et al.: "The use of vision and manipulation to solve the instant insanity puzzle", Proc. 2nd Int. Joint Conf. Artificial Intell., London (1971).
- (44) Kashioka, S., et al.: "An approach to the integrated intelligent robot with multiple sensory feedback; Visual recognition techniques", Proc. 7th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 531-533, Tokyo (1977).
- (45) Takeyasu, K., et al.: "An approach to the integrated intelligent robot with multiple sensory feedback; Construction and control function", *ibid.*, pp. 523-530.
- (46) 米倉清治, ほか: "光学誘導形地上搬送ロボット, ホイパーサの開発", *日立評論*, **57**, 10, pp. 23-28 (昭50-10).
- (47) 高野英彦: "自己経路決定法による自動搬送", *バイオメカニズム*, **6**, pp. 232 (昭57).
- (48) Nilsson, N.J.: "A mobile automaton: An application of artificial intelligence techniques", Proc. 1st Int. Joint Conf. Artificial Intell. pp. 509-526 (May 1969).
- (49) Barns, S.: "The coming age of robots", *Mach. Des.*, **34**, 27, pp. 150-156 (1964).
- (50) Sutro, L., et al.: "Development of visual, contact and decision subsystems for a mars rover", R-565, MIT Instr. Lab. (July 1967).
- (51) 野崎武敏: "自動車の自動操縦のためのコースずれ検出の一方式", 計測自動制御学会論文集, **12**, 1, pp. 29 (昭51).
- (52) 東野純一, 加藤寛次: "距離センサを用いた自律型移動ロボットの障害物回避制御", 第21回計測自動制御学会学術講演会, pp. 517 (昭57).

第6章 人机接口技术

随着机器人应用领域的扩大，人和机器人之间的配合越来越重要。这被称作人机接口，它是机器人工程中重要的支柱之一，也是现在最落后的领域。特别是给机器人的指令和示教方式，人和机器人分担的作用的协调工作，与人们的对话（通信）功能，机器人的智能化及对人们的安全性等都是今后应推进研究的人机接口的重要课题。机器人从人们的语言中准确、适当地理解出简洁的命令，独立地制定被给定工作的执行规划，在各种各样环境中进行工作，报告工作状况，以最大限度地发挥人和机器人的能力为目的地完成工作，这些就是人·机系统应有的理想姿态吧。这时，机器人识别人们的声音，理解日语、英语、汉语等自然语言的意义，具有与人类自由交换信息的功能等都是必要的。还有，要机器人近乎为人，给机器人予知识的获取和它的利用方法、推理功能与问题解决功能那样的人类智能是必不可少的。

6.1 给机器人的指令方式

机器人按照人们给予的工作命令行动。给机器人的指令方式，依据机器人的工作执行能力与智能水平而异。给单能机器人的指令以简单的为好，人们有必要进行充分的示教。机器人具有视觉、触觉和移动等高度功能，随着机器人适用领域的扩大，机器人的动作变得复杂，因此给机器人的指令和示教方式要求人们负担少、操作性好的人机技术。给机器

表 6.1 给机器人的指令及示教方式

	指令方式	示教方式	人 们	机 器 人	工 具	工 作
1			工作的直接示教	记录数据的再现	示教盒等	点焊、粉刷等工作
2	用机器人语言的指令方式	用点、激光点、面的工作环境示教	程序的示教工作环境的示教	按程序顺序执行工作和视觉联系	模拟器和传感器的通信脱线程序方式	组装工作及其他
3	用图表（CAD数据）的指令及示教方式		用组装完成图的微命令	知识的利用、解决问题的功能与视力的协调	CAD数据库、图表、手控系统	组装工作及其他
4	用遥控操作技术的指令方式	用主要手臂的直接示教，复用显示器及声音示教	靠微指令示教，作大概状况判断的电传操作器	自主型的行动、工作困难时指望操作器的指示	语言介入型多重从属系统、软件开发工具、复用显示器声音输入输出器、数据库等	在宇宙、海洋、原子能设备中的遥控操作器作业

人的指令方式被分成(1)示教放演方式;(2)用机器人语言的指令方式;(3)用图形数据的指令方式;(4)用遥控操作技术的指令方式等四种。表6.1列出了在各指令方式中的示教方式、人与机器人的作用、连系人与机器人的接口工具及工作对象。

6.1.1 放演方式和机器人语言的指令方式

示教放演方式是人直接抓住机器人的手,用示教箱进行工作顺序的示教,记录下手的位置和姿势及手指的开闭数据等,基于此再现同一动作的工作方式。这种工作方式适合于简单重复的工作,被用于搬运重物、点焊及粉刷工作等的工业机器人上⁽¹⁾。但是,一旦工作顺序的一部分要变更,这种方式的示教法一定要从最初开始再示教所有的动作,有因操作失误或示教失误发生异常事态的危险。另外,机器人的台数一增加,示教所需要的时间和劳力就太大,对人是负担大的工作。尤其是不能适用于随环境变化的工作和复杂组装工作。为解决这些问题,有使用作成计算机程序的同样方法,进行机器人执行工作的定义,用对人容易明白地描述的机器人语言的指令方式。机器人语言能明确表述动作顺序和工作环境,视觉、触觉和移动等功能的协调及工作同步。用这种方式靠变更程序能在少量多品种生产系统中进行各种组装工作。最近的工业机器人,用机器人语言描述机器人的动作顺序和外部机器的协调等,采用人实际动作机器人直接示教位置和姿势数据的方式。另外,为事先纠正人们的错误,提出了用机器人语言的脱线程序方式。用CAD数据库对机器人及工作环境在三维图形上作模拟,脱线动作机器人,检查机器人的动作,同时进行工作程序的修改和编集。作成可能执行的程序。此后,在线实行机器人工作。这种方法,机器人的无意义动作极少,检查验证与物体冲突的回避,能防止机器人本身及对对象物的损伤,能更有效的程序化。但是,机器人语言越是高级,机器人工作环境的描述部分比动作描述越多,环境的示教法就成问题。

6.1.2 图形数据的指令方式

对于机器人语言指令方式的语言方法有使用CAD/CAM数据等图形的图形方法的指令方式。这是为了机器人理解称作输入组装完成图的宏指令、实现那些目的,机器人自己考虑包含解决问题等推理在内的组装次序的人工智能指令方式。日本日立中央研究所的江尻等人开发了用这种图形指令方式的智能机器人原型⁽²⁾。图6.1给出了用这种方式的机器人的构成。这个系统具有靠图形理解宏指令、三维物体识别和物体操作需要的问题解决的三个功能。关于这种机器人在前一节已详细叙述过了。如果人们变更图形,机器人自己会看图理解、进行新的工作。今后,机器人依靠与CAD/CAM技术的结合,这种指令方式作为将来通用生产系统(FMS)的基本技术会变得重要起来的。

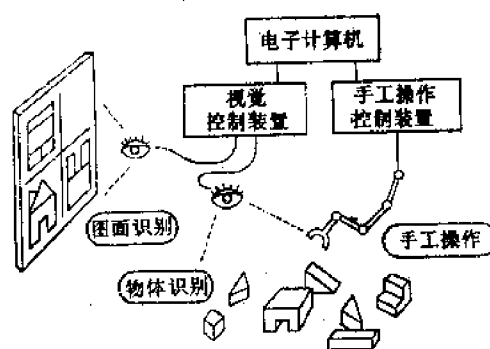


图 6-1 看图组装的智能机器人系统构成

6.1.3 遥控技术的指令方式

在近年大为增加的宇宙、海洋、核反应堆等即危险而人们又难于接近的工作环境

中,机器人进行机械装置的组装、拆卸、修理等工作的场合,假如没有具有高度知识和经验的操作器的状况判断和合适指令,进行那些工作是困难的。在这种极端条件下工作的人机系统中,在最大限度地利用机器人环境适应能力的同时,共同协作有效实施基于从远离的安全地带对操作器的大概判断和操作、人和机器各自单独不能完成的工作,这种遥控技术的指令方式被提出来了。用这种方式,机器人遵从从操作器来的大概指令,基于预先储存好的有关对象的知识 and 由视觉、触觉对周围环境的认识,自行进行工作。但是,碰到工作困难的情况或不能解决的局面时,机器人要仰仗操作器的指示,根据这些指令转到下一步行动执行达到目的的工作。

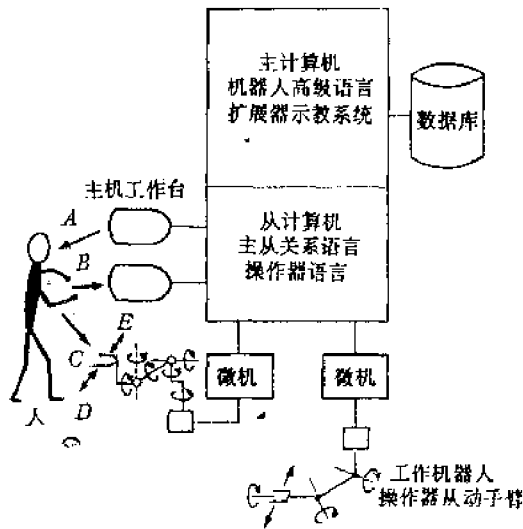


图 6.2 语言介入型遥控系统

A—图像, B—符号, C—操作, D—示教操作台, E—终端指令器。

日本电子技术综合研究所的佐藤和平井,提出了结合用机器人语言和人直接操作的主从方式的语言介入型遥控系统⁽³⁾。该系统的构成如图6.2所示。该系统有三种工作模式:①由人操作直接进行工作的主从模式;②按预先决定的次序进行例行工作的程序控制自主模式;③两者结合起来进行工作示教和遥控的语言介入模式。这里说明语言介入型遥控的几个特征。作为语言介入型遥控的优点是有软件模具功能。例如,让机器人运送装有液体的容器时,为不溅出,操作器要求手指一致保持水平。在主从工作中,这种约束性动作大多存在,这对操作器是不小的负担,而且它的好坏深深影响工作结果或工作效率。这个系统有把这种约束性动作用计算机

软件实现、重叠到主从动作上的功能,这就叫作软件模具。软件模具有(1)规定位置和姿势的模具;(2)规定轨道和方向的模具;(3)规定面的模具;(4)规定区域的模具;(5)组装它们的模具;(6)根据外部条件改变特性的模具等。软件模具的特点是各种制作容易实现,能即时进行制作和拆除,还能实现实物模具所不能的事。由此能实现人们负担少的遥控。

下面,叙述本系统的语言主导型工作示教法。一旦用语言给出机器人工作次序的大概,遵从在这个宏展开程序中读取的下面应进行的动作信息和位置、力、速度数据,操作器一边与机器人对话,一边移动主管手臂进行工作,并能学习和记忆这种工作,这是这种方法的特点。它的程式如图6.3所示,①作成操作器用宏命令描述的工作次序的程序。②由宏扩展器展开动作级的工作次序。③示教系统解释这个展开结果并把所定事项指示操作器。④操作器照此操作主管手臂进行工作、示教。使用这种方法,由于操作器能确认工作次序后进行工作和示教,有操作差错少的优点。还因为给机器人的示教结果保留在机器人数据库,所以能很容易地实现工作的重复动作、逆顺序动作及综合各种工作的复合工作的生成和执行。在语言介入型操作系统中,把这种新概念引进遥控操作工作中,人们能实现操作性好的指令方式。

日本机械技术研究所提出的人和数台自主型移动机器人组成的遥控工作系统中,机器

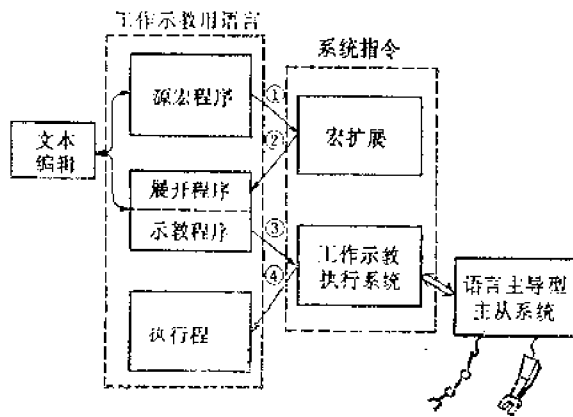


图 6.3 语言主导型工作示教法



图 6.4 机器人用的工作站

人在工作困难场合，有好像操作器就在机器人中操作那样的高度现场感觉的视觉系统，有类似移动自己手臂的高操作性能的手臂等，构成了遥控现场处理方式⁽⁴⁾。另外，机器人感知人们得不到的传感信息（放射线、红外线、超声波等），并把这变换成操作器可以觉察的东西，显示出人们能力的扩张功能，这就有希望作成能迅速适应现场状况变化的人机系统。

作为遥控系统中人·机通信手段，不仅有从前只利用机器人位置、姿势信息的主从方式，还能利用输入输出的声音、立体图像、操作控制杆、按键面板、光笔等的各种信息。日本电子技术综合研究所的塚本开发了综合这些的机器人用的工作站系统⁽⁵⁾。机器人用的工作站是机器人系统的开发、操作、运用所应准备的必要工具，在开发阶段，在工作场所使用被开发的机器人系统工作时，起到操作台和监视台的作用。这如图6.4所示，配备有叫综合信息显示器的特殊显示器和为操作和示教的操作杆。在机器人系统的开发和操作中，多半想简明扼要地同时看到工作环境全体、数台机器人的工作状况、从程序来的信息等多种信息。在这种情况下，用一个画面来简明扼要表示出来的是综合信息显示器。不仅能表示从电视摄像机来的实际环境和工作状况，也能表示由图形给出的系统中的假想环境和假想工作状况。操作示教杆，也就是主管手臂，是系统的简洁操作和示教必要的装置。无论是实际环境还是假想环境，看着综合信息显示器、在进入那个环境世界的气氛中进行动作、工作示教、对象指示等，是它的特点。

要实现这种极端工作条件用的人·机系统，关于人机接口技术有众多应该解决的课题，随着今后研究的进展，定会影响各种各样的机器人系统。

6.2 机器人的工作环境示教系统

6.2.1 工作环境的理解

让机器人工作时，要机器人充分理解包含直接工作对象在内的工作环境为好。只有那样，人给出的工作命令就可简洁。工作环境信息中特别重要而又基本的是环境内的物体形态、大小、位置、姿势等几何学上的信息。所谓机器人理想环境，是在相当于它大脑的电子计算机内部，作出环境的几何模型，其重要性从以下的考察也就会理解。

(1) **机器人动作的模拟** 在机器人执行工作程序之前,充分检查是否正确地描述了工作是必要的。特别是多台机器人组成的生产线,由于其中一部分变更也要带来生产线的停止,必须短时间完成变更使生产线停止时间最少。但在实际的工作现场,只读取程序而不让试验动作,要检查对键控的三维空间中的动作的理解是困难的。用图形表示的工作动作模拟对程序检查极其有效,当然,这是以精度高的详细环境模型为前提的。

(2) **高水准语言的机器人工作程序** 例如,在工作程序中要执行如下的工作,有必要解决:“抓住水泵的轴;

插入A型泵的轴孔等问题”。例如,怎么样去抓握水泵轴的哪部分呢,怎样回避和其他物体的冲突而用手前部去接近呢,等等的决定,在决定算法的基础上,开发工作环境模型是必要的。

机器人能自动理解自己的工作环境是理想的,但实际上不可能。以识别三维物体为目的的、使用电子计算机的人工视觉,适用范围还有限制。本来,仅用视觉能理解的事是有限的。即使依靠三维位置信息的视觉,即使能理解面的位置、方向、大小等三维空间构造,还不能说能理解工作环境。

关于三维物体的形态模型化,在CAD/CAM领域开发有实用系统。即使在设计阶段能对各个零件作描述,但不可能管到在现实的工作环境中它们是被怎样放置的。

对生成工作环境模型,全用语言描述是不现实的。人进入工作环境测出必要的位置和尺寸。把它的结果作成描述的语句,再从键盘打入计算机,这样处理人的负担太大,结果出错的可能性也大。读取作出的描述语句,检验它也是困难的。

结果,用交互示教让机器人理解它的工作环境的方法是极其重要的。

6.2.2 工作环境的示教

对机器人作工作环境示教时,必须对现实存在的三维环境原样地正确模型化。人们看实际环境,容易地观测各个物体间的相对关系,相反,对它的位置、姿态等不能用数值更精确地观测,即使给出了描述环境的多种数值数据,把该内容在空间上正确理解把握住情况是极其困难的。另一方面,机器人实际上要大量的这些数值数据。因此,对示教方法怎么确保机器人和人的接口变得重要。

环境示教的处理可考虑作如下分类:

- ①实际三维环境内的位置数据测量和输入;
- ②从得到的数据构成环境模型;
- ③环境模型的表现。

对①,要求能对用于简单操作示教所必要的点位置作测量和输入,而且要使其精度高。②要求有对必要信息追加、修改容易并且利用方便的内部数据结构,要求有人们负担少的模型生成手续。对③,有内部生成的模型的可视化功能和对象与它的模型相对照的功能是重要的。以这些观点来大概考查环境示教系统的实例。

6.2.3 环境示教系统的实例

美国斯坦福大学开发了描述键控作业的机器人语言:AL。用AL,工作对象物体能用固定在它的代表点上的假想的直角坐标系(物架)来表现,具有位置和姿势的信息。即

使单一的工作对象物，要包含连接用的螺丝孔等机械要素，实际上要作为多个物架连接来描述。因此，作为整体的工作环境要以多个物架的空间分布来表现，以交互生成这种环境描述为目的而开发出来的是探针系统 (Pointy系统) (6)。

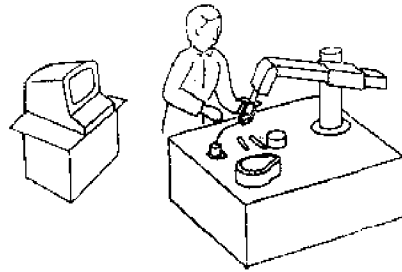


图 6.5 Pointy系统

在本系统中，从工作环境测量实际工作数据，要用操作器。让操作器的手指拿着探针，人用手引导操作器进行操作，使探针的尖端放置在想作测量输入的点，并输入该点位置。从手指到探针尖端的坐标变换，根据最初尖端放置的已知位置基准点来求解、校正，以后只要探针不变形就能求出各关节到探针尖端的位置，如图6.5所示。

操作员一边看显示器 (CRT) 分块显示的结果，一边作编辑，以得到的三维位置数据为基础，生成以物架形式构造的环境描述。分块显示有表示构成生成物体模型的物架间的相互连接关系的部分，有表示在模型生成中必须指定的标量、矢量、旋转等变量名和它的值的部分，或有表示应该采纳的生成模型的文件名的部分。这些构成了分块显示，如图6.6所示。

用这种方法，不需要操作器以外的测量位置的特殊硬件，测量精度也与操作器的精度相对应，若能适当校正探针的变形，洞穴里面都能测定。另外，由于模型生成过程所必要的信息都表示在分块显示上，因此有以此作为要点进行编辑生成模型等特点。以此相反，它有人进入实际工作环境必须进行位置测定工作，靠数值和符号等边理解三维环境的描述边生成正确的模型困难等问题。进而不能使这个物架模型检出与障碍物的冲突和自动生成回避动作。

STATION (NILROT, NILVECT) -BASE (NILROT, (15.0, 12.0, .500)) -HANDLE (NILROT, (35.0, 32.0, .500)) *HANDLE-TOP((Y, 180.)* (Z, 90, 0), (2.10, .340, 5.05)) *HANDLE-REF(NILROT, (1.10, 2.30, .100)) +YARM(NILROT, NILVECT) +BARM((Y, 180.)* (Z, .002), (43.5, 56.8, 10.9)) *BGRASP((Y, 180.)* (Z, -180.), NILVECT)		BHAND 1.20 YHAND .000 OFFSET 3.00
数据构造表示		标量表示
ODECLAR. AL	NILROT(Z, .000) RT-AP(Y, 180.) (Z, -90, 0)	MOVE BARM
帧名表示	旋转变量表示	矢量表示
SAVED. TTY		NILVECT(.000, .000, .000) APPR(3.00, 000, .000)

图 6.6 分块显示例

日本电子技术综合研究所开发的环境示教系统 (7)，使用有三维位置测定功能的激光光源、实际环境和生成模型重叠表示的大型显示器，交互生成形态描述也包含的几何模

型，如图6.7所示。

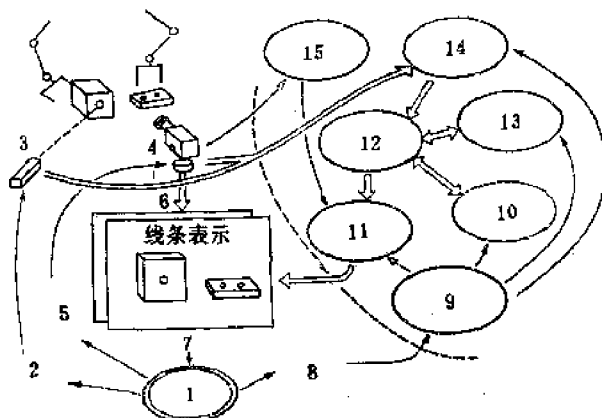


图 6.7 环境示教系统的构成

- 1—用户；2—光点操作；3—激光器；4—电视摄像机；5—摄像机控制；
6—摄取的图像；7—大型显示器；8—用户指令；9—指令翻译；10—模型生成；
11—图形生成；12—数据库；13—几何编辑；14—位置计算；15—视角计算。

激光点光源对准环境内任意想测量的点发激光束，用电视摄像机检出生成的亮点，用三角测量法进行位置测量。工作环境内的物体能以预先系统准备好的基本形态的组合来表现。操作员看监视器来观测对象，分割成用基本形态能表现的部分立体。接着，对各部分立体输入生成指令。遵从系统来的要求控制激光光点，如果输入了对象物上的特征点位置，就能生成部分立体模型。重复这些操作，生成完必要的部分立体之后，把它们组合起来完成整个模型。大型显示器在监视实际工作环境的画面上能重叠表示内部生成的模型线条图形。电视摄像机的方向、聚焦、改变焦距状态进行计算的基础上作出模型、假如对象物能正确地模型化，线条图形和实物就正确重叠。因此，尽管这个显示器对内部模型不可视，因为有和对象物对应的附加功能，容易发现模型的差错和不足，有利于编辑组合生成正确的模型。

用本系统，操作人员不进入工作环境、能生成工作对象物的几何形态模型。这种形态模型，不仅在机器人执行工作中的利用价值大，而且对示教过程的人机对话也有效。因为不是用数值或符号、而是靠线条图形能验证模型。另一方面，用激光有对物体阴影等不能作位置测定的地方。要用近傍的其他测量点、生成好了的模型数据给出估值。用大型显示器边看差异、边作编辑修正的方法也试过，有精度问题存在。

前面叙述过的环境示教系统的实例，不能说示教指令和操作水准十分高，人们花的劳动不少。这些劳动如果不进一步降低，会成为机器人利用上的障碍。可以想象，用CAD/CAM系统在设计时获得数据、视觉功能的导入等等在今后起重要的作用。

6.3 语音识别技术

因为语音是作为人类最基本的通信手段被使用的，所以，利用语音向机器人发指令，或从机器人那儿得到语音回答，会成为自然而又有力的手段。技术上称语音识别合成技术

在机器人工程上的应用。在这节只讨论语音输入即语音识别技术。现在的语音识别的技术水平还只能实现性能相当有限的系统。在实际应用上，依据各自领域不同要求也不同。这里以语音识别技术为基础选择有效的方法作介绍。

6.3.1 语音识别的预备知识

人们的声音，有担负传递信息的以语言声音为主的不同语句的音韵信息，有声调和抑扬的调韵信息，还包含有说话人特有的个性信息。但是，作为物理实体的声音，因为是包含有乱七八糟的噪音的声音声压波形为一维时序的信号，分离并取出这些信息不容易。语音识别技术的基础，是把音韵信息和调韵信息作为物理的音响参数抽出来，用唯一性的模式识别技术识别未知的输入语音。

作为描述音韵信息的单位，最基本的东西不是音素而是音韵。音素是作为某种语言声音的不同语句用有限个记号，能表示必要且充分的定义，所以作为描述的单位，在时间上属于最小区分（见表6.2）。因此，1到几个音素结合起来、像日语中五十音图概括的、能单独发声的单位是音节。在语音识别中，把原来在时间上连续的物理量变换成这种描述单位的序列是必要的。

表 6.2 东京山手地区方言的音素体系

辅音音素	
喉音	/h, ' /
鼻音	/m, n, η /
滑音	/r /
爆破音	/p, t, k; b, d, g /
摩擦音	/c, s, z /
半元音音素	/j, w /
元音音素	/i, e, a, o, u /
颤音音素	/N/, /Q /

语音的生成，作为模型，能认为是由于肺吐气造成声带振动作为声源在声道（口腔和鼻腔）产生共鸣引起的⁽⁹⁾。因此，由于声道的形状随喉、舌、唇等的动作而动态变化，产生成各种各样的音韵序列。振动声带的音韵叫有声音，在声音是音源处在口腔的狭窄位置。依据音源音源的特性也有不同，作为第一近似，认为声道的共鸣特性支配了音韵的音响固有特性。另外，听觉系统有对这些编码那样的频率分析功能，这两方面意味着频率分析是语音分析的基础。

考虑语音识别系统的基本构成如图6.8所示。最初，抽出载有音韵信息的特征参

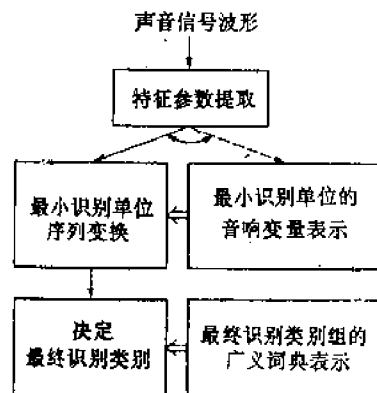


图 6.8 语音识别系统的基本构成

数，下一阶段是基于这些音响参数进行第一级的描述单位变换。作为它们的单位是采用音素、音节或单词。这个输出序列因为是中间阶段性结果，能用有冗余度的点阵表示。到此为止是基于音响变量为主的处理，在此上面的阶段，是基于自然语音处理为中心的处理。

语音识别系统从识别对象面来分类，如表6.3所示。表中每一项都是按(a)、(b)、(c)的顺序增加难度的。特别是(c)的一般实现有极其复杂的模样，可靠性高的东西现在还没出现。第一个困难因素是难在在音响级别上分离说话者的变动和文法的变动，定出音韵的固有特性。第二是在符号级别上语言声音具有的复杂式样。因此，构成实际系统时，最初必须明确规定对象和性能。

表 6.3 按识别对象的语音识别系统

说话者	语句数目	发声方式
(a) 特定说话者 (已登记的说话人)	(a) 小规模 (几十句以下)	(a) 孤立发声单词
(b) 部分学习适应形式	(b) 中规模 (几百句以下)	(b) 连续发声单词
(c) 不特定说话者 (独立的说话人)	(c) 大规模	(c) 连续发声 (文章、会话等)

6.3.2 语音分析和特征提取

(1) 概述 对语音特征的提取，看立足于生成过程还是立足于听取过程。前者以声源特性、声道特性和唇的张开特性三者之积为基础把声波特性模型化。后者基于听觉系统的频率分析功能，以声波的功率谱为出发点进行的。但是，从自动识别系统中特征提取的观点统一起来看，讨论功率谱的表现形式的不同。从最近的研究结果看，有可能作为优良参数的是①谱包络的频率成分(如滤波器群的输出)；②它的正交展开系数；③模拟声道形式；④共振的相关量等。①、②的稳定性好，但对说话人或文法的变动的直观性差。③遗留有适用于元音的问题。④是①、②的缺点的补充，但有稳定提取的问题。图6.9所示为声波的付氏功率谱、它的包络、共振、及和包络几乎等价的声道断面形。除这些外的参

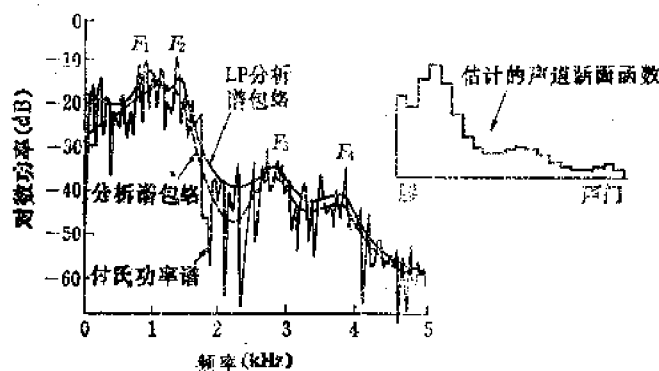


图 6.9 语音参数分析

数, 特定因素(例如, 无声与有声)的判别是有效的, 但主要的是上述的参数。在参数估值上, 有预处理的方法也不能忽视的效果。

(2) 功率谱包络的估值 作为谱包络的估值法, 有①通过带通滤波器群的方法; ②利用主导项的方法, ③线性预测分析方法等。

①的滤波器群的方法是决定各滤波器特性和滤波路数、计算它的输出功率的最直接的方法。通常, 中心频率间隔、带宽取对数尺度, 50Hz~7kHz作为分析对象⁽¹⁰⁾。

②的主导项方法⁽¹¹⁾, 使用高速付氏变换(FFT), 用图6.10所示的算法, 主导项的低阶项, 表示原来的谱包络成分, 所以各系数本身是参数。

③的LP分析⁽¹²⁾, 把时间序列假定成自回归模型的方法具有实用上的有用性。信号时

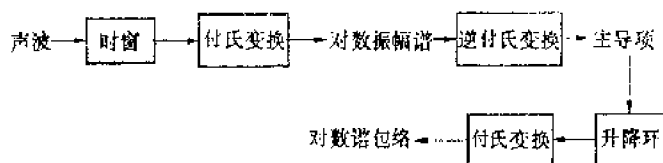


图 6.10 用主导项求谱包络的过程

间序列为 x_t 时, 这模型为

$$x_t = - \sum_{n=1}^N \alpha_n x_{t-n} + G u_t \quad (6.1)$$

这里, α_n 是能决定的参数(预测系数), G 是增益常数。当 u_t 为输入、 x_t 为输出时, z 的传递函数 $H(z)$ 为

$$H(z) = G / \left(1 + \sum_{n=1}^N \alpha_n z^{-n} \right) \quad (6.2)$$

这时, 功率谱包络由 $z = e^{j\theta}$ ($\theta = 2\pi f \cdot \Delta T$) 得到。系数 α_n 的决定法从信号 x_t 和它的预测值的阶乘误差最小的评价函数导出。其解法有各种各样, 与语音分析相关的是大家知道的参数相关(PARCOR)分析法⁽¹³⁾, 如图6.11所示。从此图中的 k_n (偏自相关系数)能计算 α_n 。

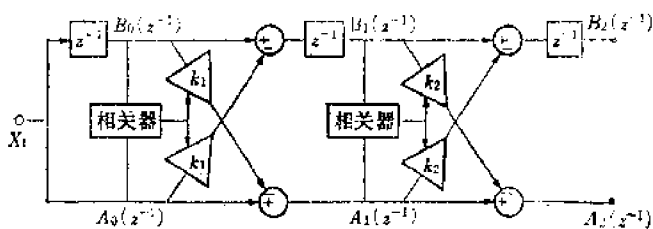


图 6.11 PARCOR的系数计算回路

(3) 声道断面的估值 把声道断面的形状看成一根音响管, 它用筒状的短节的连接来近似, 用这连接面的反射系数能求声道的 z 传递函数。适当的边界条件, 能证明反射系数和 $\{k_n\}$ 相等⁽¹⁴⁾。根据这个理论能对声道形状估值。在提取与物理形状的声道相近的东西中, 除去声源特性和张口的放射特性的处理是必要的⁽¹⁵⁾。

(4) 共振的提取 提取共振的方法提出了许多方案, 能应用到自动识别有可能的是

基于LP分析方法和基于瞬时谱的方法。用LP方式，能从式(6.2)的极点求共振⁽¹²⁾。但是，阶数 N 同时估值，从极点中选择与共振相当的东西是必要的。利用瞬时谱时，考虑了稳定性和精度的时空处理是必要的⁽¹⁶⁾。对共振的提取，不仅是它的位置，强度和宽度的信息也能参数化是识别系统所希望的。

6.3.3 语音单词的识别

(1) 概述 单词识别是区别出每个单词发声的孤立单词识别和容许几个单词以上连续发声的连续单词识别。单词识别系统从方式上、识别方法上、识别的基本单位(最小识别单位)上能按表6.4那样分类。有必要考虑到说话者的分散、针对某些不特定的说话者的系统，识别函数的方法是有利的。相对的模式匹配方式，是针对特定说话者的，即是简单的方式也是利用动态规划法为最佳方法。

表 6.4 按方法对单词识别系统的分类

最小识别单位	识别方法
(a) 单 词	(a) 模式匹配
(b) 音 素	(b) 识别函数方法

以音素(或音节)为基本单位的方式的优点之一，是如果对称作音素的比较少量的类别决定出它的标准模式，那对识别对象的单词组合的交换只用符号处理就行了。另外，对处理大容量词语的系统，单词单位的登录必然成为困难。因此，对不特定说话者和大词汇等高性能系统，恐怕音素作为基本单位的方式有利。另一方面，用单词作为单位的方式，能避免音素作为单位时区分音素的麻烦问题，有随文法音韵特性变动也能照样处理的优点。

(2) 识别音素为基础的方式 这方式的基本点正如图6.8所示的方框图。用准备好的音素的标准模式部分，基于音响参数的特性细分类别是必要的。通常把音素一概用一段来分类是困难的。例如，也要考虑设定无声破裂音、有声破裂音、鼻音等类别。这些类别领域的设定，各类别的方差尽可能相当好地近似是必要的，用单纯的线性方法作区分的线性处理、或利用群的方式是有效的。作为这种处理的输出，有各类别的相似度、网络表示等。在单词词典的作成部分，基于音响特性的变化和音韵规则，有必要准备罗列了从音素

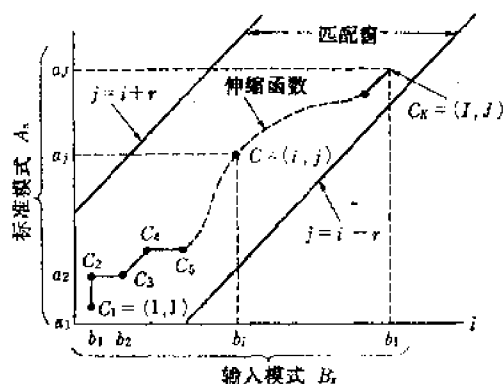


图 6.12 DP法的时间归一化的匹配原理

系列词典考虑得到的变化的词典。单词的同态，靠音素处理的输出序列与这词典条目的匹配来进行。也有考虑这种场合利用预先定义的音韵间相似度等的情况。

(3) 单词作为基本单位的方式 这种方式，处理对象全是单词，是把每个单词的标准模式以音响参数形式准备好的方式，说起来这是针对特定说话者的。其理由是，对特定说话者变动的主要因素只是时间轴上的伸缩，而对不确定的说话者，在此之上还要

加进在空间方向上的变动。因此，作为整个单词的模式而言，比之前者，后者的时空模式会极其复杂。特定说话者系统还能力求方式的简便，而对不确定说话者用的场合，标准模式的多模块化等变得必要了。

作为以单语为单位作识别的有力方法，有用数据处理（DP）的时间轴上非线性伸缩匹配法⁽¹⁷⁾。设标准模式的时间序列为 A_n （ n 为类别），未知的输入模式的时间序列为 B_s 时， A_n 和 B_s 的距离作为整体量，用DP法求出 B_s 对所有的 A_n 的距离最小偏差函数，（Warping Function），使这个距离最小的 n 为输入 B_s 的类别。这就是伸缩匹配法，如图6.12所示。这种方式中也有两端点处理法等几种方法。作为参数，把提取出的值原封不动使用的多，也有依据对提取出的参数值的矢量量化、用量化后的单位来代替标准模式和输入模式的方法⁽¹⁸⁾。用这种方法能显著减少计算量。

6.3.4 连续单词识别和连续语音识别

连续单词识别是容许单词与单词之间可以不暂停地发音、单词作为基本单位的识别。对此有效的方法有2级DP法⁽¹⁹⁾、连续DP法⁽²⁰⁾等。

连续语音识别，从作为上述连续单词延长的给单词序列添加语法约束的东西，到以更一般的会话语音为对象的东西都有。后者在70年代作为“语音理解系统”研究被热门地进行过⁽²¹⁾。

6.4 自然语言系统

作为人们向机器人系统发指令、作询问的手段之一，若能用自然语言是非常有效的。但是，具备这种自然语言功能的机器人系统还未能实现。考虑今后机器人的发展时，建立包含有自然语言功能的人机接口大概是相当重要的课题吧。

自然语言处理技术，是具有广阔应用范围的技术领域，今天也在相当努力地进行研究。自然语言处理研究，在20年前作为机器翻译研究，在世界上曾热门一时。但在当时，计算机的能力比之现在是相当贫乏，没有达到能处理自然语言那种复杂度的水平⁽²²⁾。此后，计算机能力的飞跃进步，自然语言处理技术、自然语言的意义理解的研究也有了积累，机器翻译的研究今天又盛行起来了⁽²³⁾。日语文字处理的文字处理器等日语输入技术的进步也是明显的。自然语言系统技术作为知识信息处理技术的一翼，是能指望今后有发展的技术领域。

作为自然语言系统的用途，有如下考虑：

- ①自然语言接口 向机器人、教育学习系统及各种数据库发指令、提问、回答时的接口；
- ②机器翻译；
- ③语言数据的处理；
- ④语言教学。

本节概述作为自然语言系统核心技术的句法分析技术。

6.4.1 句法分析

自然语言不仅是单词还是它的语形变化的一维排列，而且语形变化方法和语句排列有

语义上和格式上的制约。掌握这种制约来分析输入语文的构造是句法分析程序。因此就有这些制约即语法规则怎样表现、怎样利用的问题。

语法规则的掌握方法有各种考虑，主要的考虑方法有下述的①造句语法和②依存语法^{(2.6)~(2.7)}。

(1) 造句语法 (phrase structure grammar) 句子由几个构成成分组成，各成分又由一个或几个构成单位组成，最终可分成单词，造句语法就是根据这些结构实现构成成分直接分析 (immediate constituent analysis) 的方法。根据这种想法，能以构成成分生成句子的生成规则的集合来表现语法。所谓生成规则是公理，由此引出的定理是正确语句的依据。图6.13所出为简单造句语法例，图6.14所出为用该语法的造句分析树的一个例子。

S	→ NP · VP
NP	→ (DET ·) (ADJ ·) * N (· PP) *
VP	→ V (· NP)
PP	→ PREP · NP
DET	→ a an the
ADJ	→ little big
N	→ John Mary boy egg
PREP	→ of in for on
V	→ is have love work

图 6.13 简单造句语法

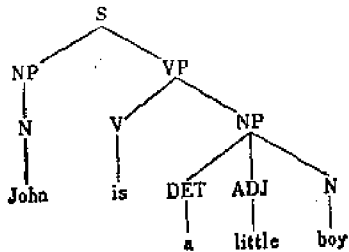


图 5.14 用造句法的分析树

造句规则，一般称作改写规则，定义为符号并列的集合。关于改写规则和由它决定的符号并列的集合，以及某种符号并列是否属于集合的判断等性质，以数学方式被很好地研究过^(2.4)。改写规则全是以下的形式化语言：

$$X \rightarrow a$$

$$X \rightarrow YZ$$

- { a 是最终符号 (单词)
- { X、Y、Z 是非最终符号 (语法类别)

这种形式化语言，被称作文理自由语言 (context free language)，存在有几种确定的造句分析方法。形式语言的计算机语言基本上就属于文理自由语言范围。

自然语言与计算机语言相比建立在相当复杂的制约上，它的语法规则全作为造句规则描述是不可能的。在语言学的领域中，乔姆斯基把语言区分成语言的语义 (语言能力) 和语态 (语言运用)，语义机构在语法框框内，乔姆斯基可展开成根据造句法生成的深层结构和它的树构造变形得到的表层结构的二级构造理论 (变形语法理论)。

变形语法理论是从生成句子观点出发的语言理论，不是能原封不动地作为语句分析算法使用的东西。以造句法作基本框框的语句分析方法有增广变换系统 (ATN)、语句调整语言 (LINGOL) 和其他各种方法被提出来了。哪一种也是把文理自由语言的造句分析方法作强行扩张成为造句规则，其不能处理的语法规则附加处理手段。

ATN是分析文理自由语言的递归变换系统 (RTN) 的强行扩张。图6.13的语法规则用RTN的图式书写成为图6.15那样。PUSH一调出别的转移图，POP就从那儿返回，另外，JUMP意味着无条件的转移，根据输入语句的语法类别顺次在转移网络上进行状态转

移。语句读完时若S的状态转移图给出“成功”，语句作为正确的东西就被识别了。在状态转移的时候，ATN不仅单单能检知语句的语法类别，也能检知这样那样的条件（性、数一致，时态等），另外设制几个具有堆积功能的寄存器，能设定出语法上的各种各样的变量作参照用。

LINGOL是以一般所知道的把文理自由语法作为高速造句分析算法的阿莱

(Early)算法为基础的东西。这种算法，把改写规则从左往右逐次展开，预测有可能的语法类别，使用与输入句相对照适合的与它的预测相符合的改写规则生成可能的造句部分分析树。LINGOL还增补了

$\alpha \rightarrow \beta$ (cog·sem)

的改写规则。对cog·sem部分能写成任意程度。cog是控制从可能的几个造句分析树中取出最妥当的一个的分析过程。sem是在造句分析树给出后在节点作整体含义匹配，提取意义信息的。进一步，它设定advice部分来描述改写规则的可能适用条件，再直接地控制分析过程。

(2) 依存语法 造句语法本质上是按符号并接顺序规则作描述的方法，对英语那样语句顺序决定了基本语法关系的语言描述是很自然的方式。

但日语语句在顺序上有制约：

①在语句中，连接自立词的功能词（助词、助动词等）的接续关系是被严格决定了的。

②短句间的并接顺序是相关短句在承受短句的前面。

受这两种制约，基本的语法关系不仅由语句的并接顺序还由功能词的作用决定组成。并不是说短句的并接顺序只要满足制约②就怎么任意都行，但它比起语法关系来对意思的语气、语句的式样问题有制约。

依存语法是描述语句与语句间支配、依存关系的，比之造句语法更具有意义主导的含义。日语语句的分析系统比之考虑用造句语法来，用依存语法的考虑、特别是格式语法的考虑较多。

格式语法是对个个陈述语词，描述关于支配陈述语词，即与陈述语词有关的语词含意的、使用的制约。例如说吃：“食べる”这个词，有以下两种格式因素：

作行为主体的，为（+動物）{が}

作行为对象的，为（+食べ物，-液体）{を}

这里的（+動物）、（+食べ物）、（-液体）等是纯意义性，表现了那些语句中应具有的意义制约。在主动态的情况，主体、对象各自都要受助词{が}、{を}的支配，被动态的场合各自要受{に}、{が}的支配。这种格式语法可以看成是表现语句深层结构的东西⁽²⁸⁾。

用格式语法分析句子，要把格式结构取出来进行必要的变形，检出在其中记载的有关

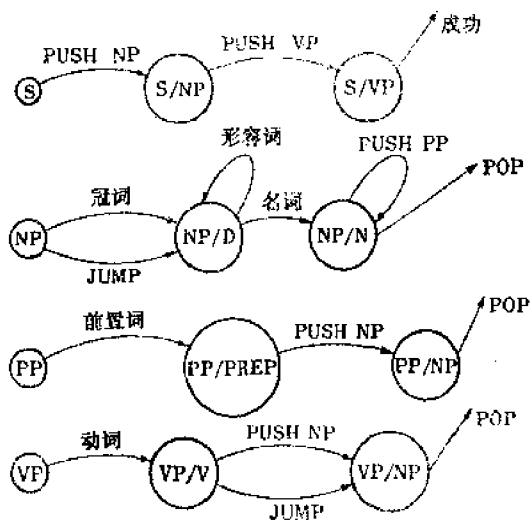


图 6.15 造句语法的ATN表示

使用的、含意的制约条件。得到的结果成为以相关词语为引导的陈述句式的东西。

格式语法的考虑方法作为语句间的依存结合规则，个个词语的用法作为依存结合规则记载在词典中进行分析，是语法规则主导型的句法。语义分析方法⁽³⁰⁾。

还有比格式语法更深层的、试图在概念上描述依存关系的概念依存方法也在被研究。用这种方法，能把所有陈述句的意义作为几个基本动作的组合来描述，详细描述各个陈述句的概念结构，在此基础上引出句子的概念依存结构。使用这种方法，具有同一含义的句子能变换成同一概念依存结构。

6.4.2 含义理解

语句是表现某些场合的某些状态（不限于物理的或具体的场合与状态）的，语言是指出某场合的某些对象的。与语言所指出的东西相对应，能重构场合与状态时，首先要能理解语句的含义。为对含义理解作模拟，必须要有对象世界的模型。前节叙述的造句分析，是含义理解前的问题。含义理解问题，现在处在对极其有限的小天地（例如积木化的范围）进行研究的阶段，是寄希望于今后研究发展的领域。

语句分析中，如果还没到含义理解的阶段作为不能解决的问题有补充省略语问题、代名词指示词指示的东西的同态问题等。在机器翻译的应用中，有不许同其他词语来省略的场合，也有必须特别指定指示词的人称、性、数等的场合。另外，向机器人发指令或者与专家系统对话时，必定不允许省略表示、指示表示。现在关于这些问题，有在被限定的状态中采用为同态需要的特殊算法。还有，针对在既定的语句中没有省略句，且在满足对指示句的制约的语句中最新出现的东西的探试方法被提出过⁽³⁰⁾。但这种方法一直没能得到正确的解。

人们在社会生活中会自然地学习词汇，掌握文法、语法。在自然语言系统中，有必要预先把语汇词典和各种规则作成数据库给出。如果系统的输出有不当，人们必须会发现和修改数据库中的差错。另外，若有没登记的词语，必须作为新的登记。这些工作不是容易的工作。如果系统具备有某种自动化程度地学习词汇和各种语法、订正差错的能力，这些工作就容易、系统的成长也就变快。正因为如此，对语言的学习能力是有用的研究课题，这也是关于什么级别上的含义理解问题的课题。

自然语言系统，无论是应用级别上还是使用范围上都是很广的。许多研究课题也是人们深感兴趣的⁽³¹⁾。

6.5 知识利用和问题解决

机器人能对人提出的知识性问题作出回答的是人工智能技术。“知识利用”是储存知识在必要时以必要的形式取出；“问题解决”是从给定的初始状态和操作手段作出指定的目标状态。这两者被认为是人工智能技术的基本能力。下面就各自的代表性方法作介绍。

6.5.1 知识库系统

知识库系统是把人类具有的知识装入计算机，而为某种目的能有效取出仅仅相关的某些东西的技术。有代表性的是基于规则的系统 and 基于帧格式的系统。

(1) 基于规则的系统 人类的基本思考过程可用以下模式来模型化:

问题的状况判断 → 对某状况作有效判断这个用

IF premise THEN action

的规则的形式来描述, 储存在数据库(也叫知识库、规则库)用于咨询顾问等中的是基于规则的系统。MYCIN⁽³²⁾、EMYCIN⁽³³⁾就是其代表, 它的机能结构如图6.16所示。

这种结构也在其他许多知识系统中被采用。系统设计师使用作成知识库的支持功能, 把问题分类中的判断知识(以规则形式给出)等作进知识库。与顾客、用户相应的是咨询顾问缓冲器基于给定的知识库执行。作为其他重要功能具备有咨询过程的说明功能, 作成知识库的控制功能。

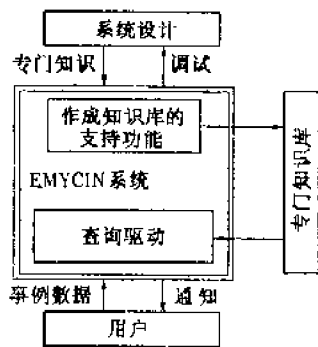


图 6.16 EMYCIN型的系统构成

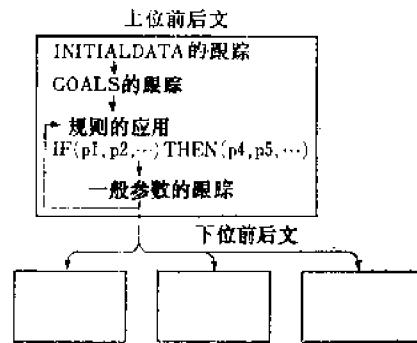


图 6.17 咨询的进行步骤

咨询顾问的执行是用后向链方式进行的。图6.17所示是后向链(backward chaining)模式的过程。规则分成把咨询流程结构化的前后文树的各个前后文。从这个树的最上面一个前后文的跟踪开始。这个跟踪又是从跟踪初始提问事项(INITIALDATA)指定的参数和跟踪结论(GOALS)指定的参数开始的。用各种各样的参数值向用户寻问, 引出能推证参数值的适用规则。适用规则起动的在它前部列出的参数跟踪, 造成一连串的规则起动的。

参数值的大概决定顺序如图6.18(a)所示。首先, 若参数是可提问型(ASKFIRST),

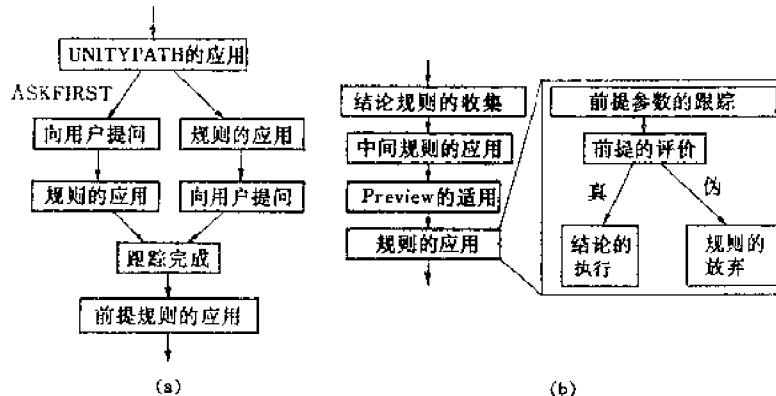


图 6.18 参数跟踪与规则适用顺序

(a) 参数值决定顺序; (b) 规则适用顺序。

就寻问用户。用户的回答不十分准确时就试用适用规则。另一方面, 对不可提问型也先试用适用规则。这也达不到十分准确时就寻问用户。适用规则按图6.18(b)的顺序进行。首先收集作结论的参数值的结论型规则。中间规则⁽³⁴⁾是动态决定规则适用顺序的。预备检查(pre-

view) 是用在该时刻仅知道的事实作前部的事前检查, 以避免无意义探索的。为评价被选出的规则前部也有进一步再返回起跟踪别的参数的。参数值的跟踪一完结就进行前提型的规则适用。这时, 前提型规则是仅在该时刻前部的所有参数已跟踪好再起跟踪。对未跟踪好的跟踪起不起来。

(2) 基于帧格式的系统 所谓帧是由M. Minsky提出的人类知识的框架结构⁽³⁶⁾。受这种提出的影响开发了FRL⁽³⁶⁾、KRL⁽³⁷⁾、UNIT⁽³⁸⁾等知识的表示系统。帧格式知识表示的基本框框如图6.19所示。在一个对象的知识帧(frame)中, 有与该对象的各种各样属性相对应的时隙(slot), 各时隙中收入有它的值、省略值、值被给定或被对应时起动的附加手序等。例如考虑图6.20所示的帧格式。时隙中有一称作“AKO”(A Kind of一种的略语)的特别时隙, 能规定对象间的阶层关系。这个阶层关系作成能从上一

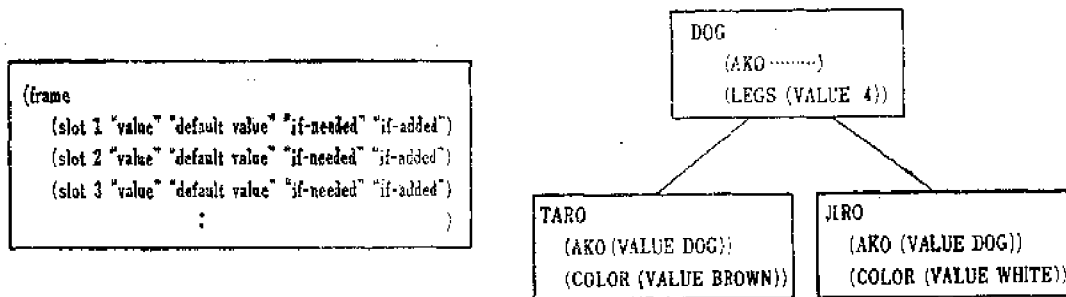


图 6.19 帧的基本构成

图 6.20 用帧格式的阶层知识描述

对象自动承继该类的共同属性那样的。例如, TARO作为DOG具体化的JIRO。

这样作成的全部帧被认为构成语义网络。例如, 对

(GETVAR 'TARO 'LEGS)

这样的提问, 从相继的机构能自动返回DOG帧规定的值“4”。或者, 对

(FINDFRAME 'AKO 'DOG 'COLOR 'BROWN)

这样的提问, 能由参数匹配返回到“TARO”。

在MYCIN型规则库系统中的前后文和参数也能作为帧格式描述。如图6.21所示的帧格式, 当“SPIN”的数据需要时, 靠用AKO给出的IF-NEEDED程序能进行自动提问, 它的数据得到了的时候, 再用IF-ADDED程序自动起启动前提型适用规则。

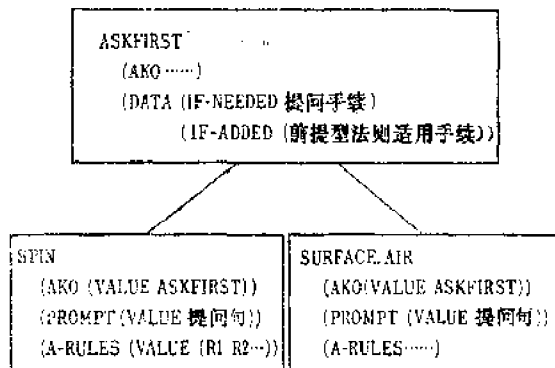


图 6.21 在规则库系统中的应用例

这种帧格式知识表示系统被认为是最近各种各样系统提案的目标指向型系统的源。

6.5.2 问题解决系统

问题解决系统是机器人要完成给定工作的规划系统中的一种。一般来说是研究解决疑难问题或作定理证明的问题解决方法。下面，就代表性的东西进行论述。

(1) GPS⁽³⁹⁾ 问题解决程序是把从给定的初始状态到指定目标状态所要作出的行动、操作选择和顺序的决定格式化。G. W. Ernst和A. Newell考虑把人类解决问题的行为格式化，作成了通用问题解决程序(GPS)的人工智能程序。简单说，该GPS顺序是从困难的目标开始，生成更容易的下一目标，为达到目标而重复进行的东西。

GPS中问题的具体格式给出如下：

- a: 初始状态；
- b: 目标状态；
- c: 作用因素（前提条件、适用差异、适用后状态所组成）；
- d: 状态间的差异；
- e: 作用因素和状态间的关系表。

GPS使用这些信息以图像图6.22那样的问题解决。

①首先，注意初始状态和目标的差异。

并且探求能从初始状态变换到目标状态的作用因素。出现两个以上的差异问题时，先把解除困难方面的差异作为对象。

②选择出来的作用因素，未知满足作用因素要适用的前提条件。GPS生成满足那些前提条件的下一目标。

③把上述生成的下一目标作为新的最终目标，把现在状态作为初始状态，再使用GPS。

④这样，下一目标已作成，再努力它的下一目标的作成。直到没有下一目标时终结（即最终目标达到）。

这种GPS的主要特征如下⁽⁴⁰⁾：

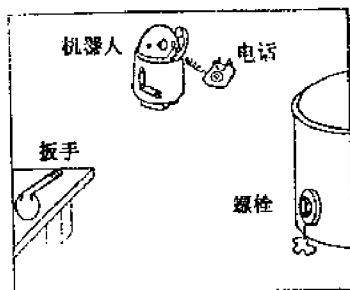


图 6.23 旋紧螺栓的问题

序，构成“再回归手序”。

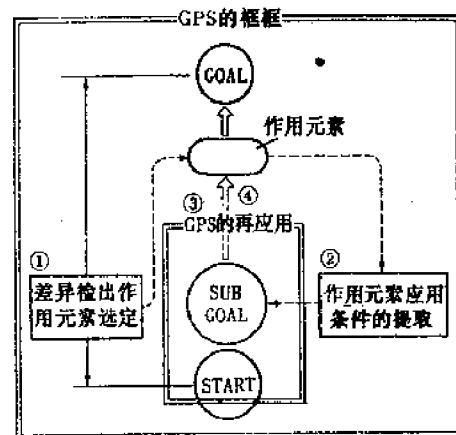


图 6.22 GPS的问题解决程序

①把问题解决用初始状态、目标状态、作用因素来数学公式化。这往往称作手段终结分析 (means-ends analysis)。

②利用状态间的差异控制作用因素的选择。这种方法叫作注意点的控制 (control of attention)。

③从困难目标生成更容易的下一目标，并把它作为新的目标再作和它本身同样的顺

以图6.23所示的旋紧螺栓的问题为例，说明典型的GPS的问题解决顺序。问题的数学公式化给出如下：

初始状态

机器人和螺栓在同一场所。

机器人的手中什么也没有。

最终状态

机器人旋紧螺栓。

作用因素

GO-TO

变量： x

可能适用条件：没有。

变化：机器人和 x 在同一场所。

GET-WRENCH

变量：没有。

可能适用条件：机器人和扳手在同一场所。

变化：机器人手中有扳手。

FASTEN

变量：没有。

可能适用条件：机器人手中有扳手，

机器人和螺栓在同一场所。

变化：机器人旋紧螺栓

差异

D_1 是关于机器人的场所的，

D_2 是关于机器人手中的状态的。

差异的顺序

D_2 比 D_1 更难。

这样，问题解决的手续就是：

①探求能生成与最终目标相同的作用因素，选择FASTEN。

②检查FASTEN适用要的前提条件，知道手中还没有扳手。于是，生成消除这个差异的下一目标。

③对此，GET-WRENCH的作用因素适合生成下一目标。

④检查GET-WRENCH要的前提条件，知道机器人没有在扳手的位置。于是，把消除这个位置差异作为目标。

⑤对此，GO-TO作用因素适合生成下一目标。

⑥GO-TO恰好能适用机器人到扳手的位置。

⑦对抓住扳手的上一目标再作研究，成功了。

这样，GPS成功地生成了机器人旋紧螺栓的规划。

(2) STRIPS⁽⁴⁾ STRIPS是SRI移动机器人需要的问题解决机构。问题的数学公式化与上述的GPS基本上相同，但它有用于状态描述和作用因素描述的描述句的描述简洁

性，有不要从描写句计算导出子目标生成的特别关系表等特征。

STRIPS的问题数学公式化的具体形式由

- a: 初始状态
- b: 目标状态
- c: 作用因素

组成。c的作用因素由如下三种描写句构成。

P语句：作用因素适用的前提条件。

D语句：用适合的作用因素能从状态描述中除去的描述。

A语句：用适合的作用因素能加进状态描述中的描述。

STRIPS的问题解决手续是如何工作的，再使用上述问题作典型说明。

(a) 问题的描述

基本描写句

AT (x)：机器人在x场所。

HOLD (x)：机器人把x拿在手中。

FAST (x)：切断x。

作用因素

GO (x)：从某一场所y去x。

P语句 \sim AT (x)

D语句 AT (y)

A语句 AT (x)

GET (x)：把x拿在手中。

P语句 AT (x)

D语句 没有

A语句 HOLD (x)

FASTEN (x) 切断x。

P语句 AT (x) \wedge HOLD (WRENCH)

D语句 没有

A语句 FAST (x)

初始状态 AT (TEL)：机器人在电话处。

目标状态 FAST (BOLT)：旋紧螺栓

(b) 问题解决的具体过程，如图6.24所示。这个手续是从各级别的现在目标生成新目标，然后再返回适用STRIPS本身所构成。例如，级别1的目标是FAST (BOLT)，为此选定作用因素FASTEN生成新目标AT (BOLT) \wedge HOLD (WRENCH)，对这新目标再作级别2的适用，以下重复进行。

状态由每个作用因素的适用所改变。这些状态的改变写在左边。例如，最初的GO的适用是在电话前的机器人移动扳手的位置，对应着从AT (TEL) 的状态1改变为AT (BOLT) 的状态2。

本例中，级别2的最初目标AT (BOLT) 一旦没达到、立即被破坏，在级别2的最后再被纠正。这个手续显然有多余。关于这点，由发展STRIPS的RSTRIPS用目标保护机

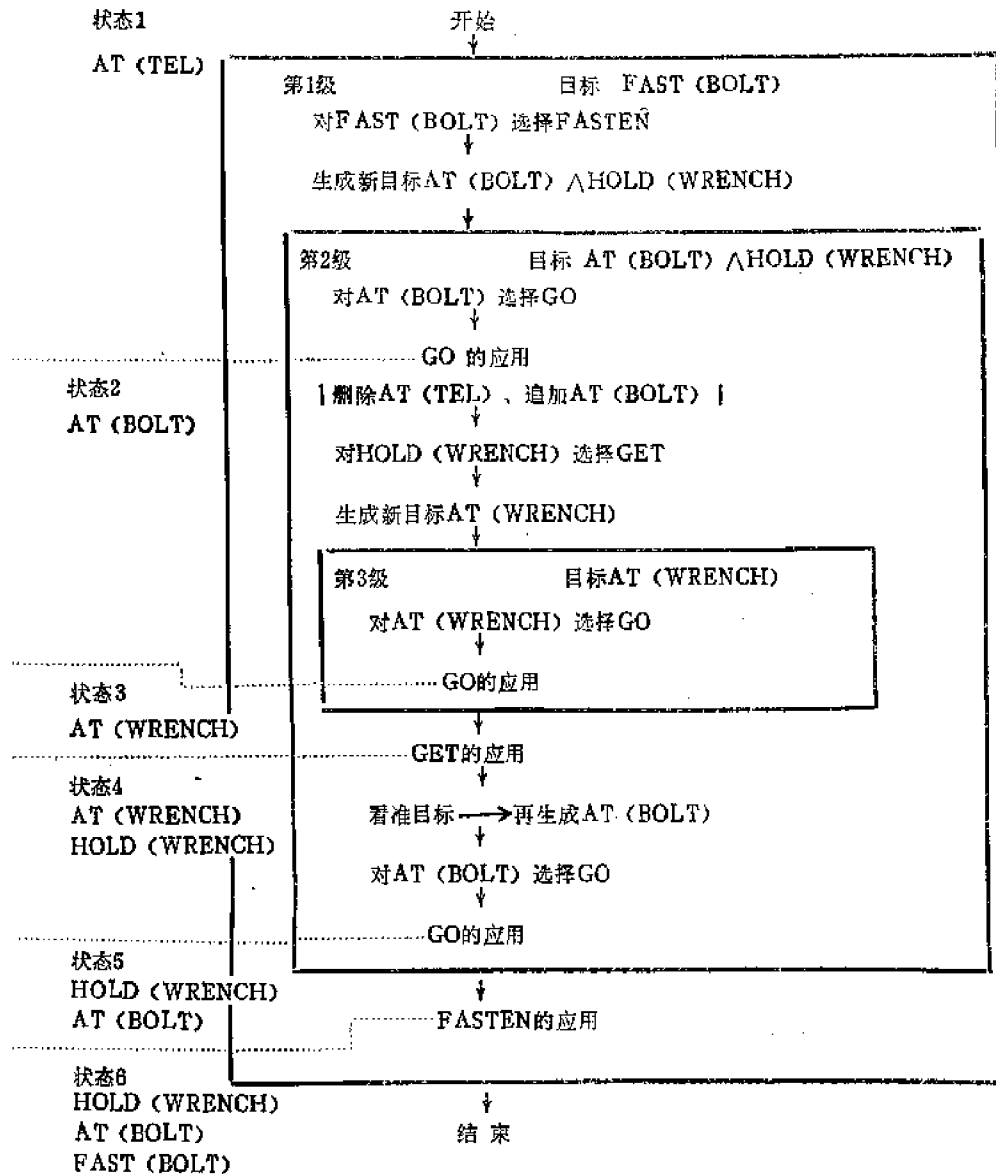


图 6.24 问题解决的过程

构方法来解决⁽⁴²⁾。另外，下述的NOAH方法也被提出来了。

(3) NOAH⁽⁴³⁾ NOAH是用节点来表示、作状态描述的。从开头的节点开始，把节点展开成子设计，对各子设计有如下的三种评价，进一步对各节点重复这些手续。

三种评价是：

①矛盾解决的评价 在部分设计手续的网络中，着眼于add表和delete表，检出一设计中是必要的条件而在另一设计中完全消失的构造，进行消除。简单地说，消除的方法是把某条件是必要的操作紧接在某必要条件完全消失的操作之前进行。

②现存实物利用的评价 在设计过程中，不必决定哪种实体划分给某变量是好是坏。NOAH中把这作为形式实体处理，随着设计的进行会出现适合形式实体的实体，在这阶段就使用形式实体。

③冗长前提条件削减的评价 随着设计的进行，会重复出现手续中的同一条件。从

那种条件中检出冗长的东西并去除它。

用NOAH法解决图6.25的积木问题，有图6.26所示的解决手续。

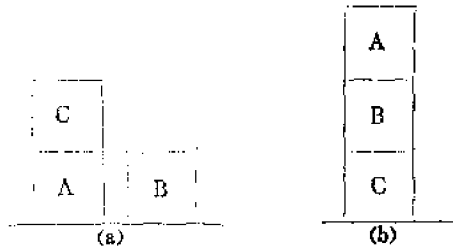


图 6.25 积木问题

(a) 初始状态；(b) 目标状态。

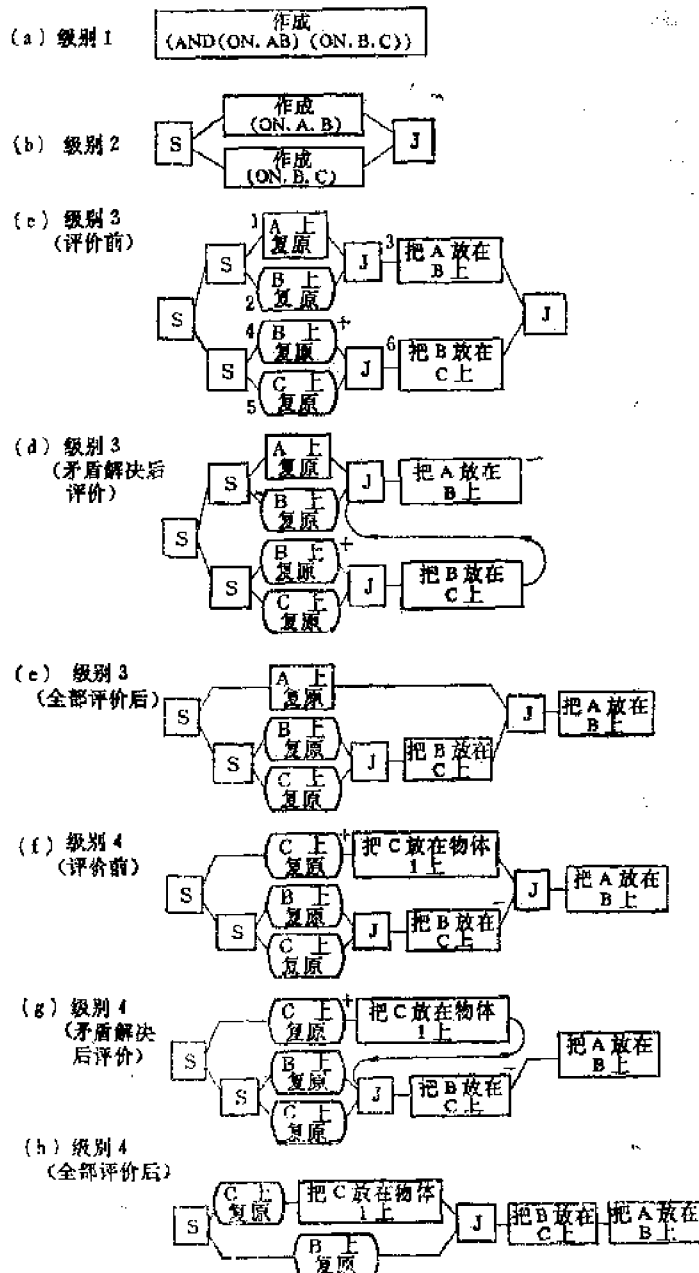


图 6.26 积木问题的解决手续

参 考 文 献

- (1) 渡辺 茂 監修：“産業用ロボットの技術”，日刊工業新聞社（昭54）。
- (2) Ejiri, M., et al.: "A prototype intelligent robot that assembles objects from plan drawing", IEEE Trans. Comput., **C-21**, pp. 161 (1972).
- (3) 平井, 佐藤：“言語介在型マスタ・スレーブ・マニピュレータシステム”，計測自動制御学会論文集, **20**, 1 (昭59)。
- (4) 館, 小森谷：“第三世代ロボット”，計測と制御, **21**, 12 (昭57)。
- (5) Tsukamoto, M., et al.: "Conceptual design of a distributed operating system for intelligent robots", Proc. Int. Conf. Advanced Robotics (1983).
- (6) Mujtaba, S. and Goldman, R.: "AL User's Manual", Memo AIM-323, Stanford Univ. (Jan 1978).
- (7) Hasegawa, T.: "An interactive system for modeling and monitoring a manipulation environment", IEEE Trans. Syst., Man & Cybern., **SMC-12**, 3, pp. 250-258 (May/June 1989).
- (8) 服部四郎：“言語学の方法”，岩波書店（昭35）。
- (9) 大泉夫郎 監修：“音声科学”，東大出版会（昭47）。
- (10) Harris, C. M., et al.: J. Acoust. Soc. Am., **35**, 12, pp. 1972-1977 (1963).
- (11) Noll, A. M.: J. Acoust. Soc. Am., **33**, 2, pp. 296-302 (1964).
- (12) Markel, J. D., et al.: "Linear Prediction of Speech", Springer-Verlag (1976).
- (13) Itakura, F., et al.: Proc. 7th ICA, 25 C1 (1971).
- (14) Wakita, H.: IEEE Trans. Audio & Electroacoust., **AU-21**, 5, pp. 417-427 (1973).
- (15) Nakajima, T., et al.: Bul. ETL, **37**, 4, pp. 462-481 (1973).
- (16) Tanaka, K.: IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process., **ASSP-27**, 6, pp. 596-608 (1979).
- (17) 追江博昭, ほか：音響誌, **27**, 9 (昭46)。
- (18) 菅村 昇, ほか：音響学会音声研資, **S** 80-61 (昭55)。
- (19) Sakoe, H.: IEEE Trans. Acoust., Speech & Signal Process., **ASSP-27**, 6, pp. 588-595 (1979).
- (20) 岡 隆一, ほか：音響学会講演論文集 (昭56-10)。
- (21) 新美康永：“音声認識”，共立出版（昭54）。
- (22) ALPAC: "Language and Machines, Computers in Translation and Linguistics", National Academy of Sciences (1966).
- (23) 田中雅哉, ほか：“自然言語処理技術と言語理論”，電学調査報告, No. 205 (昭56)。
- (24) Aho, A. V. and Ullman, T. D.: "The Theory of Parsing, Translation and Compiling", Prentice Hall (1972).
- (25) Winograd, T.: "Language as a Cognitive Process-Syntax", Addison Wesley (1982).
- (26) 長尾 真：“言語工学”，昭晃堂（昭58）。
- (27) 西田富士夫：“言語情報処理”，コロナ社（昭56）。
- (28) Fillmore, C. J. (田中, 船越訳)：“格文法の言語”，三省堂（昭50）。
- (29) 長尾, 辻井：“意味および文脈処理を用いた日本語文の解析”，情報処理, **17**, 1 (昭51)。
- (30) Ikeda, T.: "J-Analyzer: Analysis of Japanese Sentences Based on Binding Structure Representation of Words", J. Inf. Process., **3**, 4 (1981).
- (31) “自然言語処理技術シンポジウム論文集”，情報処理学会（昭58）。
- (32) Shortliffe, E. H.: "Computer-Based Medical Consultation: MYCIN", American Elsevier New York (1976).
- (33) Van Melle, W.: "System Aids in Constructing Consultation Programs", UMI Research Press (1981).
- (34) Davis, R.: "Reasoning about control", Artif. Intell., **15**, pp. 179-222 (1980).
- (35) Minsky, M.: "A Framework for Representing Knowledge", The Psychology of Computer Vision, ed. P. Winston, McGraw-Hill (1975).
- (36) Roberts, R. B. and Goldstein, I. P.: "The FRL manual", MIT Artificial Intelligence Laboratory Memo 409 (Sept. 1977).
- (37) Bobrow, D. G. and Winograd, T.: "An overview of KRL, a knowledge representation language", Cognitive Sci., **1**, 1 pp. 3-46 (1977).
- (38) Smith, R. G. and Freidland, P.: "Unit Package User's Guide", HPP-80-28, Stanford Univ. (1980).
- (39) Ernst, G. W. and Newell, A.: "GPS - A Case Study in Generality and Problem Solving", Academic Press, N. Y. (1969).
- (40) Winston, P. H.: "Artificial Intelligence", Addison-Wesley (1977).
- (41) Fikes, R. E. and Nilsson, N. J.: "STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving", Artificial Intelligence Group Technical Note 43 (revised), SRI (1971).
- (42) Nilsson N. J.: "Principles of Artificial Intelligence", Springer-Verlag (1982).
- (43) Sacerdoti, E. D.: "The nonlinear nature of plans", Proc 4th IJCAI, pp. 200-214 (1975).

第7章 在生产中的机器人技术

7.1 工业用机器人的起源

用于生产工程中的工业机器人的概念，据说是1945年美国电子科技工作者吉·笛沃(G. Devel)以“按程序工作的物品传送器”(Programmed Article Transfer)为名申报专利的。而奠定今日工业机器人的基础，将其引上最初的实用化道路的是美国优尼梅申公司领导人杰·英格伯格(J. Engelberger)。他从1956年着手进行调查，1961年把样机1号投入通用汽车公司，用于压铸零件的装卸。这种1号机，按照现代工业机器人分类法，属于五个自由度极坐标机器人，可以说与现在优尼梅申公司生产销售的2000型完全一样。由此可知，20多年前制造的工业机器人的设计思想是何等的恰当！实际上，英格伯格调查了库拉依斯公司的7个工厂，伏特公司的6个工厂，通用汽车公司的5个厂的生产现场，分析了人工的各种重复性作业，调查总结了这些作业的动作范围、运动自由度、可搬重量大小、动作的速度大小、动作的正确性要求以及设置条件等，从共同的要求出发，试制了几台样机，实施了各种作业的模拟实验，结果作为一种有通用性的自动机械，创造了最初的工业机器人的形状、特征⁽¹⁾。像这样，开始时工业机器人是由“通用性”这样一个设想而产生的，后来就扩大成适用于各种各样的生产工程。另外，我们使用的不仅是单个机器人，而且把它们作为大规模的生产系统加以使用，并且不断向着最适合各个生产工程的“专用化”方向发展，最后，可以说，直至出现了今天的多种多样形态的工业机器人。下节开始，我们介绍在生产工程中有代表性的工业机器人使用的实例。

7.2 适用于点焊作业的机器人

7.2.1 概要

今天的工业机器人之所以普及，是由于当初人们把机器人导入了伏特公司、通用汽车公司等公司的汽车车体点焊工程的缘故，也是由于在1967年日本汽车工业也大量引入机器人的缘故。

引入机器人的理由如下：

(1) 机器人适应产品(汽车)多样化，有柔软性，也就是说，在一条生产线上，可以混合地生产若干车种，同时，对于生产量的变动、型号的变更，能够迅速地进行生产线的编组更替，这是专用的自动化生产线不能比拟的，能发挥投资的长期效果。

(2) 可以提高产品质量，也就是说，为了使点焊作业机器人化，需要改变装配方法和加工工序，所以不可避免的要提高诸如供给的零件、夹具、搬运工具等的精度，这些关系着产品的精度和焊接质量的提高，机器人化的结果，可得到稳定的高质量的产品。

(3) 能提高生产率，换句话说，机器人的作业效率，不再随着作业者变动，因此可以稳定生产计划。可以认为这关系着最终生产率的提高。

把机器人引入汽车的点焊工程，在各个汽车制造公司中，各有各的特色。还有，各公司的引入效果（经济性、生产效率等）也往往不会公布。另外，引入的规模也不同，有一条生产线引入数台，也有一条生产线引入100台以上的，所以具体的介绍一般性的例子有困难。以下叙述有关引入计划的适用性技术。

7.2.2 为引入机器人的配套规划

点焊作业占汽车工厂的车体组装工程的大半，讨论点焊作业的自动化设备规划的方法，是由计划生产台数和设备的使用年数决定投资额，基于投资额探讨设备的自动化程度或机器人化程度。其讨论的流程图如图7.1所示。首先，根据所要求的条件，即要求规格（车体图样、焊接点数、质量基准、设备条件）和能力条件（生产台数、设备开工率）来决定装配工程的基准图。在基准图中确定出诸如精度要素、精度的确认方法、搬运方法、焊接方法、夹具规格等，在此同时要反复地讨论它们之间的关系。然后讨论配置关系、讨论作业的工序、建立计划方案，根据系统的评价标准进行讨论评价以后，最终做出决定。虽然，这样一系列的作业需要很多的时间，但这也是设备规划的关键，所以要慎重地用充分的时间来进行。根据这样的流程所建立的系统的一个例子，它的主规格见表7.1，另外，全体布局图如图7.2所示，图7.3是编入本系统的子装配系统的立体示意图。

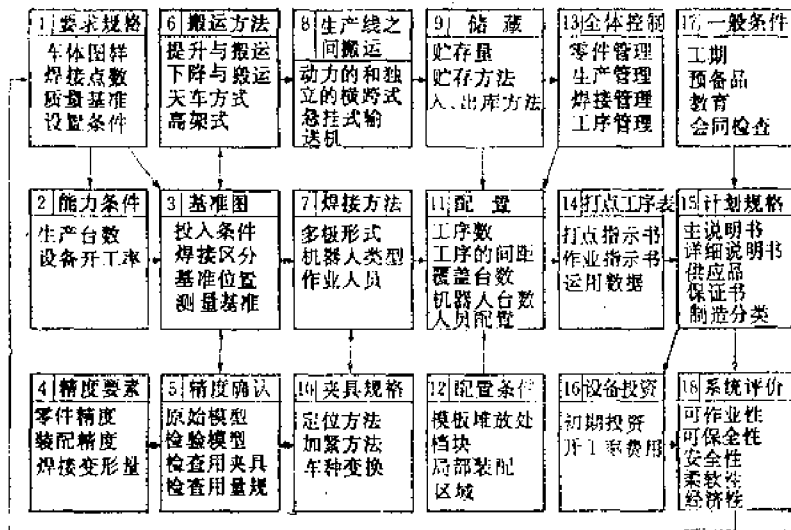


图 7.1 设备规划的流程

7.2.3 点焊作业的配套设计

上一节叙述了整体系统设计，接下来，我们按图7.4所示的流程对每个工作台、每个机器人进行详细的配套设计。我们可根据打点部位不同选择机器人的类型以及焊枪的形式，并分析机器人的动作范围、打点姿势、设置形式、作业的循环时间等。其结果汇总于表7.2，图7.5所示为机器人打点姿势图之一例。

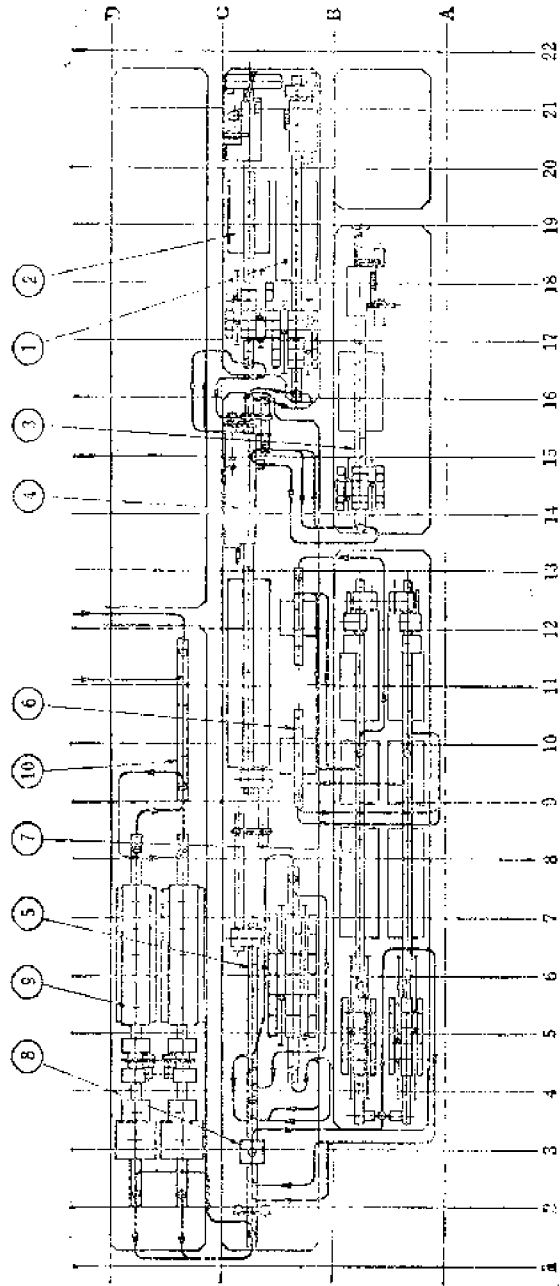


图 7.2 整体布局

- ①后地板生产线; ②中央地板生产线; ③前车身生产线; ④底板框架生产线; ⑤底板框架加工线;
- ⑥车身侧面内部生产线R/L; ⑦车身侧面内部生产线L/R; ⑧车身侧面内部生产线; ⑨车身主加工生产线; ⑩车身主加工生产线。

表 7.1 车体组装工厂的主要规格

1	名 称	车体点焊生产线
2	生产台数	65台/h
3	节拍时间	44s
4	质 量	焊接质量、车体精度
5	生产线的组成	后底板生产线 中央底板生产线 前车体生产线 底板框架生产线 底板框架加工生产线 车体侧面生产线R/L 车体侧面内部生产线R/L 车体紧固生产线 车体主生产线 车体主加工生产线
6	整体控制	CPU (中央处理器)
7	机 器 人	203台
8	多极点焊机	20个工序
9	车 体	车种: 4种 尺寸: 3700 (长) × 1600 (宽) × 1170 (高) mm 重量: 250kg 供给零件: 88件 焊接点数: 3000点 机器人使用率 85%
10	设置空间	252 (长) × 97 (宽) (m)
11	动力源	电源 压缩空气 冷却水

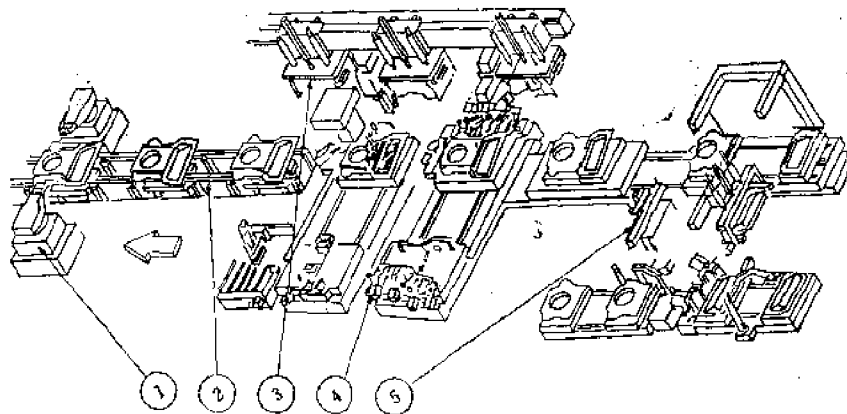


图 7.3 透视示意图

①机器人; ②梭式输送带; ③附加传送装置; ④多极点焊; ⑤零件输入。

表 7.2 机器人的规格一览表

工序 No.	机器人		行程 (mm)		枪		平		体		焊接时间 (Hrs)		循环时间 (s)	
	No.	型号	作业	常用 最大	电级 加压力 (kg)	重量 (kg)	打点部位	打点数	全打点数	压紧	I	II		保持
300	1,2	2660B	30	—	270	14	R	5	12R/L	15	9	7	8	34
							S	3						
							T	4						
400	3	2660C	30	—	230	15	U	14	24R/L	15	7	—	3	35
							V	10						
400	4,5	6560C	30	—	270	17	H	22	22R/L	15	7	—	3	35
							N	9	9R/L					
500	8,9	6560C	30	—	320	17	O	18	24R/L	15	8	10	3	35
							P	3						
							Q	3						
600	10,11	2660B	30	—	270	18	A	2		15	7	9	3	33
							B	3	15R/L					
							C	4						
600	12,13	6560C	30	—	230	16	G	18	18R/L	15	7	—	3	35
							F	20	20R/L					
700	16	4660B	30	80	230	44	L	5	16R/L	30	7	—	3	35
							M	11						
700	17	2660B	30	—	230	16	J	6	12R/L	20	7	—	3	34
							K	6						
800	18	2660B	30	—	230	18	I	20	20R/L	15	7	—	3	35

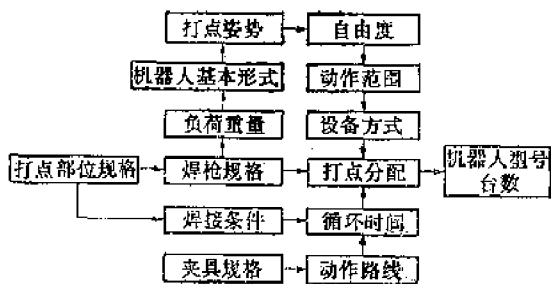


图 7.4 机器人配套设计时讨论的流程图

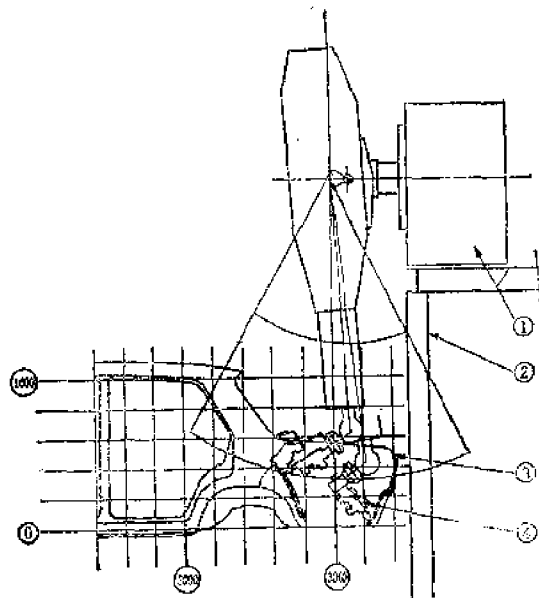


图 7.5 打点姿势图

汽车点焊的配套设计，从生产设备的规划开始，直到最后建立机器人作业的程序为止，需要完成庞大的作业量。面对着最近汽车型号频繁地改变的状态，这种工作量，对汽车制造者也好，对机器人制造者也好都是一个难题。因此，目前研究的目的是与汽车CAD有关的配套设计的CAD，可以认为在不久的将来，这将会成为实用的方法。

7.3 适用弧焊作业的机器人

7.3.1 概要

与适用于点焊作业的机器人不同，适用于弧焊作业的工业机器人只是被人们小规模地，引入一台到几台。其主要原因是，据推测日本的弧焊工作者不下20万人，但其中60%的人是属于100人以下的企业，并且弧焊作业的产品中的大多数是中小批量产品的缘故。因此，适用于弧焊作业的例子，将涉及许多分支。这里，介绍弧焊作业中较复杂的双轮机动车的管车架的焊接的适用例。

7.3.2 引入机器人的准备、作业的论证

当人们把机器人引入过去靠人工的半自动焊接作业时，必须进行下述的预备作业。

(1) **工件的精度** 在进行正常的焊接作业中，在没有障碍的范围内（通常为线径的40~60%），机器人能否维持工件的精度。另外，接缝部分间隙是否过大等，如果没有这些问题，那么就可以说引入机器人大体成功了。

(2) **夹具** 在用机器人进行的弧焊作业中，不可缺少固定工件的夹具，对夹具如下要求：

- (a) 前后工序与其夹具的基准统一；
- (b) 减少定位误差；
- (c) 回避与焊枪的干涉（使夹钳臂小型化、采用2级夹钳臂等）；
- (d) 装拆方便；

(e) 适应焊接变形 (使用基准销的微调、使用安装拆卸器等)。

(3) 布局规划 向全自动生产线引入机器人时,要讨论是否是与作业者混合的间歇方式,进而要讨论与其他设备的接续条件。

(4) 与作业者的关系 必须设计与操作工作者与维修者技术水平相适应的系统(例如,要考虑有女性临时工的情况等)

(5) 预备实验 适用弧焊作业的情况下,一定要用工件的样品做预备试验,确认焊接质量,确认循环时间。

7.3.3 适用于双轮机动车架的例子

双轮机动车架是复杂的管结构。还有,由于车种多,车架也超过30种,是典型的多品种中批量产品。另外,需要焊接的地方多,作业环境也不理想,所以对导入机器人的要求比较强烈。这里介绍车架侧梁的焊接例。

(1) 工件的规格和焊接方法

(a) 名称 车架侧梁。

(b) 大小、重量 $80 \times 2000 \times 2000\text{mm}$, 10kg。

(c) 焊接处所 整体焊接线长度 50处, 1710mm。

(d) 板厚 管1.6~2.3mm; 架1.2~1.6mm。

(e) 焊接条件 MAG焊接, 电流120~180A, 电压17~19V, 速度500~800mm/min, 焊接层数1。

(f) 循环时间 焊接时间3min30s, 停机时间1min20s, 夹具反转时间40s, 弧焊时间比例64%。

图7.6所示为工件的外观形状, 图7.7所示为主要机器, 图7.8所示为布局图。

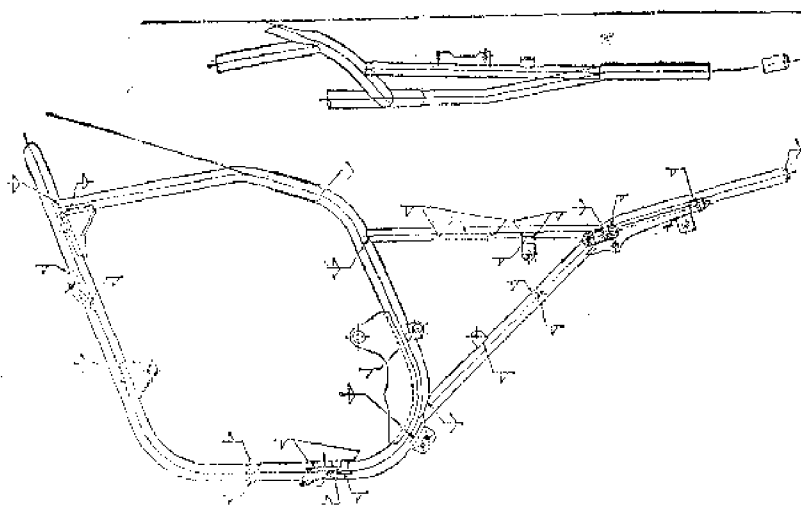


图 7.6 工件的形状

(2) 本系统的特征

(a) 高效的配置方法 机器人的第一关节的动作用角为 120° ;人们有效地利用了机器人

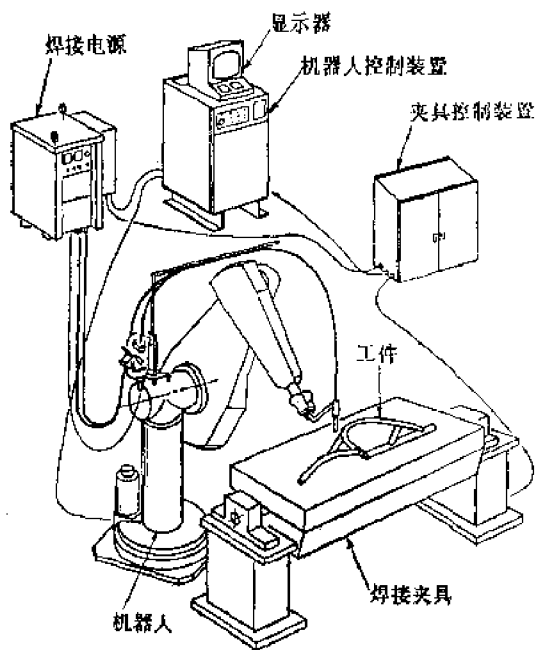


图 7.7 机器的构成

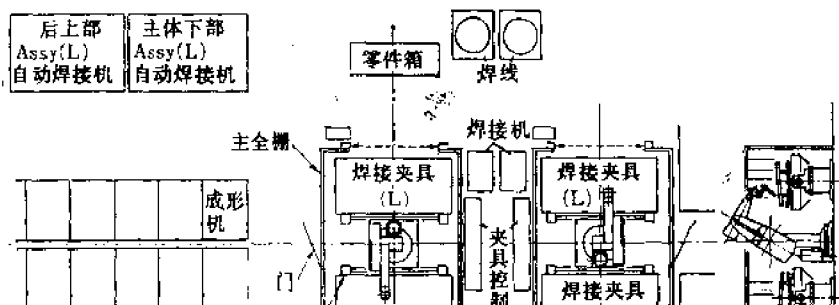


表 7.3 安全措施

安全措施	自我诊断	<ul style="list-style-type: none"> 操作失误 程序失误 硬件的故障 伺服系统的故障 软件的故障 与软盘有关的故障 与焊接机有关的故障 警告等
	速度设定	<ul style="list-style-type: none"> 示教速度规定 重复速度规定 检查重复速度规定 DO指令速度规定
	动作范围设定	<ul style="list-style-type: none"> 软范围设定 机械制动设定
	其他	<ul style="list-style-type: none"> 马达过电流过负荷电流检测 异常停止时止推式按钮 示教盒的异常停止 偏差、指令值异常的检测 速度异常检测 编码器异常检测 检查模式的转换开关

表 7.4 自我诊断机能

操作失误	<ul style="list-style-type: none"> 键入失误 (指令命令) 键入失误 (自变量) 键入失误 (文件名) 键入失误 (标签) 键入失误 (系统开关名) 键入失误 (程序名) 未定义 (文件名) 未定义 (系统开关名) 未定义 (程序名)
	<ul style="list-style-type: none"> 算数溢出 标记未定义 位置信息未定义, 动作范围外 形态变更不允许
程序失误	

自我诊断	硬件故障	直线动作不允许
		子程序调动数已满
		焊接, 横向摆动条件未定义
		外部信号 (OX、WX) 通道号不对
	伺服系统故障	CPU 错误
		时钟超越界限
		A-D变换器不良
软件故障	编码器信号不良	
	接点控制不良	
与软盘有关故障	超时	
	偏差异常	
与焊接机有关故障	编码器信号不良	
	偏差异常	
警告	可编程只读存储器PROM错误	
	CPU 错误	
	通讯错误, 检查和错误	
	磁盘已满	
	准备不良	
	格式错误	
	与焊接机有关故障——焊接机无响应	
	未实行定标	
	臂动力切断	
	计算机模式OFF (关闭)	
	失措冲击	
	存储器已满	

(i) 一旦焊枪接触到夹具和工件, 机器人可自动地临时停止运转。

(ii) 为了防止拆装工件时, 机器人不小心冲入, 在机器人和夹具间设计了开闭式的遮断器。

(iii) 为了防备操作失误和机器人失控时焊枪的冲突, 人们做成了能吸收三维方向的冲击的焊枪罩。

(c) 演算能力 人们灵活运用计算机, 并设置了种种演算机能, 作为机器人自身的能力, 以谋求改善操作性能。其主要的演算机能:

(i) 三维的直线插补。

(ii) 设定接近、退避动作 以示教点为基准, 在程序上设定接近该点的接近动作和离开该点的退避动作, 不必示教。

(iii) 移动机能 由于能按照指定的距离, 以绝对坐标系XYZ沿三维方向去移动示教点, 所以在批量变更时, 能够补偿焊道的偏移。

(iv) 坐标系的回转、移动 能够适应工件的配置方向和工具的形状, 平移坐标系或

回转坐标系。能够设定工作的XYZ的基准或设定焊枪的目标不动的坐标系。

(v) 相对位移指定 移动基准的三点，则其他所有的位置信息也相对移动，所以，当工件错动时，能在线三点采样法进行数据补偿。

(vi) 简易工具补偿 按指定距离以XYZ三维方向移动设在机器人手腕的工具，或者相对于XYZ三基轴平行地改变姿势，可用于改变焊条伸出的长度、改变焊枪的角度等。

(vii) 焊枪的抖动机能 在与焊接进行方向成直角的方向进行摇振的操作叫焊枪抖动，其所划出的图形是三角波、梯形波，基本上有两端休止机能，而其方向不仅可与焊枪轴心成直角，而且可以取相应的任意方向。

(viii) 回描机能 在确认示教点运转时，只要用示教盒进行操作，可使机器人一步步地做后退动作，这样容易修正示教点。

(d) 焊接机能 从弧发生指令开始，对弧切断、焊接时的焊接异常可采取适当的处理措施。焊接机能的要点如下：

- (i) 焊接条件的数值设定（速度、电压、电流）。
- (ii) 焊接条件的中途切换（速度、电压、电流）。
- (iii) 焊接条件的在线变更（电压、电流）。
- (iv) 焊条的平稳蠕动。

焊接时动作的序列如图7.9所示。

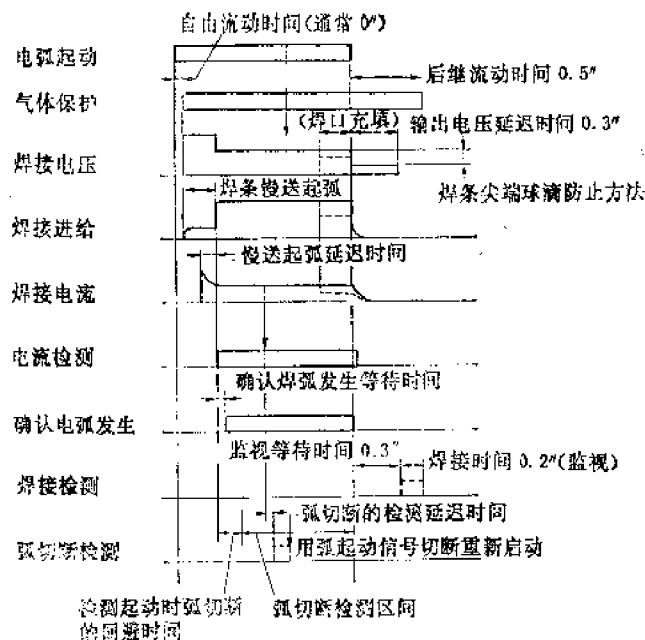


图 7.9 焊接动作序列

引入机器人得到的效果如下：

(1) 生产率提高 引入前，8个人的生产线可削减至6个人，由于机器人的引入，产量可由每天生产180台上升到每天生产200台。

(2) 质量稳定 由于选择了最佳焊接条件，使得焊线均匀、焊接质量稳定。另外，绝

对不会产生像忘记焊接这样的作业失误。

7.4 适用于油漆作业的机器人

7.4.1 概要

1971年左右，挪威的都尔法公司研制的油漆专用机器人开始把工业机器人用于油漆作业。后来，虽然普及到各个行业，但也和上节的弧焊作业机器人一样，往往是在规模比较小的企业里，使用1~2台。另一方面，数年前开始，以通用汽车公司⁽²⁾为首，面向国内外汽车制造者的一种使得汽车喷漆生产达到无人化的大规模系统，目前已有二、三个实用投产了。但可认为正规化的系统，还有待今后的工作。下面叙述油漆作业的适用技术。

7.4.2 油漆机器人的特点（示教）

用于油漆作业的机器人和用于其他作业的机器人不同。其主要不同点：其他作业的机器人，只要正确地控制其动作，即控制定位精度，轨迹模仿精度和速度等就足够了，而油漆机器人与此不同的是油漆作业要评价油漆完成的状态。在靠人工作业时，是凭操作者的直觉和熟练进行的，而用机器人作业时，能否把这种人类的机能教给机器人，即能否示教，成了一个大问题。这种示教的方法分类如图7.10所示。

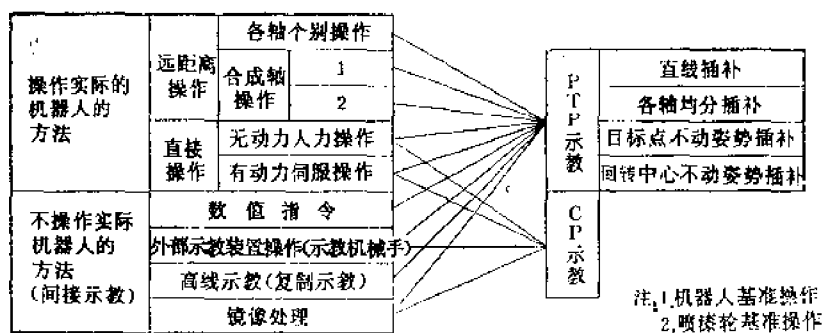


图 7.10 机器人示教方法分类

(1) **远距离操作** 各轴分别操作，由于要诱导机器人到给定的位置，要使喷漆枪摆出给定的姿势，太费时间。所以，一般采用由XYZ坐标系或手腕坐标系决定的合成轴操作。特别是以喷漆枪方向和与枪成直角的方向为坐标轴而组成的手腕坐标系操作最方便。

(2) **直接操作** 所谓无动力人工操作，是指在移动机器人进行示教时，将电源的电流切断，用人工进行操作的方法。这时，需要对可动部分取重力平衡，并降低摩擦，使其运动得轻快。对操作者手达得到的范围内，为小零件油漆时，这种方法是直观，容易明白的。但是，在能把操作原封不动地再现的CP示教法中，是不容许示教有失误的，而且示教的修正又十分麻烦。其次，是有动力伺服操作。这种操作要在力控制的操作部分上下工夫，并且，为了防止对操作者的危险，必须对安全措施给与特别的考虑。

(3) **数值指令** 是和数控技术一样，用数值进行示教的，但是在现在的技术水平上，

把复杂的油漆图形数值化是很难的。将来，如果能用CAD实现示教的话，大概数值指令法可以实用化。

(4) **示教机械手** 直接操作和机器人相同形状的示教机械手（这种机械手没有传动系统，只装有检测器，分量比较轻）进行示教，把它得到的数据传送给机器人，这种示教法容易，但由于需要一个多余的机械手，一般用得不多。

(5) **离线示教** 用不在生产线上的其他地方设置的示教专用机器人，事先进行全部示教，把其数据转送给实机。在这种情况下，需要修正机器人与工件相对位置关系，减小机器人（喷枪）的轨迹误差，并要求与油漆的时间完全一致。

7.4.3 油漆机器人的软件

软件的机能见表7.5。它的各种机能如下。

表 7.5 软件机能一览表

示 教	各轴操作 XYZ操作		编 辑 程 序	操作方法16进制键		
	手腕无感应XYZ操作			编辑	步进式编辑	
	示教时的速度选择			数据	移位 重写	
	以喷枪为基准的XYZ操作			坐标变换原点的登录		
目标点不动操作		伺服参数的登录				
喷枪头不动操作						
重 复	点到点控制 (PTP控制)		工 件 处 理 条 件	镜 像		
	连 续 控 制 (C P 控 制)	直线插补		传 送 带 方 式	间歇式(节拍)	
		各轴插补			间歇补偿	
		圆弧插补			传送带随动	
		目标点不动			传送带跟踪	
喷枪头不动	离 线 示 教	正常方式				
等速运动		传送带随动				
减速运动		传送带跟踪				
加速运动						
指定绝对值						
指定速度的检验						
检验模式(低速)						

(1) **CP控制的各种方式** 一般，除了用直线插补、各轴插补、圆弧插补之外，作为油漆作业的独特方面，有油漆的目标点不动和喷枪头不动两种方式，前者用于油漆面的方向变化时，而后者用于固定喷枪头摆动地喷涂物体的端面时。实际上用得最多的方式是进行喷枪基准XYZ示教，用直线插补的再现方法。

(2) **传送带方式** 一般，比起梭式传送带来，多用连续传送带。使用连续传送带时，如何吸收传送带行进方向(纵)的速度变动，以及如何吸收与其成直角的上下、前后(横)的变动是一个问题。通常纵向变动用机器人的动作吸收，其他方向的变动，往往用机械的方法加以限制。另外，对于连续传送带又可分为机器人按给定位置进行跟踪作业，和机器

人边行走边进行追从作业。前者的缺点是可能作业的空间小，后者的缺点是用机器人油漆费用较高。

(3) 离线示教 用间歇式传送带，虽然对于固定位置的机器人的情况是正常的，但如前面所说的相对位置补偿的计算精度成了问题。而在进行传送带随动和传送带跟踪的情况下，还要加上传送带的运动误差，所以要得到实用的精度相当困难。在实用化方面，还有必要消除机器人本身的机差。

(4) 镜像 在油漆如汽车那样的左右对称的工件时，只需要进行一侧的示教，用其数据反转形式，向对面的另一侧转送。这是提高示教效率的有用的方法。

7.4.4 油漆机器人的硬件

(1) 柔软性的手腕 被称为“象鼻子”式的手腕机构。由于它可以改变喷枪的姿势，所以可以减少无用的动作。它不仅能提高作业效率，而且手腕四周没有凹凸不平。使得往喷漆枪上联接罩子、电缆之类时，处理变得十分容易。图7.11所示是安装了柔软性手腕的机器人的一例。

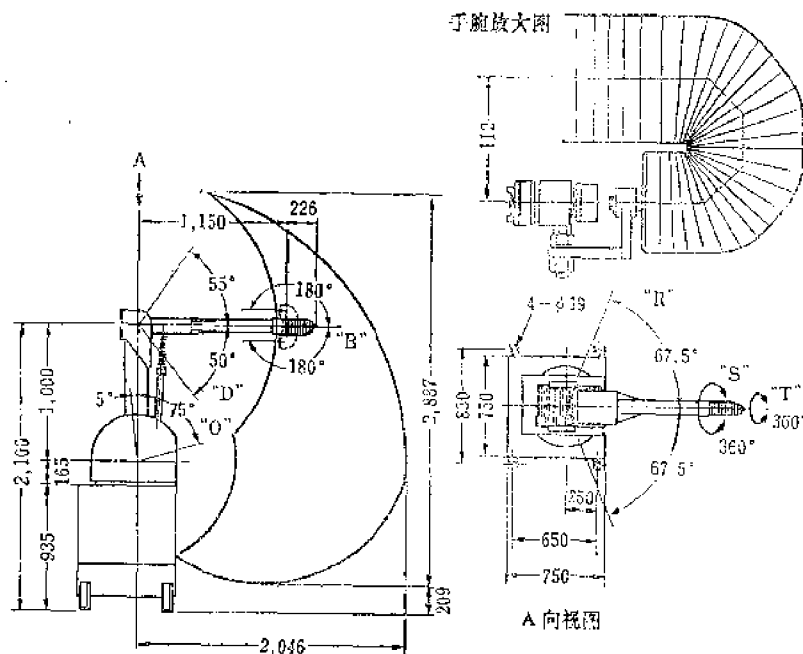


图 7.11 装有柔软手腕的油漆机器人

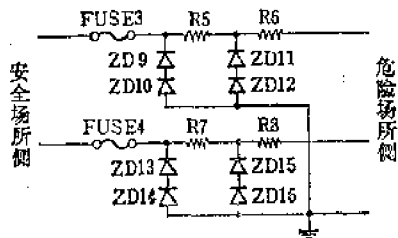


图 7.12 安全保持线路

(2) 防爆结构 一般油漆机器人都要求防爆结构。防爆结构中有耐压防爆，内压防爆……，但从本质上说，作为抑制点火能力的方法，一般采用“本质安全防爆结构”。这时需要使结构上的各要素：诸如传动装置、各种检测器等电器机械，在数瓦特以下就可驱动，达到本质安全防爆化。还有，并不是所有事故都是电器机械为发火源，如

在短路、接地、断线等等情况时，为了保证安全，在安全的场所插入安全保持器。其代表的安全保持线路，如图7.12所示，由齐纳二极管（限制电压）、电阻（限制电流）和保险丝组成。

7.4.5 适用于油漆作业机器人的讨论举例

这里举适用于油漆作业的最难的汽车车体的传送带跟踪的机器人为例。下面叙述其讨论的顺序。图7.13所示为油漆部位及其技术条件。

(1) 在每个油漆部位，求出需要油漆的车体与机器人的相对位置关系；

(2) 算出各个部位必要的动作时间。这时需要确认在每个部位动作的时间的总和不超过生产的节拍时间。图7.14所示为本例的讨论结果。

(3) 决定油漆的顺序和机器人的中心

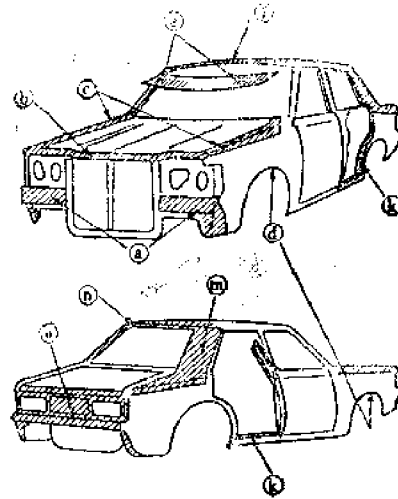


图 7.13 油漆部位和技术条件

(1) 工件长：4620mm；(2) 搬运节距：6420mm；
(3) 生产节拍：7.5s；(4) 搬运速度：85.6mm/s。

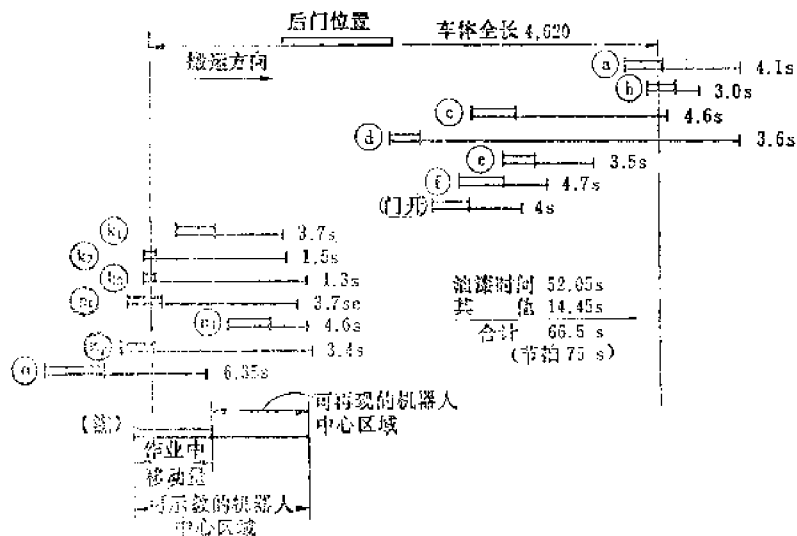


图 7.14 需要油漆的范围和必要的动作时间

位置，使得即使用最大速度、接连地搬运车体时，也能对车体的所有部位进行油漆而不遗留未漆的痕迹。图7.15给出了其结果。

(4) 最后，把油漆的部位分块，讨论如果车体停止，油漆到什么地方了。还有，讨论接下来车体移动到另外地方的时候，又油漆到什么地方了。其结果如图7.16所示。

按照以上的讨论，可以不遗漏地油漆所有部位并且与传送带的移动、停止无关。

适用于油漆作业的机器人最重要的问题是进行油漆作业的规划和教给机器人作业方法，在这些方面需要花费较大的力气。因而，它是对适用设计以及示教CAD要求得最多的领域。在它的实用化方面，还需要很多的时间，但是为了普及油漆机器人，这是个最大的课题。

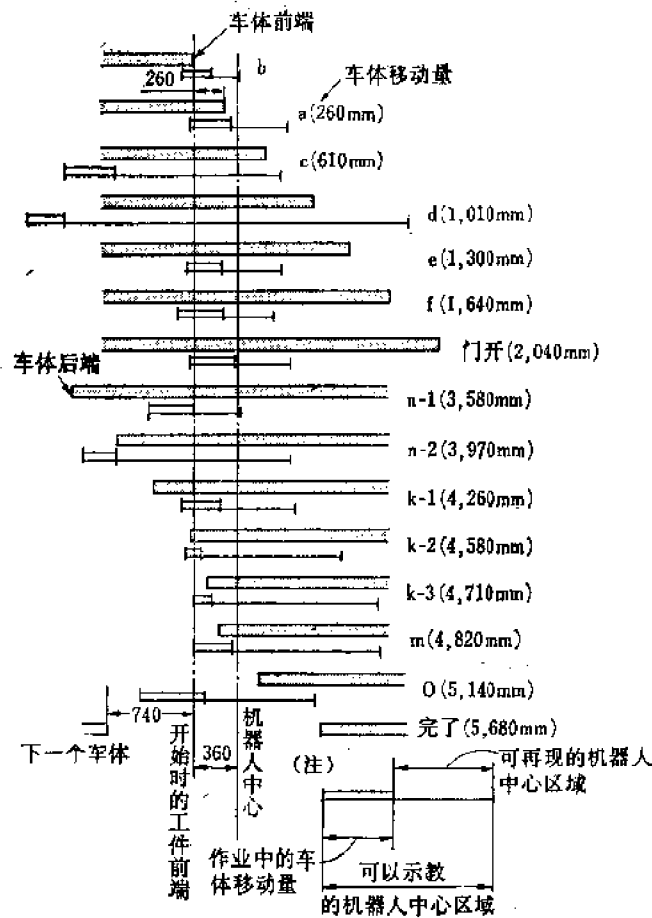


图 7.15 油漆部位和机器人中心位置

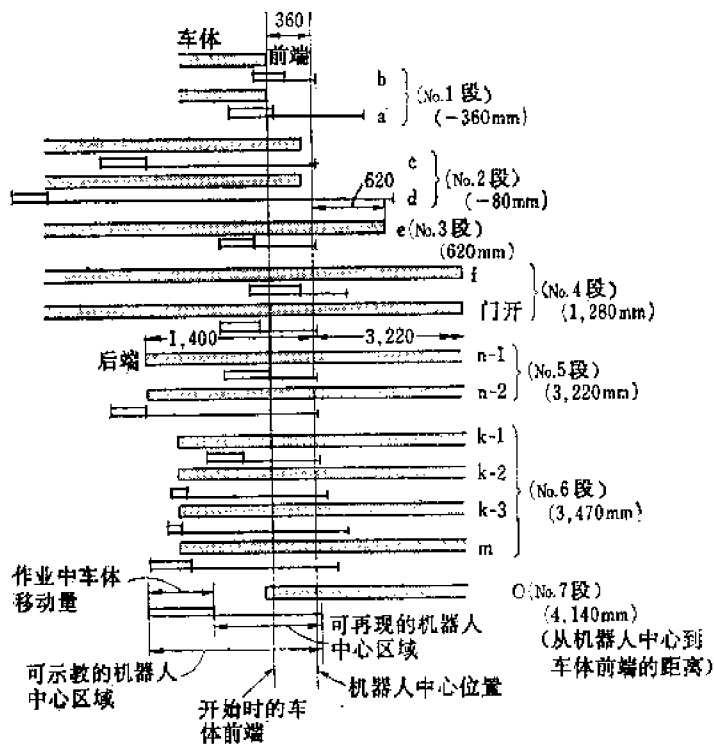


图 7.16 各油漆部位分块

7.5 适用于机械加工作业的机器人

7.5.1 概要

对机械加工的自动化，必须根据生产形态，分不同水平进行考察，也就是：

- (1) 自动装卸专用机床的自动化（批量加工）；
- (2) 用机器人的通用数控机床自动化（多品种、中小批量生产）；
- (3) 用机器人的多台专用机床或数控机床的自动化（多品种、中批量生产）；
- (4) 由自动仓库、搬运台车、机器人等组成的机械加工工厂的无人化，即柔性的机械系统（FMS）（多品种、中批量生产）等。

因而，为了提高生产率、提高设备效率、降低产品成本，要根据生产形态采用最适合的方式，有时，大规模、高度无人化的方案未必是合理化的方案。这里，介绍在不同机械组成的机床群中引入一台机器人的例子。

7.5.2 引入机器人的目标

在多品种，中小批量的生产线上，依然不得不依赖人工进行作业的，不仅有运送工件、把工件往机床上装卸，而且还有切削的处理和除去切削液等等，如果不解决作业的自动化，想要增加生产是困难的。因此，用它作为打开局面的对策：

(1) 生产量为中批量、工件是中等重量（10~25kg）的作业效率低的生产线上，谋求实现自动化。另外，把运送工件、往机床上装卸工件、处理切屑、除去切削液等包括在内，使得现在操作人员所进行的作业全部自动处理。

(2) 把提高生产率作为最终目的，努力提高设备开工率（包括工序时间、设备保养时间）。

根据以上的意图，选择生产线，设想如何引入机器人。

7.5.3 生产线的选择和引入机器人的基本设想

选定的候补生产线的机械编组和作业人员的配置如图7.17所示，其加工完成的产品的例子如图7.18所示。这种工件有6种形式的加工，重20kg。这条生产线的作业人员是3人×2班，另外检验（内径测量）需要0.5人，每月加工工件数为1200个，可见机加工时间为4~

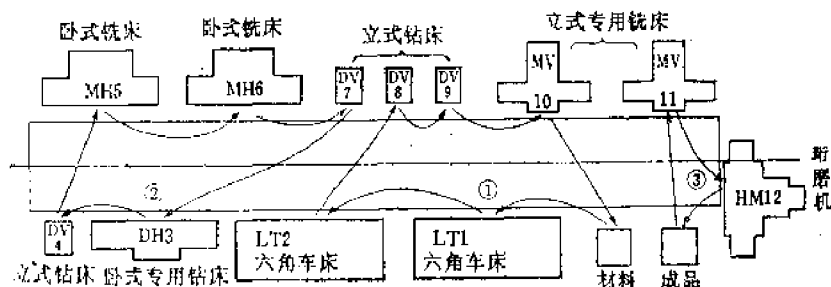


图 7.17 引入机器人前的加工线

9min, 周期时间为12~13min, 实际上由于操作人员感到高度疲劳, 需要20min。

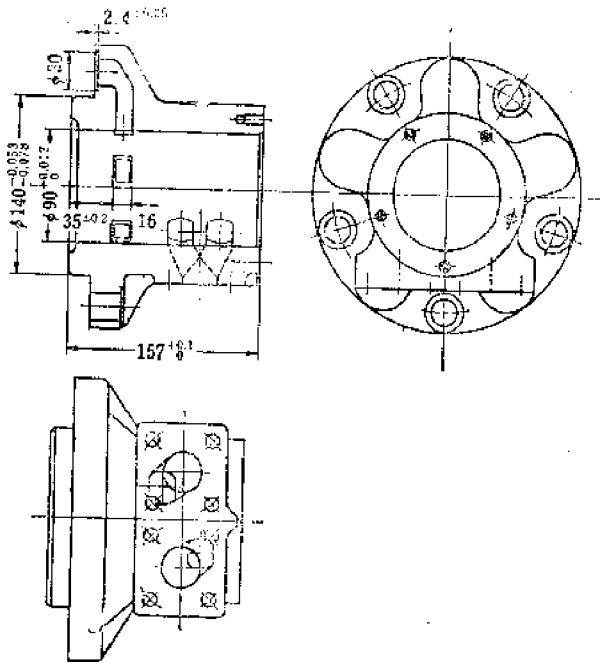


图 7.18 径向活塞电动阀壳体的加工图

下面是引入机器人的基本设想:

(1) 对象为约10台不同种类的机床, 机器人要进行工件的装卸, 并把工件运送到下一个工序, 所以应是地上走行式的。

(2) 让机器人自身具有工件的备料能力, 而且在备料时, 除了车床外, 往机床上装卡时, 应该让机器人具有圆周方向的定位机能。

(3) 把五台钻床中三台立式钻床的机能综合化, 制作新的卧式双基座多轴攻丝钻床, 所以图7.17中编组的机床群从12台变成10台, 并且变更了若干加工工序, 目的是为了缩短机器人行走的时间, 相应于机器人的行走路线对称地配置机床, 这样做使得机器人停止点为5个定点。

(4) 立式珩磨机的作业要求加工精度, 由于需要对珩磨的粗糙度以微米为单位进行测量, 并且交换精加工后的工件, 所以除了用机器人装夹工件外, 在此安置一个操作人员, 让他在进行珩磨作业和测量的同时监视机器人的生产线。

7.5.4 引入机器人应解决的事项

引入机器人时, 必须把机床和周围的装置配备齐全, 可以说这是引入机器人成功与否的关键。

(1) 搬运材料的传送带 它可以在连续供给材料的同时, 分离出最前头的一件, 并决定其给定位置。

(2) 工序异常的检测装置 对第1工序(车削外径)、第2工序(车削内径)的自动六角车床的精加工尺寸, 需要自动测量确认。

(3) 集尘装置 在切屑多的加工工序中, 设置电气式集尘装置, 并且, 在夹具装卸

处附近设置空气喷嘴，另外，由机器人把夹持后的切屑扫落在容器中。

(4) 回屑机 加工贯通孔时的回屑，妨碍下道工序的装卡。因此，在生产线内配置了回屑机。

(5) 加工件的清洁装置 在多轴钻床工序中，设置了除去切屑和切削液的清洁装置，机器人抓住加工件边旋转边把它装入这个装置的盒子中，由光电管检测出后从四周吹入空气。

(6) 工件的定位台 在机器人的面前临时设置了存储场所，把工作放在上面，让工件旋转直到光电管检测决定它的位置，把决定了加工位置的工作供给铣床和多轴钻床。

(7) 改良机床用的夹具 由于机器人的定位精度为 $\pm 1\text{mm}$ ，而夹具的必要精度为 $\pm 0.3\text{mm}$ ，所以对所有的夹具上设计了凹窝、销子等导向部分以确保其精度。

7.5.5 机器人生产线的实际情况

图7.19所示为生产线的编组和加工工序。导入前为3人 \times 2班，引入后省了2个人，有磨

表 7.6 引入机器人的时间图

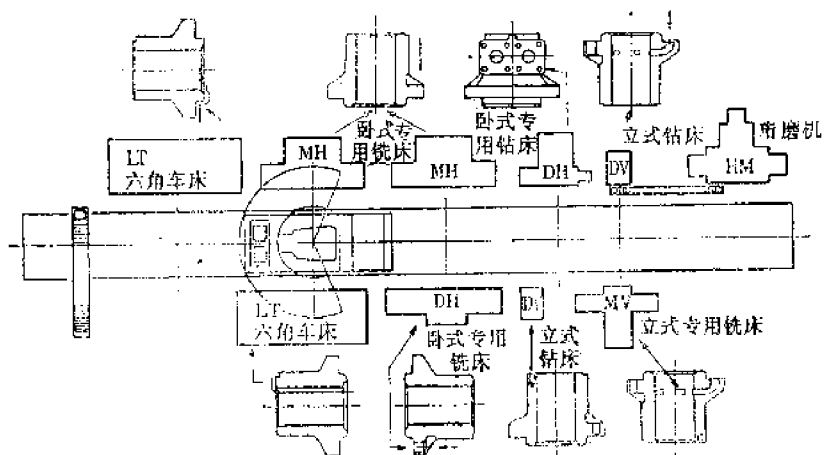
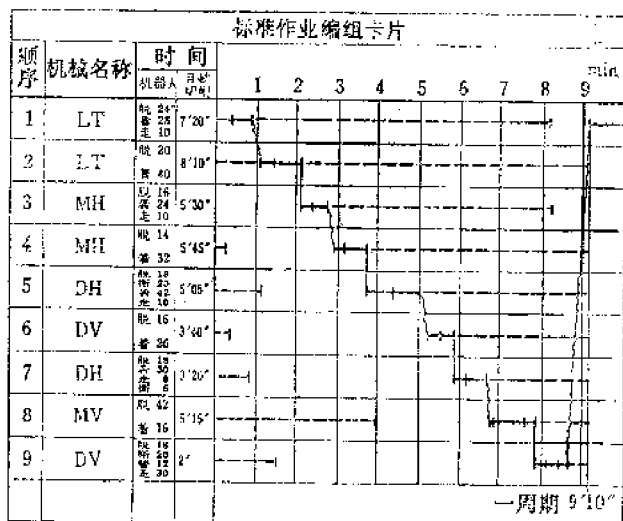


图 7.19 引入机器人时的阀体生产线和加工工序

操作人员兼做珩磨后的尺寸测量和生产线的监视作业，成了1人×2班。另外，周期时间为9min10s，其时间分配见表7.6。在这种多品种、中批量生产线上的问题是工序的更换时间。在这个生产线的6种形式的加工件的加工数量，每次都应顾客的要求而变更，而且为了减少在制时间，一个月内约要改变工序12次，完成这种工序变更的作业，需要6个人合计28h，生产线停工10.5h，1个月的设备开工率为360h19h×20天×2班，其中的30%被浪费掉，必须采取措施，缩短这个时间。

7.5.6 改善生产线以适应于生产量的激增

以前每月生产1200个，为了适应增长一倍的要求，必须改善生产线。我们首先着眼于机加工时间长的第一工序、第二工序，在第一工序上新投入了效率高的立式自动车床，在第二工序中并列地使用过去的两台六角车床。与第一工序的机加工时间相适应，把机器人的工作范围规定到第五工序为止，第六工序以后投入一名操作人员，这个部分同时设置了可轻松地进行搬运工作的传送带。其次，把珩磨机从生产线上挪开，珩磨操作人员兼作计量检测。因而材料的供给、生产线的监视由第六工序以后的作业人员兼任。这个新的生产

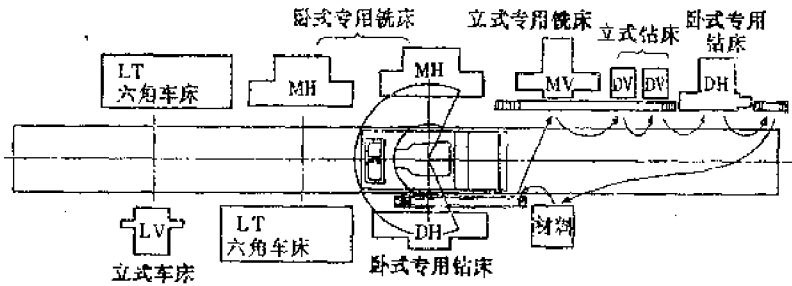


图 7.20 增产时的生产线编组

表 7.7 增产时的时间图

标准作业编组卡片																	
顺序	机械名称	时间 开始 结束	min														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	LV	1'20" 3'45"															
2	LT	1'10" 6'15"															
3	MH	50" 4'50"															
4	MH	1' 4'50"															
5	DH	1' 2'20"															
6	卫生	30"															
7	MV	30" 4'30"															
8	DV	35" 2'50"															
9	SM	25" 4'20"															
10	DH	10" 1'40"															
11	材料搬入	30"															
												11'40"					

线编组如图7.20所示。另外，时间分配见表7.7。1个工件的加工时间缩短到5min50s，同时，施工的筹备时间也缩短了，尽可能采用生产线外的筹备工作，表7.8为引入机器人初期的筹备时间，而改善生产线的筹备时间见表7.9。用三个人合计需时间10.7h，生产线停工时间缩短为4h。

表 7.8 初引入机器人时的开工筹备时间

作业程序编组卡片						
顺序	机械名称	程序时间	2	4	6	8 10 h
1	LT	3.5h	①			
2	LT	5		②		
3	MH	1	③			
4	MH	1				
5	DH	5.5	④			
6	DV	1.5				
7	DH	5	⑤			
8	MV	2				
9	DV	1.5				
机器人		2	⑥			
6名		28h	完成时间10.5h			

表 7.9 改善后的开工筹备时间

作业程序编组卡片						
顺序	机械名称	程序时间	2	4 h		
1	LV	0.5	①			
2	LT×2	1		②		
3	MH	0.75	③			
4	MH	0.75				
5	DH	1.5	④			
6	MV	1				
7	DV	1.2				
8	SM	0.5				
9	DH	2				
机器人		1.5	⑤			
3名		10.7	完成时间4h			

这样做的结果是，本生产线的生产能力成为1人×2班，每月生产工件2400个，比引入机器人前的3人×2班，每月生产1200个的情况，每个人的生产率提高到6倍。

本生产线引入机器人的重要经验：

- (1) 为了适合于引入机器人，首先要把周围的装置整理、备齐。
- (2) 让机器人做适合于机器人的作业，而不要勉强的以无人化为目的。
- (3) 生产率的提高是由于改善了主机（机床）而机器人是其辅助工具。

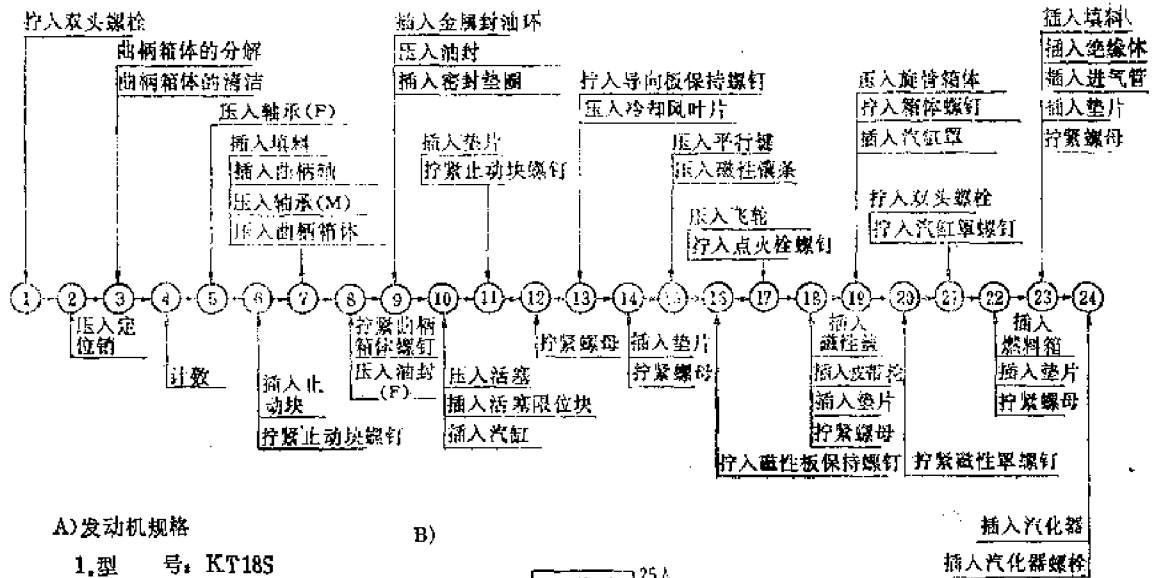
7.6 FMS和工业机器人

7.6.1 概要

FMS（灵活的制造系统）和FA（工厂自动化）正在被世界各国以各种各样的形式开发，并正在被引入生产工厂。其中，有以工厂无人化为目标的、作为国家规划的大规模系统。在日本，通产省工业技术院的大型规划“超高性能的激光应用复合生产线”是很有名的。一般，FMS从机械加工的复合生产系统着手。国内已有多条生产线开工，最近，国内外的综合电器制造商们，很活跃地开发着各种电器产品的装配工程的FMS，其中之一的是美国威斯钦浩斯的APAS（适应性强的可编程序的装配系统）。川崎重工也接受了通产省的核心技术研究开发基金，从1971年开始，经过三年进行了“利用系统机器人群的装配自动化装置”的研究开发。在采用FMS时，如何进行系统的概念设计，将决定系统成功与否，这样说，并不是言过其实。这里，介绍系统的概念设计。

7.6.2 对象模型的选择及现状分析

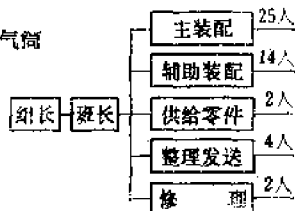
(1) 对象模型的选择 一般，装配作业往往需要有视觉、触觉等认识机能，而且近年来由于产品有多样化、寿命缩短的倾向，所以实现自动化困难，现状是这些作业几乎全



A) 发动机规格

1. 型号: KT18S
2. 形态: 强制空冷二循环单气筒
3. 排气量: 35cc
4. 最大输出: 1.5ps
5. 外形尺寸: 长178mm
宽207mm
高246mm
6. 重量: 3.7kg
7. 零件点数: ~300个

B)



主装配线上装配零件数目
(1)主要零件 27个(2)小零件 35个

图 7.21 装配线的组成

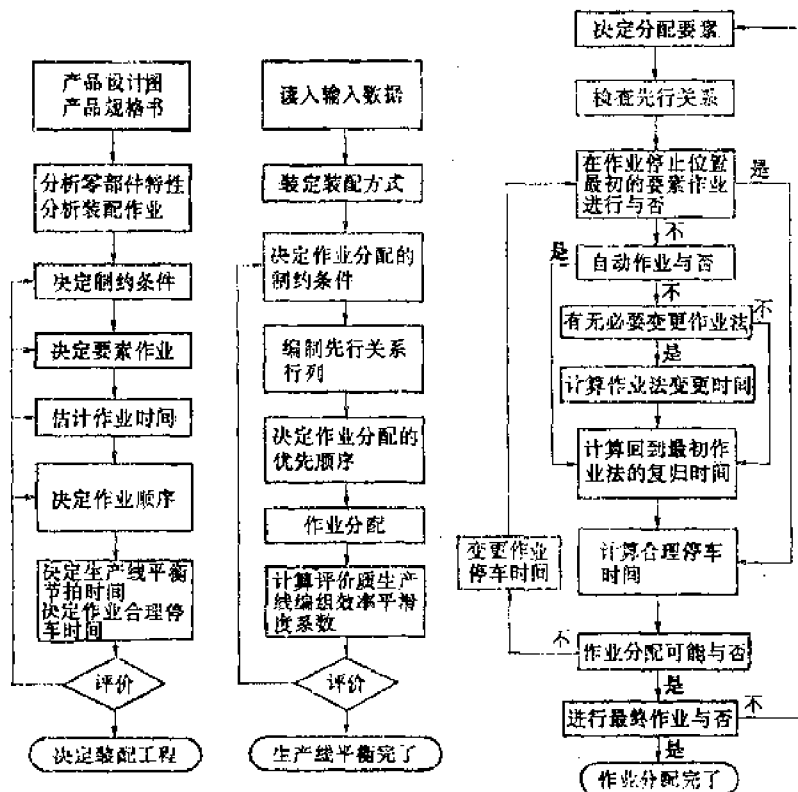


图 7.22 装配工序、生产线平衡、作业分配流程图

都依赖于人工操作。因而，为了对象选择的合理化，作为对象的条件：

(a) 中等产量的产品，而且是增产产品（计划时4万台/月，预计年增长率为20%）；

(b) 多种类、多规格（约为30个种类、40种规格）；

(c) 现存问题多，合理化的效果大。也就是由于作业人员不稳定、出勤率低、作业熟练程度不好、产品的次品率高等。又因为机种变换作业增加、设备的开工率显著地低下。

根据以上理由，选定了“强制空冷二循环汽油发动机”的装配生产线之一，图7.21所示是这个装配生产线的结构。

(2) 现状分析 首先进行装配工序的现状分析，装配的零部件各个特性的分析，装配作业的机能分析。其次，利用新开发的自动设计方法，进行装配工艺、作业分配以及生产线平衡的讨论。其流程如图7.22所示。

7.6.3 系统的基本组成

(1) 机器的编组 上面分析了用机器人的装配作业的工序，如图7.23所示。各工作台如下所述的机器所构成：

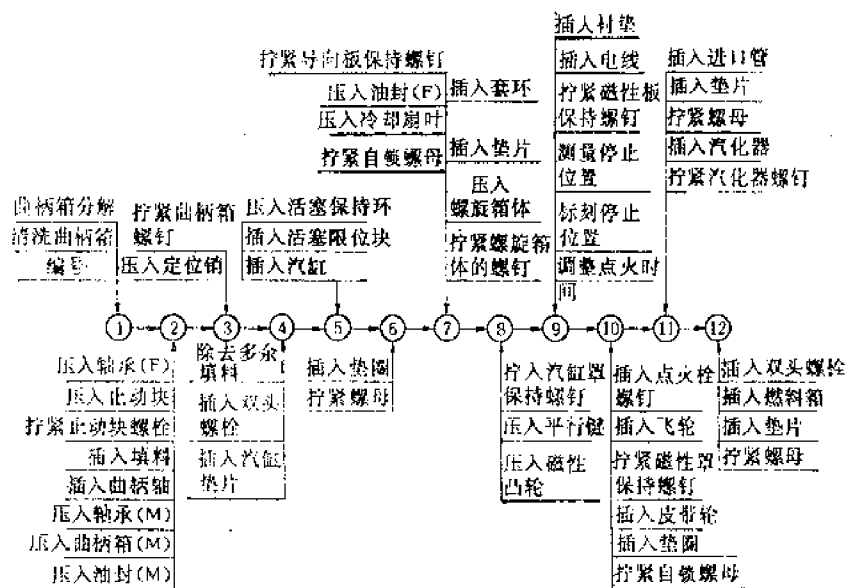
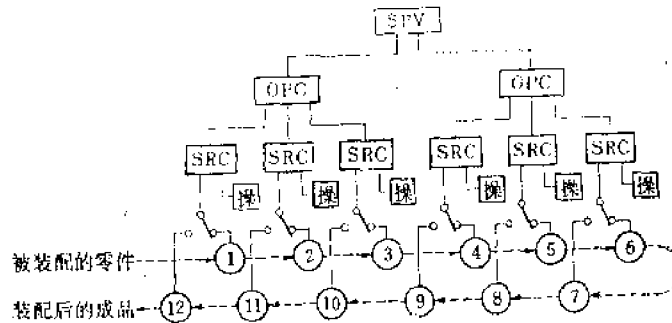


图 7.23 装配作业的工序

- (a) 进行装配作业的1个或2个机器人；
- (b) 进行机器人辅助作业的专用作业机械；
- (c) 各种零部件的送料器；
- (d) 实现装配件定位机能的一个工作台；
- (e) 相应于装配件形状的机器人用的各种手；
- (f) 机器人使用的若干种自动供给式螺丝拧紧工具；
- (g) 机器人使用的装配作业辅助用的各种夹具；
- (h) 事先保管上述的手、工具、夹具等的一台工具中心；
- (i) 为确认零部件供给状态、装配状态的各种状态信息用的传感器。另外，各工作

台之间由输送台进行联络。

(2) 系统的构成 本系统为计算机控制的在线实时系统。系统的构成如图 7.24 所示。



SPV: 监控计算机; OPC: 操作控制器; SRC: 机器人控制系统; 操: 操作台

图 7.24 系统的构成

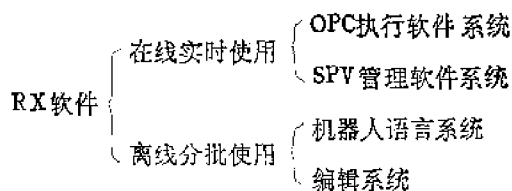
(a) 监控计算机 进行全系统的统辖管理, 判断来自各操作控制器来的信息, 给予指令, 同时进行异常状态的处理、数据处理。

(b) 操作控制器 控制 4~5 台机器人和它们周围的机器, 控制传感器, 判断来自各工作台的信息, 输送适当指令。

(c) 系统机器人控制器 根据来自操作控制器的指令, 直接控制工作台内的各机器及传感器等。

7.6.4 系统的软件

系统的灵活性(柔软性)可以说是取决于系统的软件如何。本系统的软件组成如下:



特别是, 这种软件系统为了对应于多机种、容易编制软件新开发了叫做机器人语(robotlan)的语言系统, 其流程图如图 7.25 所示。这种机器人语, 是事先把工作台上的机器编组, 把它们的配置关系的信息、装配的零部件的信息、作业各要素的信息、控制装置和它们之间信号接受的信息等建立起数据库, 并用专门语言书写作业的顺序, 是能编制出作业的执行程序的、机器人专用的语言系统。

FMS 在基本的计划、设计阶段要花费很多的时间, 限于篇幅, 对其整体介绍是不可能的, 这里只是极其概要的叙述而已。在 FMS 中的重点是概念设计、系统设计, 而使用机器人的系统, 也就是说不是 FMS, 说到底所起的作用仅仅作为 FMS 的构成要素之一而已。由机器人、传感器、输送供给装置、自动仓库、计算机等硬件, 以及生产管理、生产技术等软件, 组合起来的系统设计, 可以说是 FMS 的关键。

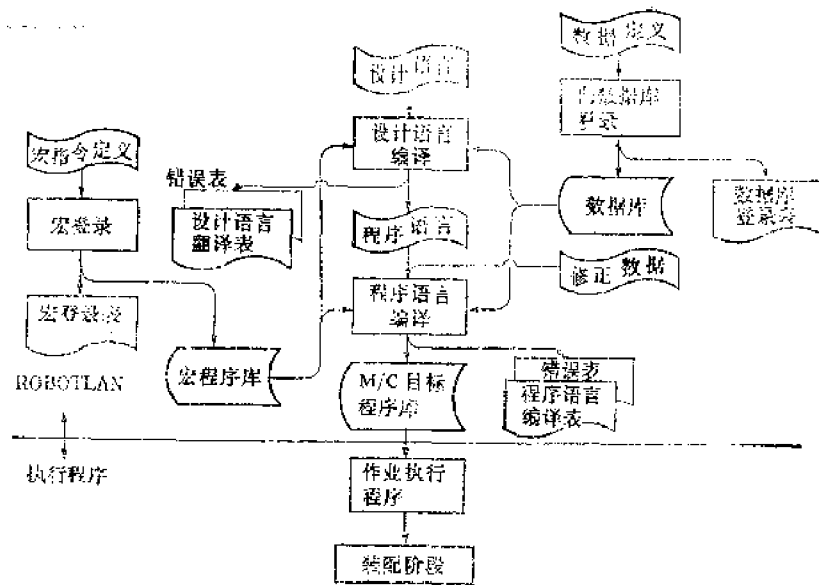


图 7.25 机器人语系统的处理流程

7.7 结 束 语

这里，对生产工程中的工业机器人的实用技术，从概念上的到具体的，以机器人为主体的或以系统为主体的等等各种不同的角度作了介绍，但这些不过是机器人适用技术的极小的一部分。例如，举点焊作业为例，要全部地介绍它的适用技术，就需要写一册书那么多的页数。机器人的适应技术如此广泛，可以说我们叙述的难免挂一漏万。但是，我认为生产工程中的使用机器人的必要性，在今后会越来越增加，机器人会越来越普及。为此，机器人自身必须高性能化或智能化，但比这更重要的是适用技术的进步，如在计算机方面，这是指应用软件的性质的进步。

参 考 文 献

- (1) Soveriano, J.W.: "An interview with Joseph Engelberger", Robotics Age, pp. 10-33 (Jan.-Feb. 1983).
- (2) Akeel, H.A.: "Expanding the capabilities of spray painting robots", Robotics Today, pp. 50-53 (April 1983).
- (3) 菅原 隆: "ロボット活用による効率化", 日本機械学会関西支部第88回講習会教材, pp. 55-65 (昭55-07).
- (4) Stauffer, R.N.: "Westinghouse advances the art of assembly", Robotics Today, pp. 32-36 (Feb. 1983).

第8章 核能领域中的机器人技术

8.1 适合用机器人的对象设施

用于核能领域的机器人与在一般的机械工业等领域中机器人不同，不是把省力做目的的。这是它的特征。它的目的是在有放射线的场所中，高效而安全的进行机器、装置的检查、保全等多种作业，以及处理含有放射性物质的作业。

当然，需要在以下方面加以注意：相应于引入的设施和作业内容，要讨论机器人性能等，进而要制定与放射线安全有关的规则、技术基准等。

从适用机器人的观点出发，核能各设施的分类如图8.1所示。以下顺次地把这些设施的特征、已经引入机器人的或准备将来引入机器人的作业的特征加以叙述。

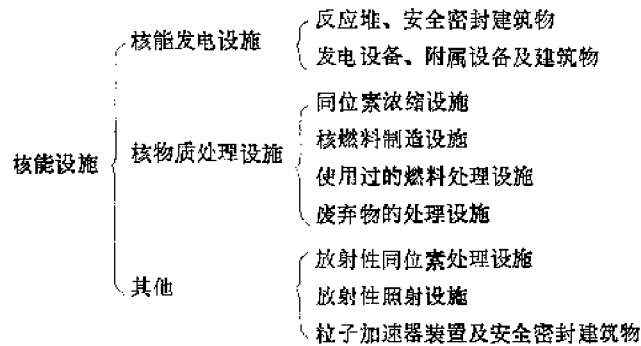


图 8.1 核能设施的分类

8.1.1 核能发电设施

利用核能发电，是根据作为发热源的核能反应堆的形式给设施命名的。核能反应堆形式的分类如图8.2所示。在日本，核能发电站是以开发轻水反应堆为中心而进行的。现在正在运转中的反应堆有24座（其中轻水反应堆23座）具有1718万kW的发电容量，占全部发电设备的12.3%，占全部电力供给量的19.5%，还要加上正在建设中的、准备开工的44座，约有3600万kW，今后计划还要切实地增加其占电力供给的比例。

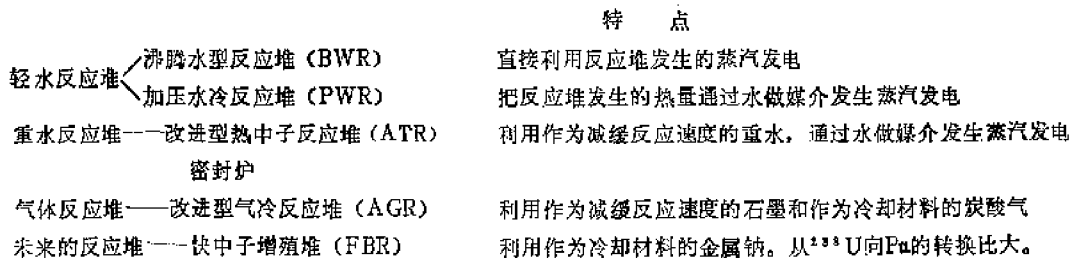


图 8.2 主要发电用的核能反应堆

这些不断增加着的核能发电设施的开发、改良的目标是降低对发电站工作人员的辐

表 8.1 BWR中需要引进的机器人举例

作业类型	具 体 作 业
检 查	使用中的检查 燃料检查 控制棒驱动装置的检查 (CRD)
检验, 监视	设备, 装置状态的检验和监视
清除污染	除去重屏蔽容器的污染 除去池、井等污染 除去地面, 壁面的污染 停炉准备
分解, 装配	CRD的分解, 装配 取下反应堆密封容器和反应堆压力壳的封盖的作业 主蒸汽隔离阀 再循环泵 污水泵
运 送	燃料交换机 搬运泄放罐
解 体	废反应堆

表 8.2 原子能领域中的机器人技术的分类

技术分类	内 容	
传输技术	传输距离	~数百米
	信号的种类	模拟信号/数字信号
	方式	有线/无线
	其他	双方向, 多重化
操作技术	处理重量	~数百公斤
	自由度	~6个或6个以上
传感技术	接近传感器、倾斜计、位置检测仪	
行定技术	平地或非平地(跨越障碍物、上下台阶), 空间(轨道式)	
人机对话接口	除去误操作, 误判断良好的操作性能	

射，提高工厂的开工率以及确保公众安全。为了使这种核能发电技术稳定化，重要的是积极应用以前积累的运转、修补经验，并加以以机电技术、光通讯等传输技术、微电子技术等尖端技术等。

在核能设施中，因为存在被放射化的物质，或含有放射性的物质，从这一点出发，人们很早就讨论过远距离操作、自动化（机器人化）。这里引进机器人的特征是能自动远距离的处理长尺寸、大重量、大体积的物体，能进行复杂的作业，能在大范围地进行多种类的检测、监视。讨论核能发电设施中能否机器人化，我们以沸水型反应堆（BWR）为例，其分类见表8.1。进行表中作业的机器人所必要的技术涉及到很多领域，代表性的技术领域的分类见表8.2。

8.1.2 核物质处理设施

核物质处理设施，如图8.1所示，大体可分为四类。这些设施与核能发电站的情况一样，把在放射线环境下的作业，对核物质的处理作为对象。以下分别叙述各设施的特点：

(1) 同位素分离浓缩设施（铀浓缩工厂） 铀的同位素分离法中有气体扩散法，离心分离法、激光分离法、化学交换法等。在日本，达到实用阶段的是离心分离法。在这种工厂中，作为核燃料物质的铀，以六氟化铀的形式进行分离、工厂已广泛地进行着自动化的操作。虽然人们也考虑到在加入原料、搬运产品、维修装置等方面都需要引入机器人，但现在尚无实例。

(2) 核燃料制造设施 在核燃料制造设施中，进行着这样的作业：把浓缩铀的 UO_2 的粉末挤压、烧结、研磨成弹丸形，填充在泽卡洛伊锆铪合金等制成的管内（被覆管），作成燃烧棒以后将若干根组合起来，装配成燃料集合体。这一套制造工序（加工、装配、检查、除去污染等）在很大范围内已经自动化。

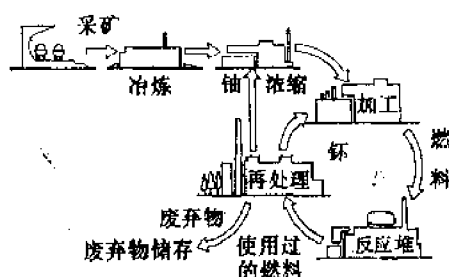


图 8.3 燃料的循环

(3) 处理使用过的燃料的设施 在核电站燃烧过的使用完的燃料可进行再处理，把可以再次作核燃料而加以利用的部分回收。从有效地利用核燃料这种燃料循环的观点来看（图8.3为示意图），核燃料再处理设施是很必要的。在日本，在动力堆、核燃料开发事业团的东海事业所内，目前，每天能处理0.7t的设施正在运转中，不久的将来，

每天能处理6t的第二处理工厂，目前正在计划中。

再处理工厂的主要流程如图8.4所示。我们可以认为它是一种化学工厂，在工厂中把使用过的燃料剪断、溶解、分离、精制、转换。这种处理工程很复杂，特别是在核燃料物质与硝酸等强酸共存这一点上，环境条件比核能发电设施更加苛刻。因而，对远距离自动化（机器人化）的要求很强烈。特别，为了工厂能顺利的运转，许多作业不得不进行远距离自动进行，包括检验、测量、监视、运送、维修等。这些远距离操作的机器人和机能汇集在表8.3中。在再处理设施中，引入机器人的明显例子，是处理隔离单元内的燃料物质的带有双侧伺服的主-从型机械手。另外，人们正在研制检查用机器人，用它来检查人不能接近的对象，如放入核燃料，注入强酸的溶解槽等。

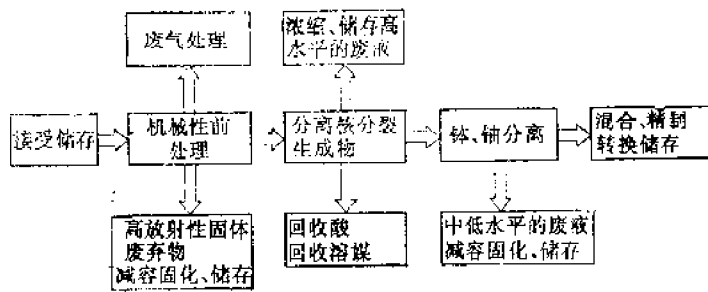


图 8.4 再处理的主要工序流程

表 8.3 远距离操作机能和机器

操 作 机 能	使用 机 器	
固 体	提升, 悬挂 运送 除去污染 分解, 装配 切断, 剪断 夹持 移动 综合操作	起重机 起重机, 传送带 除去污染装置 机械手, 分解, 装配专用机 切断机, 剪断机 机械手, 夹持专用机 起重机, 移动专用机 智能机器人
液 体	运送 (包括粉体) 搅拌 分离	泵 脉动涡流 澄清器
共 同	检查 测量 监视	电视摄像机, 潜望镜, 超声波探 伤装置 放射线测量, 长度仪, 重量仪, 采样装置 电视摄像机, 雷达

(4) 废弃物处理、处置设施 放射性废弃物是由核能发电设施、再处理设施等产生的。其形态有气体、液体、固体三种。固体废弃物的种类和形状各种各样, 与气体、液体比, 较难于自动化处理。然而, 从处理放射性物质这件事出发, 无论是用在再处理工厂的, 还是我们正在讨论的, 机器人技术共同点很多。

废弃物的处置, 一般是浓缩, 减小体积后固化收容在鼓状罐中储藏。储存时间根据废弃物的半衰期不同而不同, 也有需要半永久性保管的东西。在这个领域中引入的机器人, 用来运送有相当重量的鼓状罐、安置它们以及检查储存时间长的东西的保管状态, 人们正在探讨有关的实用化的问题。

8.1.3 其他

包含在其他分类中的设施有①放射性同位素处理设施，②放射性照射设施，③粒子加速器及密封存储器等。这些设施与在8.1.1节和8.1.2节中所述的一样，是放射性环境中的作业作为对象，很早就开始引入机器人了。Co-60，Cs-137等照射设施中，放射线量率，最大可达 10^7 R/h左右，与核能工厂和再处理工厂中放射线量率比是高量率的，在这些设施中使用的保全用机器人，设计时必须考虑到它的电器的零部件的耐放射性。还有，在粒子加速装置中的设施保全机器人，可以说也有大致相同的要求。

8.2 远距离操作的控制技术

8.2.1 对控制系统的要求

为了操作或操纵在核能领域使用的机器人所用的控制技术中，特别需要考虑如下几点。

(1) **故障保护** 在机器人发生故障时，为了不使在工厂中使用的机器性能受损失，人们提出了故障保护的方案。当机器人发生异常的情况下，考虑到用附加的多重连锁系统的机能，就可以防止机器性能受损失。连锁系统，在别的领域中也曾提起过这种方案，往往是用软件和硬件结合的方法来解决问题的。

(2) **机器人的作业、操作的可靠性** 在核能领域中使用的机器、装置被严格地按零件水平管理着，要尽可能的避免在用机械手进行远距离操作时的误操作（落下、冲突）。在这方面，能把被操作一方的感觉反馈给运转人员、操作人员的所谓双向伺服方式是极其有效的方法。利用这种方法，特别是在再生处理设施中处理核物质的以及装置保全用的机械手上，各国在开发方面正处于竞争状态中。

(3) **远距离操作** 在核能的种种设施中作业时，存在放射线的场所和操作人员进行运转的房间通常是被隔离的，因而，存在远距离作业缺乏临场感，操作性能差的问题。在这方面，为了切实的进行有临场感的远距离操作，人们研究开发了把现场的信息（图像、声音、放射线水平）传送到操作室的种种方式。其代表性的方式有用彩色电视监视异常状况、用立体电视监视操作等。从这些传感器得来的信息，必须切实地迅速地传送，要求传送通路和传送装置的可靠性。另一方面，为了切实地操作机器人，各种控制信号的传输也是很重要的。由于这些图像信号、控制信号的传送是在放射线水平很高的现场和操作室之间进行的，一般的控制用的电子元件有受放射线影响而质量劣化、寿命缩短等问题，所以对现场设置的电子仪器，在考虑传送方式和传送速度的基础上进行设计是很重要的。

(4) **维修方便（免修）** 在核能设施中的机器人有可能沾染放射性物质，被放射化，在设计时要十分留意机器人的机构和材料。另外，如果保养维修机器人的作业增加，由于机器人有可能被污染或被放射化，维修时，就存在人被放射线辐射的问题，这样引进机器人的效果就降低了。为此，引入机器人时，必须考虑到使维修、保养的次数减少到最少。这就大大地影响着控制机器人不可缺少的动力供给。也就是说，传送驱动机器人用的能量，可以用流体的压力（水压、油压、气压），也可用电机、内燃机等，但有关这方面

的选择，在设计上也必须充分地考虑到它们的维修、保养方面的性能。

8.2.2 用在核能方面的机器人的有代表性的控制技术

(1) **双侧式结构控制技术** 在核能的各个设施中,为了切实地利用机械手进行作业,必须正确地理解被操作方面的状况。也就是,使操作人员实时地感觉到,如把握物体时的感触,与物体冲突的感觉,是十分重要的。这在利用机械式传递机器人的主-从式机械手方面,可以比较切实的实现。然而,机械式的由于力的传递距离有限制,并且可处理的重量是它自重的10倍左右,使用上制约很多。而使用电气双侧式结构方式的伺服传动机构,与此不同,由于使用距离的制约少,被认为是希望的。然而,作为电气式的问题,有马达、编码器电器零件以及电缆类的放射线损伤问题,是在设计时要留意的事项中的一大项目。

双侧式结构伺服系统,有以下三种基本形:

- (i) 对称形;
- (ii) 力逆送形;
- (iii) 力回归形。

其中,所谓力回归形的优点是能传递感觉,各国正在进行研制用这种方式的机械手。

(2) **操作性能** 远距离操作的方式大致可分为:①直观操作,②电视监视操作,③用大屏幕的电视操作,④立体感监视操作。①是操作者直接目视从动机械手的动作而进行操作的方法,有距离感,操作容易,但缺点是对小的物体操作困难,被阴影隐藏的物体不能处理等。②是将从动机械手的动作拍摄在电视上,根据这种图像进行操作,但要在摄像机安置的位置上下工夫。③是在屏幕上大范围地放映出来,操作人员边看着图像边操作,与②相比能得到临场感,有②同样的问题。④用两台工业电视摄像机,将从动机械手和对象物品的位置关系,立体地拍摄下来,是一边看图像一边操作的方式。为了能同时得到距离感、临场感,各国正在研究靠立体感进行的操作。

(3) **传输技术** 传输大致分为能量传输和信号传输,进一步,信号传输又可分为模拟量传输、数字量传输。能量的传输对机器人来说是极为重要的问题,说选择供给方式是系统设计的一大因素并不过分。作为传动系统的驱动源,可以用流体(油、水、气)或电气,但在使用流体场合,必须有防止泄漏和堵塞的对策,由于它在维修上存在问题,缺点是适应性(柔软性)不强,所以一般多用电(气)为驱动源。在供给电力时,往往采用电缆方式。但是为了解决电源电缆的重量问题和适应性问题,人们正在进行研究开发。作为其中的一个例子,是用触点的集电方式,这是一种有用的方式。

接下来,简单地说明关于信号的传输。信号传输大致分为电通讯和光通讯,各自又有有线和无线之分。电通讯的有线方式中,用同轴电缆等传输,可进行可靠性高的信息传输,但作为机器人的传输方式,适应性极差。由于这样的原因,人们开发了利用上述的供给电源用的导轨的触头进行传输的方式。采用这种方式的机器人的例子以后将加以说明。其次,是无线方式,有由空中电波传输和由漏泄同轴电缆的强耦合式的无线传输。前者,能进行比较高范围的无线传输,但如想得到高信噪比的传输信号,例如要得到像质好的图像,由于电子波的传输与距离和障碍物的配置有依存关系,一般应有高的发射功率。因此,在核能工厂中考虑到电磁波会对其他机器有影响,很少使用。后者,代替天线敷设了

同轴电缆，电波从电缆中一点一点地漏泄出来，以这种方式，可以使得发射的输出功率极低，人们研制了把图像和声音的模拟信号和数字信号用频率分割法或时间分割法进行传输的系统。光通讯也和电通讯一样，有无线方式和有线方式两类。有线方式是用光纤的方式，与电线比较，它的优点：小型、轻量、许容半径小、传输损失少、能进行高速通讯、宽频带通讯和大容量通讯等。无线方式是用空间传输的方式，与无线电波比较，可进行高速通讯，特长是设备容易迁移，但也有因障碍物遮断回线以及大范围传输困难等缺点。然而，由于它没有电磁波所引起的问题，随着今后研究开发的进步，我认为会逐步地推广使用的。

用接触集电方式的机器人的例子，可举图8.5所示的单轨道式检查机器人，图中所示是机器人的结构框图。在单轨内布设了3根集电用轨道进行能量传输和信号传输。电源为直流24V，用来做走行车驱动电动机的电源以及车上放置的电子仪器的电源。本方式由触头供给能量，可稳定地供电。另外，共用供给电源的导轨进行信号传输，以频移键控(Frequency Shift Keying)方式进行双向多重传输。传输频率使用250kHz和380kHz，以2700位/秒(BPS)的速度进行传输。传送量，向走行车方面，用数字方式传输5帧，每帧16比特(bit)；向光标方面传输7帧，每帧24比特(bit)，为非同步的双向传输。另外走行车的停止点的检测和起动、停止指令用光传输的脉冲编码调制(PCM)方式进行。

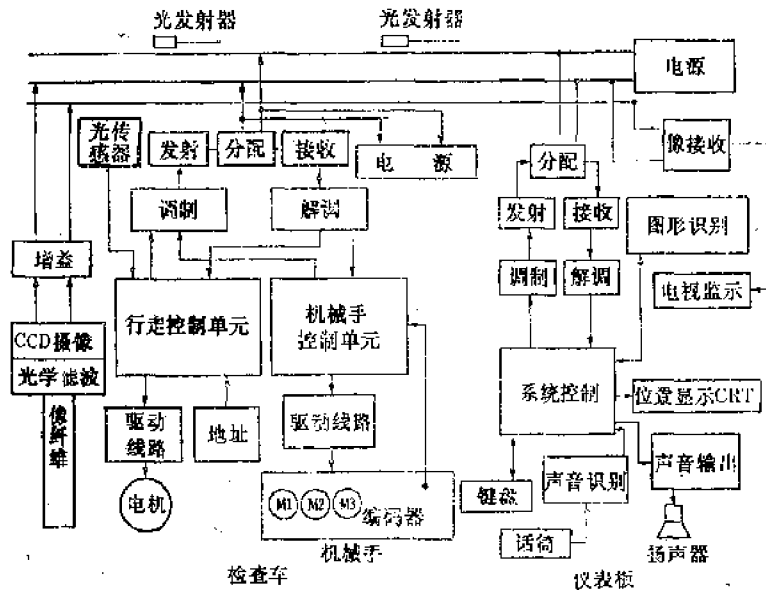


图 8.5 检查机器人的结构框图

(4) 可靠性 在工业机器人的故障中，有机器人本体的故障或劣化，有控制装置的故障。而故障的原因80%是控制装置的毛病。作为减少这种故障的对策，应考虑：①减少焊接、搭接、接头等连接的零件数。这是最有效的方法，也有利用定做的大规模集成电路来削减零件数而取得好效果的例子。②使其在性能方更留用余地的使用方法。③摘除初期故障零件，也可由老化实验和温度循环实验改善它们。④选择可靠性高的零件。

在核能工厂那样的放射线气氛中使用的电子零件，几乎都要受到损伤致使性能劣化、寿命缩短。由于这个原因，选择零件是提高机器人可靠性的很重要的因素。图8.6(1)所示为电子零件的耐放射性，图中按损伤程度，分为轻微、中等和强度三个区域。另外，图8.7、图8.8所示为零件水平的实验结果。由以上可知在选择零件上花费时间精力成了实现

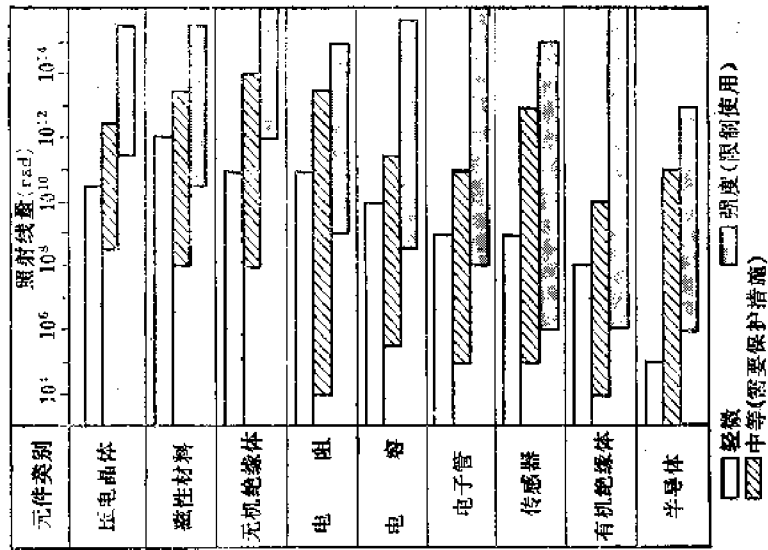


图 8.6 电子零件的耐放射性

品名	规格	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴
电阻	金属电阻 金属膜电阻 绕膜电阻 光度计金属陶瓷	Light	Light	Light	Light
电容	陶瓷 云母 聚脂电容 聚丙烯电容 MKI 铝电解电容 铝电容器	Light	Light	Light	Light
二极管	硅整流管 硅整流管(通用) 硅整流管(通用) 硅整流管子 硅齐纳管 硅稳压管	Light	Light	Light	Light
三极管	硅 NPN PNP PNP FETN场效应管 FETN场效应管 F场效应管 MOSFETP场效应管 N场效应管	Light	Light	Light	Light
IC	TTL 触发器 计数器 触发电路 门 触发器 放大器 (rad. res.) OP放大器 OP放大器 (FET INP/T) (gen. purp.) 比较器 D-A变换器	Light	Light	Light	Light

图 8.7 电子零件构成要素的耐放射性 (1)

	品名	型号	照射剂量(rad)			
			10 ²	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁸
润滑油	石蜡族烃	LP-80	///	///	///	///
	环烷族烃	LP-350	///	///	///	///
		N-350	///	///	///	///
		N-500	///	///	///	///
	醇族	PAO	///	///	///	///
		DOS	///	///	///	///
		DOA	///	///	///	///
	酯族	PET	///	///	///	///
		TCP	///	///	///	///
		TOP	///	///	///	///
	聚醚族 硅族 氟族	PPG	///	///	///	///
		DMSi	///	///	///	///
		PCTTE	///	///	///	///
		TFPM	///	///	///	///
		PFPE	///	///	///	///
材料	丙烯酸类橡胶	(浸透玻璃)	///	///	///	///
	天然橡胶		///	///	///	///
	硅橡胶		///	///	///	///
	聚氨酯类橡胶		///	///	///	///
	聚羧基类橡胶		///	///	///	///
	氟乙烯		///	///	///	///
	聚乙炔		///	///	///	///
	聚四氯乙烯 TTE		///	///	///	///
	聚酰胺		///	///	///	///
	聚脂		///	///	///	///
硅	///	///	///	///		
透像管	光导摄像管		///	///	///	///
	彩色摄像管		///	///	///	///
	光纤		///	///	///	///

图 8.8 电子零部件构成要素的耐放射性 (2)

机器人高可靠性的关键。

8.3 核能发电站用的机器人

8.3.1 实用化的核能发电站用的机器人

目前，在核能发电站使用的机器人，多数用于重要机器装置的检查、保养。人们研制这些机器人，不仅为了正确地进行检查、保养等作业，而且为了减少对操作人员的辐射。下面依次介绍有代表性的装置。

(1) BWR (沸腾水式反应堆) 燃料自动交换机 (2) BWR的燃料是把图8.9所示的浓缩的铀丸，收放在长4m的护套内，然后把它们集中在一起，作为燃料的集合体，装入反应堆的堆心(图8.10)。每隔一定期间要变更已装入燃料的位置，以提高铀的燃烧效率，并且把已充分燃烧的燃料集合体与新的燃料集合体进行交换。这些作业都在定期检查时完成。为了冷却使用过的燃料，并且遮避放射线，这种燃料交换的作业在水中进行。从作业人员到被处理的燃料集合体之间的距离约为17~18m，过去是一边目视一边手动地进行的。但是在上述的距离下操作，要求作业人员相当熟练，而且我们可以设想

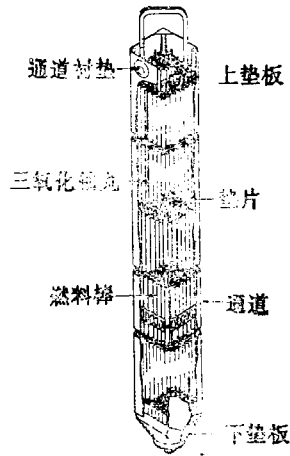


图 8.9 燃料集合体

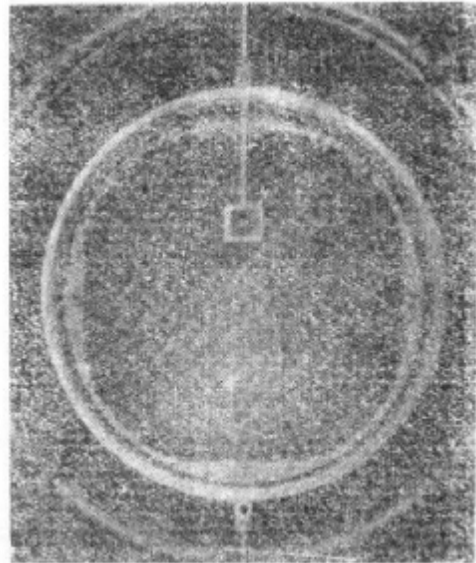


图 8.10 堆心

到会产生误操作。另一方面，为了尽可能缩短距离靠近操作，作业人员又难免受到辐射，为此，人们研制了燃料自动交换装置。

(i) 系统的概要 燃料自动交换机的主要结构如图8.11所示。交换机是由轻型桥式台车和视野好的横向吊车、圆筒式伸缩立柱和燃料夹头以及运转它们的操作台组成。这些装置的特征：①可以在远离的操作室中进行全自动运转，②用可控硅伦纳德式控制去控制电动机并高速运转，③用精密的多重圆筒立柱提高定位精度，④用计算机控制，防止误操作等。

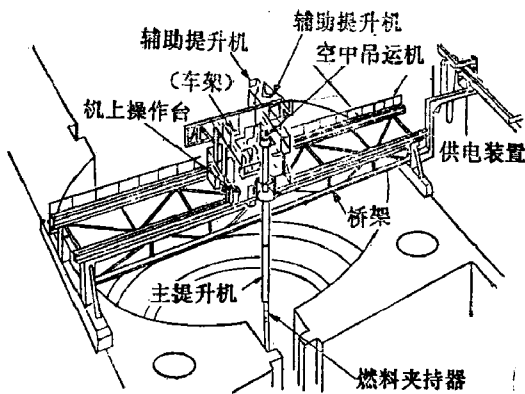


图 8.11 燃料自动交换机

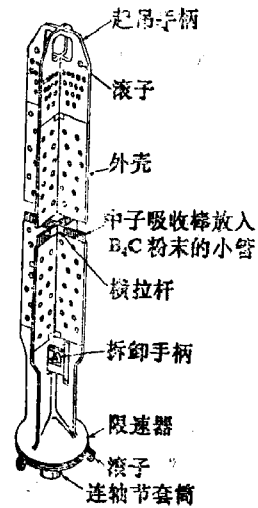


图 8.12 控制棒

(ii) 运转方式 在这种燃料自动交换机上，由于灵活地运用了计算机系统，有自动运转模式、运转人员根据指令进行操作的半自动运转模式、手动模式三种，运转人员可相应于不同情况，选择不同的模式。

(iii) 自动化的效果 这种交换机已经在核能发电站使用了。与过去的情况比较，大大地提高了效率，作业时间约为过去的2/3，运转人员削减一半，同时降低了对作业人员的辐射。由于引入计算机实现了自动化，减轻了负担的运转人员可以充分地监视燃料的交换

作业，有可能提高作业的安全性。

(2) BWR控制棒的驱动机构(CRD)自动交换机 (3) BWR的热输出是由控制棒控制的，控制棒设置在反应堆内的燃料集合体邻接处，它的结构如图8.12所示。这种控制棒由水压驱动系统驱动。控制棒不仅可调整反应堆功率，也可以作为紧急停止反应装置而使用，因此人们十分重视对它的检查和保养。过去，检查、保养等作业基本上靠人工。在沸腾水式反应堆(BWR)的情况下，以上控制棒驱动机构的交换作业是在反应堆下面的支座内部的狭窄的地方进行的，是相当难受的作业。因此为了提高效率、缩短定期检查时间、提高作业安全性，人们研制了交换机(图8.13)。由于它能远距离地进行作业，减小了对作业人员的辐射，并且由于计算机的帮助提高了作业的效率。具体的说，交换机进行交换作业所用的时间是过去所用时间的75~80%，作业人员减少了70~80%，效果非常好。

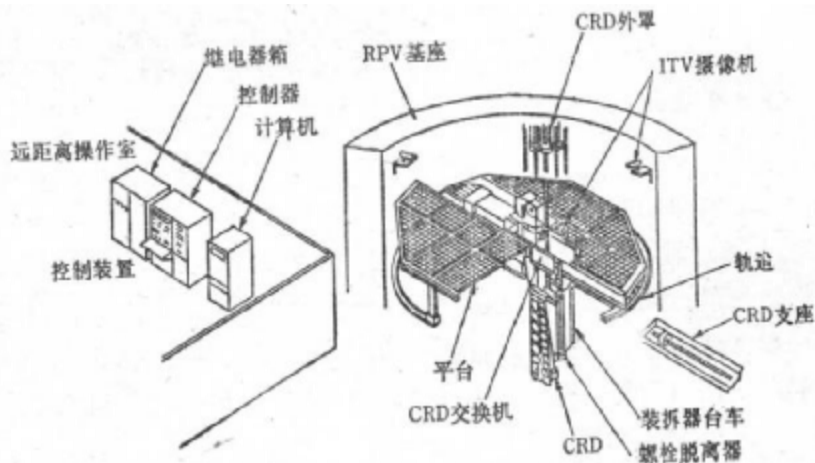


图 8.13 CRD 自动交换机

(3) ISI (在线检查式) 自动超声波探伤装置⁽⁴⁾ 作为定期检查中的一个环节，对运转中的反应堆，在运转中必须接受以无损检查为主的在线检查(如超声波探伤等)。过去的在线检查作业是由操作人员通过反应堆压力壳的主焊接线窥视，并进行所谓的手探伤，即用手去移动探伤头的，这需要的劳力和时间都很多，并存在着操作人员被辐射的问题。因此，人们研制了自动化系统。这个系统的基本组成：①超声波探测头，②

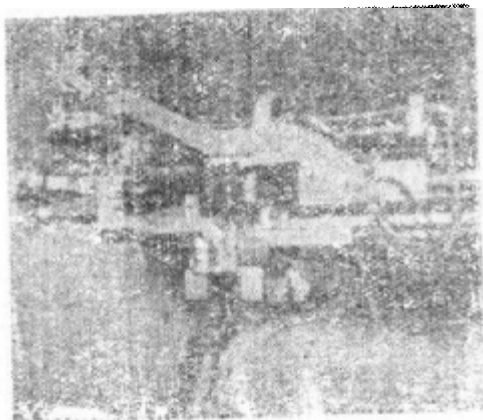


图 8.14 探测头驱动装置

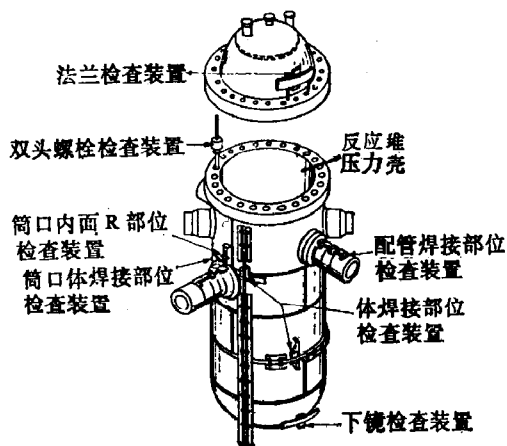


图 8.15 BWR反应堆压力壳用的在线检查装置

探测头的驱动装置, ③超声波探伤仪, ④控制装置, ⑤数据处理装置。

超声波探测头是电激励压电晶体, 使之发射数兆赫的超声波, 另外, 用同一元件接受超声波。把它装在图8.14所示的探测头的驱动装置上, 对待查的部位进行探伤。图8.15所示为BWR反应堆压力壳中待查部位以及各种驱动装置的配置。在远离现场处设置了计算机系统(图8.16), 它自动地远距离操作驱动装置, 同时处理、记录超声波信号。引入这一套系统, 希望对检查人员的辐射量降低为20~50%

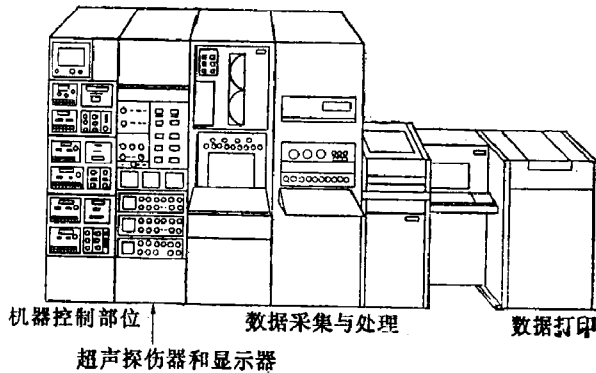


图 8.16 在线检查用的电子计算机系统

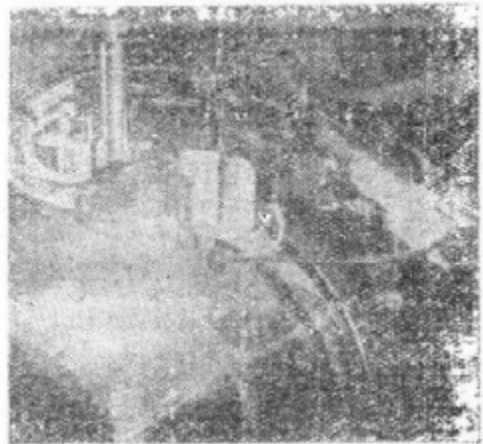


图 8.17 配管自动焊接机器人

(4) PWR (加压水冷反应堆) 蒸汽发生器检查用机器人⁽⁶⁾ PWR和BWR比, 从反应堆向蒸汽轮机送热的方式不同。也就是, BWR在反应堆内发生蒸汽, 而PWR则通过蒸汽发生器发生蒸汽, 然后把蒸汽送往蒸汽轮机。这种蒸汽发生器, 对于PWR来说是重要的机器, 必须严格地进行检查、保养。过去进行这种作业的情况: 人从蒸汽发生器容器下部进去, 插入检查用的涡流探头, 并使其移动, 虽然依靠人工, 但从减少被辐射的观点上, 已向自动化进了一步。现在, 人们引入由探头的插入机构、移动机构、保持机构所组成的检查机器人。

(5) 配管自动焊接机器人⁽⁶⁾ 人们研制出了一种机器人, 让它对有放射线的场所的配管和被放射线污染过的配管进行焊接, 其中一部已被引入工厂进行维修保养作业。这种自动焊接机器人可用来设置导向管和焊接装置, 并可按照不同的焊接姿势事先设定条件。它的作用也是减少被辐射量(图8.17)。

8.3.2 开发中的机器人

(1) 基本技术要素 开发核能用机器人所必须的技术要素, 分移动技术、接近与夹持技术、视觉技术、控制技术等。在这些技术要素中我们介绍几个核能发电站用的特殊的技术。

(i) 移动技术 为了在核能发电站内移动, 进行所需要的作业, 必须有适当的移动机构, 这种移动机构, 大致可分为轨道式和非轨道式。

轨道式的问题: 移动的范围受到制约, 并必须作为建筑物的一部分, 但从其切实性的意义上来说, 轨道式不需要特殊的控制, 是最可靠的方式。可根据该场合下移动物体的大小, 道路的长度等决定使用单轨、多轨等, 人们正研制在这些轨道上用的机器人。

另一方面, 非轨道式的优点: 可自由地选择目的地, 在建筑物上不需要做过多的工作等。人们正研制各种形式的这种机构。特别在核能发电站中, 为了防备斯利玛依尔岛核能

发电站事故那样的万一情况，人们更加重视研制自由的运动机构。作为例子，图8.18⁽⁷⁾

所示的移动车正在研制中。这种移动车，利用四轮履带能在凹凸不平的工厂内道路上行走，能在45°左右的阶梯上升降，所以是有希望实用化的移动机构之一。

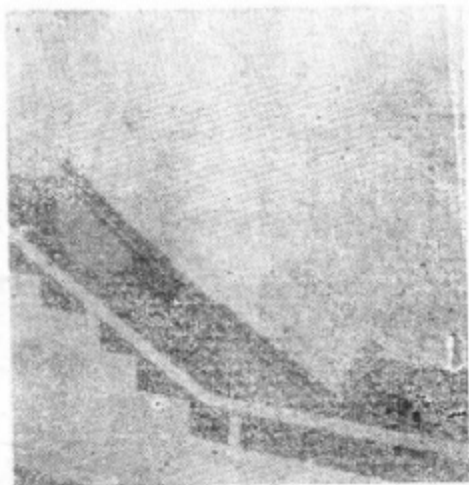


图 8.18 四轮履带车

另外，还有多种用车轮移动的机构，在平地上行走的移动机构已在各企业中的工厂自动化方面起了作用，但在核能发电工厂，需要跨越障碍物，人们正研究解决这个问题

的方法。其次，在移动机构中引人注目的是利用与人类一样的脚的机器人。5只脚的机器人⁽⁸⁾的机能开发已结束，正努力向实用化的方向前进。

(ii) 接近与夹持机构 在核能发电工厂作业，上述的移动机能以及移动后接近作业对象的机能都是必要的。作为这种接近技术的有以前讲过的多关节机械手，为了适应各种目的，人们正在研制它们（如检查作业、轻作业）。特别是，最近，相继开发了具有比人类手臂关节更多的，自由度非常多的，可谓的自在的多关节的手臂（图8.19）。

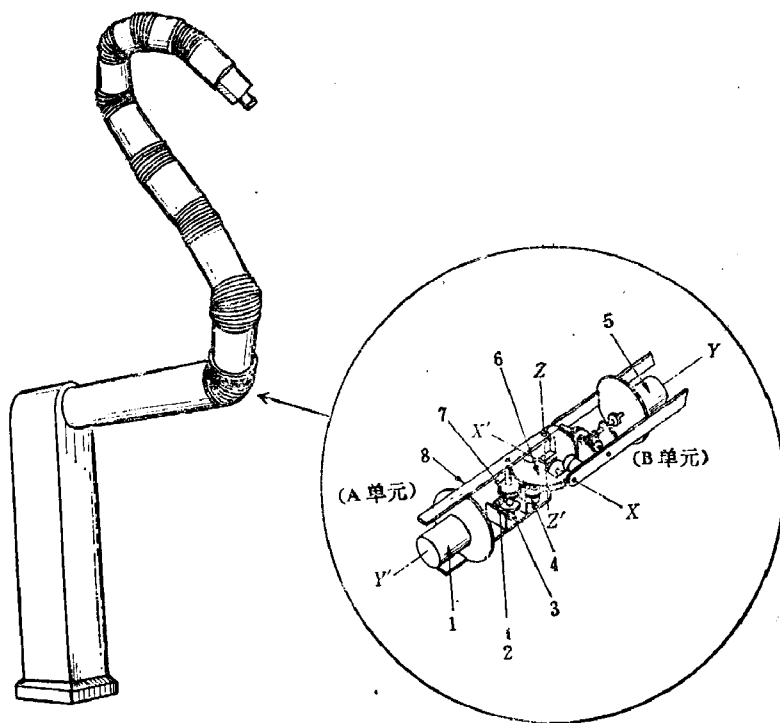


图 8.19 自在多关节的手臂

1—电动机M；2—蜗轮；3—轮子；4—电位计；5—电动机M'；6—半月齿轮；7—驱动齿轮；8—框架。

(iii) 视觉技术 为了使机器人移动必须有眼，而眼的研制，在非轨道式机器人的诱导方式中，是引人注目的技术，但作为核能发电站中眼的技术，和8.2节所述的一样，特征只是有前端的电视摄像机，并可传输图像信号，与其他领域中的没有差别。

(iv) 控制技术 已在8.2节中介绍过了,核能发电站特别要求可靠性高的技术,人们正在按照不同的目的,不同的场所,采用以往的开发方向并沿着已被开发的方向前进。

(2) 检修、检查用机器人 在核能发电站用的,正在开发中的机器人,用于此目的的很多。以下列举有代表性的机器人。

(i) 单轨式检查机器人⁽¹⁰⁾ 人们研制了机器人,目的是用它代替人进行巡回检查,巡回检查是把核能发电厂的内外目视检查作为中心的。移动方式是轨道式,使用了单轨。检查车沿着单轨自动行走,其行走是由装在检查车内的电动机带动的,它的电源、控制信号、检查信号等均通过设置在单轨中的接触用轨道与检查车内的触头进行传输。

考虑到检查车在狭窄的场所内进行目视检查,为了能接近像纤维内窥镜中得到的像,由在检查车内的彩色电视摄像机变成电信号,把这个信号多重化,通过上述的轨道送往操作室。在那里通过电视监视器可监视图像,由计算机按预先设定的机器人行走的目的地、操作对象等控制机器人,也可以由操作人员用声音进行远距离操作。另外,当目视检查对象发生显著变化时,希望能通过处理电视摄像机的图像信号,使操作人员了解异常状况而求得智能化(图8.20)。

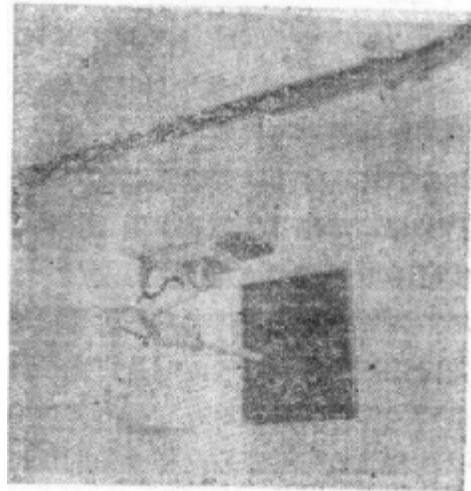


图 6.20 单轨式检查用机器人

(ii) 储藏容器内的自动检查系统⁽¹¹⁾

它是检查BWR和PWR发电站的储藏容器内的主要机器,人们开发了单轨式和台面行走式的两种系统。人们把能在储藏容器内使用作为前提,则研制它的条件如下:环境条件为温度70°C,湿度90~100%,1年间的合计放射线剂量 10^8 R。还有,考虑到储藏容器内非常狭窄,作为行走的条件,设定的道路应使人能通过。下面,分别说明这两种方式。

(a) 单轨行走方式 与上述的单轨式检查机器人一样,在储藏容器内事先铺设单轨,用链驱动检查车沿单轨移动。这种检查车是多量联接的,是由搭载了检查用的检测器和电视摄像机的检查车、搭载了信号传输和控制用装置的通讯控制车、给以上车辆供给电源的电源车以及搭载了检查用的机械手的车辆所组成。这种机器人选用这么多车辆联接方式的理由,是由于需要尽量地缩小机器人的截面积,使其能通过如上所述的非常狭窄的储藏容器。

(b) 台面行走方式 人们正在研制能在储藏容器内的铁制格子台面上行走的机器人。假设它能在储藏容器内的多层板面间移动,则它应可以上下45°台阶。一种四轮履带车模型,被人们确认有所需要的性能(图8.18)。这种模型,四个履带各有各的驱动电动机,前轮和汽车的操舵机构一样能够控制转向,电源来自电池。另外,为了在台阶上行走稳定,车体具有伸缩机构。

把这种行走车的模型放大并制成实机,装载上检查用的检测器和为使电视摄像机接近对象的多关节臂形机构,另外装载上传输行走控制和臂控制的信号的传输装置,就可实现储藏器内自动检查系统的台面行走方式。

(iii) 作业用机器人⁽¹²⁾ 作为正在开发的在核能发电站内进行保养作业的机器人的

例子，我们将说明装配了作业用机械手的移动机器人。虽然它与移动机器人有部分不同，但其基本的结构要素是机械手和远距离操作用的立体电视摄像机。操作人员远距离地进行控制或者自动的使移动机器人接近作业对象，然后，操作人员边看着立体电视的画面边操作作业的对象，如阀等。而且，关于移动机器人，在8.3.2节(1)移动技术方面所叙述画面行走车比较适用，例子也有不少。这种作业用的机器人，有适用于各种作业的，引入这种机器人，希望能减少对作业人员的辐射，提高作业效率。

(iv) 自动检查用机器人⁽¹³⁾ 人们不断地开发出自动检查用机器人，有把前面所说的ISI用自动超声波探伤装置的适用范围扩大的曲管焊接处自动超声探伤装置；有从上述的CRD自动交换机上取下CRD；在定期检查时，对CRD自动分解和检查的装置。还有，同样用上述的BWR燃料自动交换机，从反应堆炉心中取出燃料集合体，在定期检查时，和CRD一样进行检查用的装置以及在PWR用蒸汽发生器内的清除污染装置等，预计在不久的将来，这些装置可供实用。

曲管焊接处自动超声波探伤装置，正如其名，是在曲管为连续焊接配管时，使用的超声探伤装置，其机器的结构和前面说的ISI装置大体相同。

CRD自动分解检查装置是这样的一种装置：它使现在靠作业人员人工作业的CRD分解、洗净和检查作业可以自动地远距离地操作，它降低对作业人员的辐射，提高了可靠性，同时缩短了作业时间。它是由水中作业的机械手、搬运CRD的机构：如分解用装置以及分解后的零件的目视检查装置和控制它们的装置等组成。

燃料自动检查装置是这样一种装置：它和分解CRD一样，把熟练作业的人员所进行的人工分解燃料集合体的作业，用各种专用装置自动进行，而且把分解后的燃料在水中用电视摄像机进行目视检查。

为在PWR蒸汽发生器内进行检查，检查前由作业人员进行去污染作业。这种作业在狭窄的水室内进行，所以作业效率很低，往往会被放射线辐射。为了谋求提高去污染作业的效率，人们正在研制由机械手启动的去污染水喷嘴的机构和去污染后排出液体的处理装置所构成的检查准备用机器人。

参 考 文 献

- (1) Battisti, S., et al.: "Radiation Damage to Electronic Components", Nuclear Instruments and Methods, 136, pp. 451-472 (1976).
- (2) 竹原 健, ほか: "燃料自動交換機", 原子力工業, 27, 10, pp. 9-12 (昭57-10).
- (3) 竹原 健, ほか: "制御棒駆動機構交換機", 同上, pp. 13-16.
- (4) 高尾信吉, ほか: "原子力発電プラントのISI用ロボット", 同上, pp. 17-20.
- (5) 山口富夫, ほか: "原子力発電プラントにおける非破壊検査の現状", 機学誌, 81, 176, pp. 13-19 (昭58-07).
- (6) 島岡允嗣, ほか: "溶接の自動化", 東芝レビュー, 33, 12, pp. 1020-1024 (昭53).
- (7) Heckl, H., et al.: "Crawler Driven Robotic Vehicle with Steering Mechanism for Nuclear Power Plant", pp. 146-149, ANS, (Nov. 1982).
- (8) 尾崎典彦: "原子力プラント用ロボットの開発", 機学誌, 86, 774, pp. 91-97 (昭58-05).
- (9) "「象の鼻」のように動くロボット 17 自由度で原子力施設を点検へ", 日経メカニカル, pp. 57-61 (昭57-12-20).
- (10) Taguchi, J., et al.: "Development of nuclear power plant automated remote patrol system", IFAC (Jan. 1983).
- (11) 竹原 健, ほか: "原子力発電支援システム・格納容器内自動点検システム", 日本原子力学会要旨集 (第Ⅱ分冊), p. 133 (昭58-03).
- (12) 浅井 卓, ほか: "原子力発電所格納容器内作業用移動マニピュレータの開発", 同上, p. 135.
- (13) 大沢敏雄, ほか: "実用発電用原子炉自動検査装置等実証試験", 火力原子力発電, 34, 3, pp. 61-82 (昭58-03).

第9章 援助人类用的机器人技术

如果从广义上考虑，机器人技术都是以帮助人类为目的的。然而本章介绍的机器人技术与生产现场中利用的机器人技术不同，它是给人类直接援助的技术。本章将以第三产业为中心而加以介绍。

这种技术的一个有代表性的例子，是利用科学技术，特别是利用机器人技术对由于患先天性疾病、患慢性病或因意外事故而失去的人类机能、能力进行补偿的取代工程技术。这种技术也被称为控制机理取代 (Cybernetic prosthesis)。关于这方面的知识，将在9.1节运动机能代行系统和9.2节感觉机能代行系统中分别进行说明。

如果说，把人自己身体的一部分置换成机械，使它像是来自自身的一部分一样，按本人的意愿进行控制，那末，可以说人类能力的取代的最终目的是要与控制机理相结合的。与取代不同，另一方面的研究方向是为了得到能听从人的命令，作为忠实奴仆的服侍人的机器人。我们权且把这种研究隶属9.3节医疗福利用机器人。其中，我们将会叙述关于目前正在进行的和今后将要进行的课题。

上述的医疗福利领域，是援助人类的代表性领域。除此以外，由于人类是支撑着现代社会的安全和发展的基石，所以，那种对人类有危险的作业和环境过于苛刻的作业，也是我们不能忘记的问题。例如，在放射线下，高压水下或盛燃的火炎中，用现有的机械技术不能进行工作时或者放弃不干，或者不得不依赖人工作业，这些作业即所谓的极限作业。有关这方面的机器人技术的研究、开发，或者说机器人技术的研究开发是今后重要的技术课题。在9.4节“极限作业机器人”中，作为今后课题的中心，将简略地说明这个问题。

9.1 运动机能的代行系统

9.1.1 人工手足

探索设计机器人的手、脚时，有二种立场，一种立场是把工业机器人的手和车轮式移动机械看做典型的人工手脚。也就是说，当设计它们时，只是把人类的手脚的动作作为一种机能来参考的，但在实现它们的时候，就不受人类手脚的约束，只是把高效率工作做为主要条件，相应于需要做的作业而进行设计的。因而，外观及其动作的样子与人的手脚有本质的不同。

还有一种立场，是完全模仿人的外观、动作及机能等进行研究的。人类机能的代行系统的研究正是这种立场。它的研究目标是用机械来补偿失去的上肢、下肢的机能，并可以像自身的手脚一样地控制它们。也就是说，残疾人最希望的决不是成为一个有机械机构的怪人，而是作为社会的一员，希望与其他人看不出区别来。异样的形状、奇怪的动作、异常的声音等是最忌讳的、最令人讨厌的。这一点，也可以从那种完全没有作业机能的，只是外观极其精巧的仿制的装饰假肢，直到今日仍被广泛欢迎这件事上看起来。

可以认为，这种人工手脚的研究课题分为以下三类⁽¹⁾；

(1) 设计、制造外观和结构都与人充分相似的硬件 为达此目的的重要课题有：研究能够实现上下肢机能的自由度分配以及实现它们的机械机构，研究小型而高性能的传动系统和动力源，开发与人的感觉相当的触觉、力觉的传感器以及研究适合它们的材料等。另外，虽然十分重要，但难以列入工程学的、因而没被研究的问题是装在人体上的接口部分的设计。装在人身上要求没有异物感，并解决出汗时的不快感或解决在寒冷地区的冰冷感等问题，是用套筒式或者用代替它的新的装着方法还有待研究。

(2) 确定能实现人的上下肢动作的控制法 这是如何操作从(1)中得到的硬件的问题，即所谓的软件问题。当然，最终必须按照(1)中的自由度配置、传动系统的种类和结构配置、传感器信号等进行与(1)相匹配的设计。另外，分析人的动作，为了用机械去实现这些动作，也应进一步探索连杆机构控制的一般理论，其中的一部分研究往往和机器人控制理论具有共同的课题。

(3) 向机械传达人的意志或者把来自机械手脚的信息反馈给使用者的所谓人一机信息传递方法的研究 与(1)一样，是人工手脚的特殊的技术领域。特别是从人到机械的指令信号利用肌电流以及从机械反馈到人的信息通道，利用振动刺激、电刺激等引起皮肤感觉等均作为重要的研究课题。

9.1.2 取代上肢的结构及其控制

利用肌电信号等生物电流，去控制人工手的试验，留有记录的最初研究，是第二次世界大战时在德国进行的⁽⁴³⁾。在专利申请中，据说李特(Reiter)考虑过利用小臂残存的肌肉发生的肌电信号去控制被切断小臂的人用的假肢的方法。当时是1945年，只能利用真空管，电力上消耗很大，所以没能成为现实。这个研究成果，战后似乎在苏联恢复了，实际上在1960年的自动控制国际会议上(IFAC)，他们发表并演示了世界上第一个肌肉电流控制的假手⁽⁴³⁾、⁽⁴⁴⁾。同样的研究，奥·利波尔得(O. Lippold)、阿·乃廷卡尔(A. Nightingale)，爱·哈·伯特莱(A. H. Bottomley)等人的英国研究小组也在进行。

在这些研究中，用表面电极检测出小臂的肌电信号，当一侧电极发生超过某一阈值信号时，就以一定速度张开假手的手指，当另一侧电极来的信号超过一定的阈值时，就以一定的速度合拢假手的手指。这样一种简单的方式，不过是利用生物电流代替开关而已，并没有把人和假肢的控制机理相结合。早先，Bottomley利用非线性滤波器处理肌电信号以求提高信噪比，并且不是ON、OFF的开关形式，而是导入了比例控制的概念。

基于尼·威纳尔(N. Wiener)的控制论的考虑方法，真正的生物电控制的上肢置换，是由麻省理工学院的阿·鸟·曼(R. W. Mann)在1963年左右作为“波士顿臂”的研究规划而揭开了序幕。图9.1是该规划研究开发示意图⁽⁴⁴⁾。当想要遵从中枢神经的命令，发动肘的伸屈时，用表面电极测量二头肌，三头肌的肌电流，根据电流状态来控制肘的角度。这时，不仅能通过视觉把臂的位置反馈给使用者，而且能介于触觉的提示装置把振动刺激反馈给使用者。

通常，为了不仅能进行位置控制，也要能进行力控制，加在手端的力可从控制信号中减去肌电信号而算出。这样，手端加力和手端不加力相比，虽然是同样的肌肉收缩，但加在电动机上的信号电流小了，因此，使用者想要保持平衡，须进一步收缩肌肉，因而可

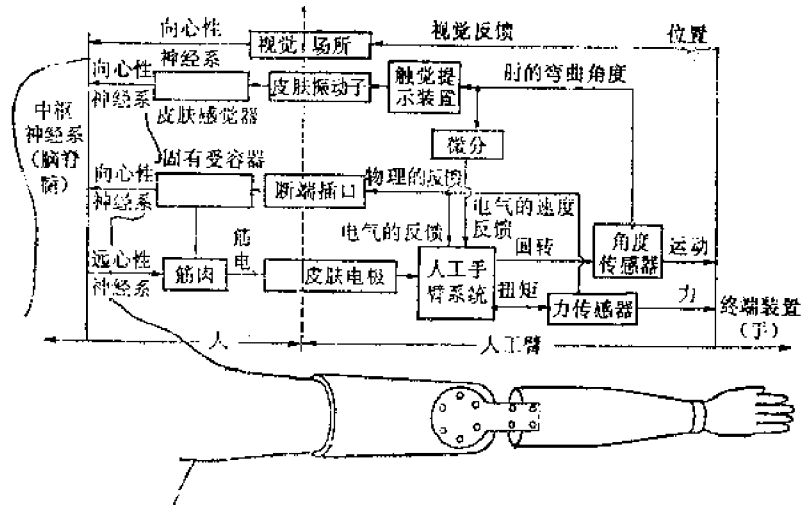


图 9.1 MIT波土顿臂研究开发示意图 (C) 的修正

进行一种力的控制。

这个规划还有一个特点是从开始研究就有叫做Liberty Mutual保险公司积极参加,因而大大地缩短了通常从实验室阶段到实际产品阶段所需的相当长的时间。

在断肢者残留下相应于控制部位的肌肉的情况下,可以进行上述的控制,但是当执掌直接运动的肌肉由于断肢而失去时,以及即使没有失去但控制对象自由度高的情况的时候,上述的方法就不能应用,必须有更高级的控制技术。

这里有控制手指的一个例子。C. Almqvist等⁽⁶⁾提案要积极地利用断肢后断肢者的幻肢(Phantom limb)感觉,如图9.2所示把6组电极配置到断肢端适当的部位,图中,对应于6种不同的幻肢的手指运动,产生可以判别的6种不同的肌电图形,利用这一事实,用图像识别的方法分离出这六种图形,并用相应于各自的命令图形去控制假肢,在临床试

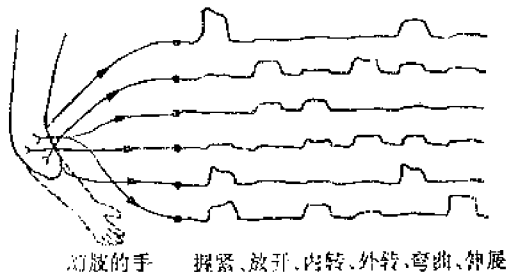


图 9.2 伴随着幻肢的手的运动的肌电图形
 实验中取得了成果。这是由于手指的运动的相当部分是由小臂上的肌肉和与肌肉相连接的肌腱来进行的,小臂的肌电包含着关于手指运动的大部分信息的缘故。

但是在全臂为假肢的系统中,加上控制的自由度多,直接与运动有关的肌肉由于断肢原因而失去,所以从肌电中能得到的信息变得极少,不能利用同一种方法。

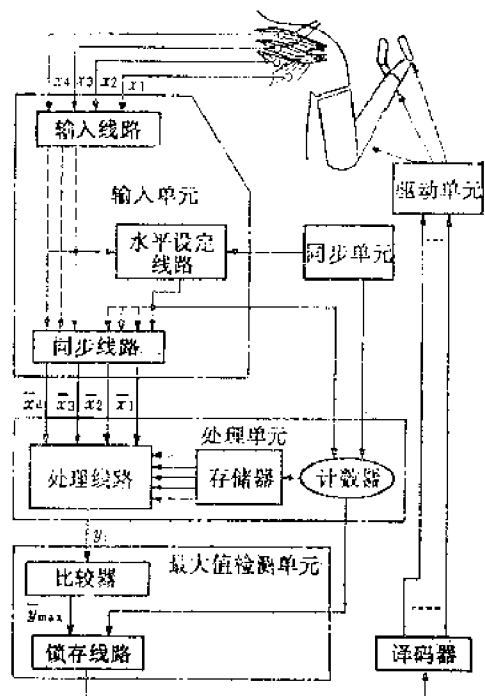


图 9.3 识别伴随肩动作的肌电图形来控制假手

D. C. Simpson⁽⁸⁾在给上肢定位时,注意到上肢与锁骨的协调运动,注意到能够把上肢看做是锁骨的延长。他使锁骨的动作和以肩关节为中心沿极坐标方向挪动手指的动作相连动。这种方式在酰胺胍脲酮所致畸形儿的空压假肢上取得了应用成果。在机械技术研究所,提出了这样的方案:从大胸肌、僧帽肌、扩背肌、大圆肌等的肌电中把握肩的上下、前后、左右等动作,并与此相应的上下、前后、左右地来移动手指的位置。人们正在讨论用图形识别法识别肌电,切实地推算肩的运动(图9.3)。

上述的两种方式,所谓用随着手臂弯曲运动,用小臂的拮抗肌的肌电流去把握手臂开闭的控制,现在正处在把左手指上实用化的取代方式推广应用到全臂的阶段,顺便指出,这种实用型的手,已被西德开发且商品化的有奥托-鲍克和早稻田大学的加藤等开发的、今仙技研商品化的瓦依姆臂。把这些更进一步,Almström也许会让在手指上成功了的幻肢感觉方式适用于全臂的假肢吧。D. R. Taylor等⁽⁸⁾为了能从背上和胸的肌肉上得到与臂的运动相关联的肌电信号进行了研究,他的研究成果作为坦普尔臂(Temple Arm)已硬件化了。虽然这还停留在实验室水平,但作为初步尝试是很有趣的。

正如Simpson所指出的那样,观察健肢的运动,例如当臂向前方伸出时,锁骨也向前方移动等,了解到锁骨的伸展,内伸与臂的运动之间有很强的相关关系。因而,可以假定假手的关节角 θ_p ,角速度 ω_p 和残存骨骼肌肉系的关节角 θ_n ,角速度 ω_n 间有简单的比例函数关系。积极地引入这种假定,以自然的形式进行假手的力控制方式,由S. C. Jacobsen作为前提性控制(Postulate control)方式而提案⁽⁹⁾。图9.4所示是其系统的组成。在断肢者的残存肌肉上贴上经皮电极,从做过预处理的肌电信号 E 来推算残存骨骼肌肉的各关节做功的力矩 M_n :

$$M_n = F(\hat{\theta}_p, \hat{\omega}_p)E + N(\hat{\theta}_p, \hat{\omega}_p) \quad (9.1)$$

这里, F, N 是事先用适当的测量工具测出的扭矩 M_n ,并从当时的肌电压 E 和 M_n 中用螺旋回归法定下的。

作为前提控制的制约条件,假定有下式:

$$\hat{\theta}_n = \eta \hat{\theta}_p, \quad \hat{\omega}_n = \eta \hat{\omega}_p \quad (9.2)$$

$\hat{\theta}_p$ 和 $\hat{\omega}_p$ 为假手的关节角和角速度的推算值,已由Jacobsen等人实时的高精度的测量和推算出来。

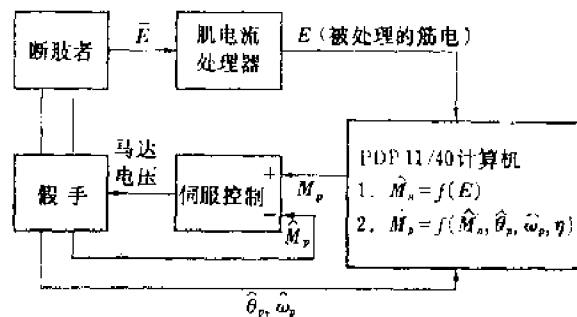


图 9.4 Jacobsen的前提性控制的框图

由于 M_n 可从式(9.1), θ_n 和 ω_n 可从式(9.2)求出,用适当的函数去拟合它们的每时每刻的值,可求出假手的各关节上应加的扭矩:

$$M_p = f(\hat{\theta}_p, \hat{\omega}_p, \hat{\theta}_n, \hat{\omega}_n, M_n) \quad (9.3)$$

Jacobsen具体地利用了如下的函数形式:

$$M_p = \beta_1(\theta_p, \dot{\theta}_p, \eta) M_n + \beta_2(\theta_p, \dot{\theta}_p, \eta) \quad (9.4)$$

到现在为止, 他进行了一个自由度到三个自由度的实验, 显示出其有效性。原设想这种方式应更有效地用在全臂假肢上, 所以, 人们希望它向着更高自由度的系统发展。

另外, 在这些控制中, 式(9.1)由肌电压去实时的推算力的方法的研究, 是很重要的。不仅是式(9.1), 更一般的, 应得到 $M_n = f(\tilde{E})$ 。例如, N. Hogan提出了假定如图9.5所示的肌电压发生过程, 基于这个模型, 可利用从若干个电极得到的信息去最佳地推算肌肉力 $F(t)$, 这种方式所显示出的有效性引人注目⁽¹⁰⁾。

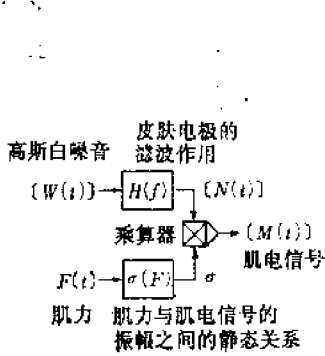


图 9.5 Hogan 的肌电发生模型⁽¹⁰⁾

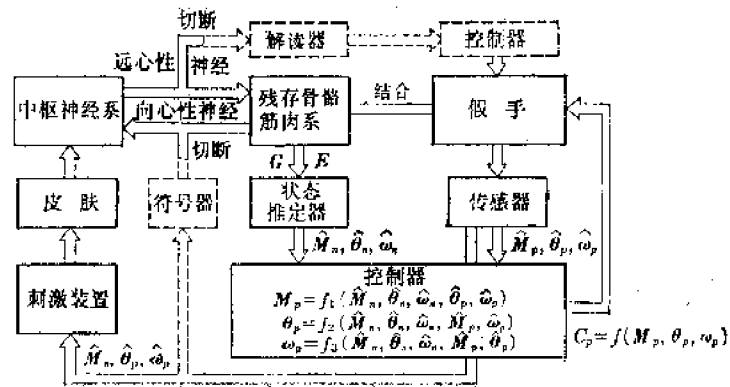


图 9.6 理想假手控制系统的示意图

图9.6所示是理想的假手系统。在理想中如图9.6中虚线所示, 好象把被切断的远心性神经的切断端都集中起来一样, 解读这些神经脉冲的编码, 基于其结果进行假手的控制。进而, 我们可以理解, 只要用传感器捕捉假手的运动和加在它上面的力, 并且把它们和人的神经系统所进行的运动和力的符号统一起来, 提示被切断的向心性神经断端即可。

这种方法毕竟是理想的, 现实上, 不仅不能手术, 而且关于神经脉冲符号化和解读也完全没解决, 作为代替的方法, 不消说正在进行本节已详细叙述过的用肌电控制的研究。肌电方法的理想系统, 如图9.6实线所示。即, 由残存的骨骼肌肉系中得到的姿势信息 G 和肌电信息 E , 从而实时地推算残存骨骼肌肉系的状态 $(M_n, \theta_n, \omega_n)_t$, 利用其推定值和假手的状态 $(M_p, \theta_p, \omega_p)_t$ 决定作为它们的函数的, 下一步假手应有的状态 $(M_p, \theta_p, \omega_p)_{t+\Delta t}$, 为此控制量 C , 如用 M_p 就是力控制, 如用 θ_p 就是位置控制, 如用 ω_p 就是速度控制。一般, 作为这些量的函数的复合量输出。另外, 利用残存感觉器, 例如皮肤感觉、假手的每时每刻的状态, 将向使用者反馈。

由上述的过程可知, 今后研究的课题如下:

- (1) 高精度实时地从 G, E 中推算 M_n, θ_n, ω_n 的方法。
- (2) 从 $(M_n, \theta_n, \omega_n)_t$ 和 $(M_p, \theta_p, \omega_p)_t$ 中推测 $(M_p, \theta_p, \omega_p)_{t+\Delta t}$ 的方法。为此, 也许有必要导入 Jacobsen 等用过的假定。
- (3) 决定控制 C , 以达到控制 $(M_p, \theta_p, \omega_p)_{t+\Delta t}$ 。
- (4) 把假手的状态向使用者反馈的方法。例如利用经皮电极的刺激等。

9.13 取代下肢的控制

据推测, 下肢被切断的人是上肢被切断的人10倍以上⁽¹¹⁾, 尽管如此, 从控制取代的角度来看, 取代下肢仍是很落后的。其所以落后的一个原因, 是由于有如下想法支配的: 一只腿被切断时, 至少拄着拐杖也能步行, 不需要什么特别的控制。即使不拄拐杖, 现在对于被切断的脚, SACH脚也正在实用化, 它可以大致恢复断肢者的步行能力 (SACH: Solid-Ankle-cushioned-Heel)。另一方面, 在两条腿都被切断时, 问题又太难了。所以这样说, 是由于如果不想用轮椅这种与普通腿的形状不同的东西, 想代之以与人类的腿相同的东西, 去解决步行问题, 就必须制做两腿步行机械。然而尽管人们经过多年的努力, 对两腿步行机器人已有许多优秀的研究成果, 在控制方面, 平地步行时, 也才处在从静态控制转移到动态控制的阶段⁽¹²⁾, 在硬件方面, 除了必须要有两只腿的机构以外, 还需要庞大的油压系统和电源, 很遗憾, 到利用它们取代双腿的阶段还差很远。

但是, 在控制论的探索上, 从以下两个观点来看, 两脚步行机是重要的。

(1) 改善了步态 因为用被动的假腿, 即使限制在平地步行, 也只能实现一定的步行速度;

(2) 扩大了移动范围 因为不借助于手, 被动的假腿是不能实现登楼梯等动作的。

而对主动的假腿的有组织的研究, 是以MIT为中心进行的。人们组装了有限状态的意识识别装置, 并把人体各部的关节角度、扭矩、肌电、脚的开关状态等信息作为上述意识识别装置的输入量, 由此构成了有限状态的自动控制装置, 根据这个装置的不同状态来切换平地步行模式、上下台阶模式、攀登斜坡模式等。各模式中包含立脚时间、迈步时间等机能模式, 可以进行相应的主动控制和被动控制。

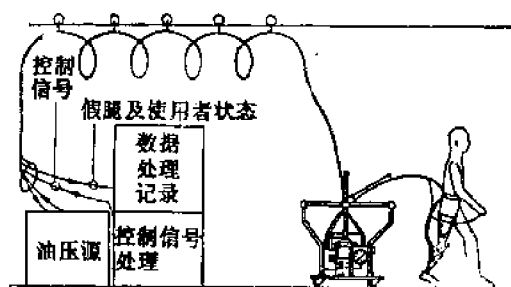


图 9.7 MIT假腿系统的研究开发示意图

图9.7所示为它的控制系统。由于这个系统用小型计算机作为控制部件, 所以构成了设计解析假腿用的模拟装置。也就是说, 人们可以自由地把它当做假腿的硬件相同的东西, 作为主动的执行元件进行位置控制, 也可以把它看做被动的缓冲部件。另外, 还可以自由地变更它们的特征参数。

作为控制方式, 如在立脚时间内, 人们提出了仿效的方案。也就是说, 根据健侧腿的动作, 将其稍稍作业变化, 就可给出假腿的动作图形。实际上, 对2名断腿者做了实验, 根据他们的动作, 自动地切换平地步行、上下台阶、攀登斜坡等模式, 得到了良好的结果⁽¹³⁾。

在日本国, 在工业技术院的医疗福利机械研究开发的委托制度下, 从1975年开始, 按照五年计划进行了动力驱动假腿的开发课题。目标是在膝关节上配备小型油压作动筒, 按照微机程序向作动筒输入信号进行控制, 使之可能达到通常的步行速度并且能够上下台阶。加之, 为了适合日本人的日常生活, 还使它可以作盘腿坐、跪坐、和下蹲等动作, 并且为了能适合每个人的体格而能进行调节, 研究了一种结构, 这种结构的各个模式能够

分解。

9.2 感觉机能代行系统

9.2.1 人工感觉器

对于人类，失去眼和耳与失去手和脚同样不幸。用机械去补偿失去的感觉机能的研究被叫做感觉代行或感觉取代的研究。虽然，理想上的取代也像取代手脚一样，在机能上和形态上都应和人类的相似，但在用人工感觉器时，比起取代手、脚来却格外的难，因而，现状是对感觉器的形态一概不论，只是追求实现它的机能。

这种感觉代行系统中，最重要的研究课题大致可分为：

- (1) 如何取得外界状况（测量问题）。
- (2) 从中能取得什么样的信息（信号处理问题）。
- (3) 提取的信息如何编码，介于什么样的通道提示使用者才能得到最佳效果（人一机系统设计）。

与控制手和脚一样，这种感觉取代的最理想的系统如图9.8那样，用能摄取同眼、耳相等量信息的传感器，输入外界信息，用与人类所进行的同样处理方法，将外界信息变换成神经脉冲，并把它接续在残存的感觉神经系统的末端。

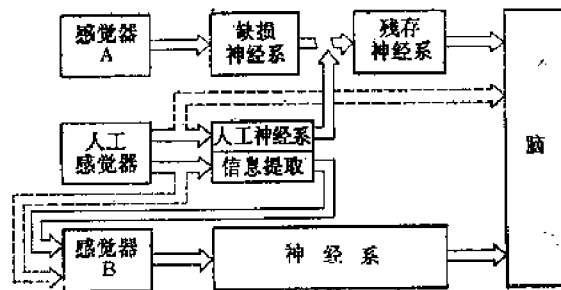


图 9.8 感觉取代系统示意图

然而，感觉器，特别是视觉上，即使是损伤的神经系统，也相当脑的一部分进行着高度的信息处理，而现状是不要说这些信息的全貌，就连其中的一小部分我们尚且不了解，所以构成代替神经系的人工信号处理装置目前尚没有希望。G. S. Brindled⁽¹⁵⁾和W. H. Dobbelle⁽¹⁶⁾把电视摄像机作为人工感觉器，如图9.8上部虚线所示，试验把人工感觉器的输出几乎原封不动地去提示埋入脑内的电极，只引起了闪光现象（PhosPhenes），没能得到通常意义上的视觉现象。

代替这种考虑方法的是从人工感觉器中提取有效信息，不是通过感觉器A，而是利用感觉器B的传递方式。感觉器B通常选择皮肤的感觉。这里，应注意的是人工感觉器的输出是通过信息提取器的，实际上之所以有这种必要，是由于相对于视觉能处理的庞大信息量，而触觉能处理的信息量极其有限的缘故。

把脑富有柔软性作为适应性前提，Smith-kettlewell视觉科学研究所希望利用皮肤代替视网膜实现视觉的取代。这个研究所的TVSS(Tactile Vision Substitution System)

的研究可以说是个好例子,它表示出了不用信息提取器时的界限。他们实验的第一期是在牙科用椅子的背上装入电磁式振动头,第二期是用由网格像机、和 32×32 的电刺激元件所组成的携带式TVSS,它大致可把外界的像——对应地在人的皮肤提示刺激像。以上可以说是没有信息提取器的情况。第三期,他们利用超声波扫描探索外界,在腹部皮肤上分不同距离和方向(像超声波断层像一样)提示二维的信息,他们改良了二维提示装置并进行了实验。到了这个阶段应该说是到了信息提取的初步阶段,可以说开始了信息的有效变换。上述的实验结果,虽在室内比较良好⁽¹⁷⁾,但在户外却完全不能利用。所以现在他们的研究已转移到用人工智能的方法解释景物,进行特征提取,并向人提示其信息这方面了。作为最初的基准实验装置,据说是这样规划的:人一边从车后推动着载有微机的小车,一边移动,用适当的提示方式把特征提区的结果用电刺激等方法向人进行信息传递

从这个例子我们明白了,在把人工感觉器作为研究题目时,开发研究的重点之一是设计信息提取器。我们期待着今后如图9.8所示那样,把过去只是用单纯的变换方式进行信息传递的研究,逐渐地转向设计信息提取器的方面来。

上述的方法,与人类的眼、耳一样,可以说是用一个人工感觉器实现多种机能为目的的,被叫做直接型研究。

另一方面,目前实用上最有效的方法是把失去的感觉所具有的能力分离成典型的基本机能,按目的不同、机能不同,分别加以解决。被称为机能分离型的研究方法。举视觉代行的问题为例,分为读、写这一通讯问题,和实现单独自由行动的所谓能动性,进一步又把读的问题细分为读印刷体文字、读手写体文字以及阅读图、表等图形,分类后分别进行研究开发,收到了实用上的成果。关于辅助步行的也分为:领路问题——把盲人从出发点正确地引导到目的地以及检测所经过的途中障碍物及寻找相应的对策,还有环境认识问题——从图形中把握外界状况。虽然机能被限制,但是不断地研制出来了适合于各个问题的装置,得到恰如其分的结果。

特别在通讯领域中,相继出现了飞跃性的新发明:最新的微处理机、半导体传感器等的显著的进步、图形认识理论的应用、还有声音合成技术的进展等。作为一例,可举出能以单词为单位、用声音进行传递的自动读取印刷品的Kurz weil读书器。这种装置用OCR(Optical character reader)读取活字,每个单词、每个单词地与存储在机械存储器中的字典对照,同时,遵循记在上面的读音规则以单词为单位,用最高每分钟250个单词的速率用声音输出。在我国以产品科学研究所为中心,也研究了阅读汉字和假名混合句的读书机⁽¹⁹⁾。另外,工业技术院的医疗福利机器的委托研究,也从实用化立场上进行了开发⁽²⁰⁾。

目前还留有较多没解决问题的领域是盲人的步行辅助问题。为此有①确保能迈出下一步,②确定方向,③含有路标的引路器等三个必须解决的问题。关于①已有如L. Kay的超声波眼镜⁽²¹⁾L. Russell的路径声波探测器⁽²²⁾、激光手杖⁽²³⁾等在各国内已实用化,在我国,工技院的医疗福利委托研究方面也在不断地努力地进行开发。

关于综合①、②、③所进行的研究,可举1977年开始的在机械技术研究所初次研究的以导盲犬机能为目标的步行诱导机械为例。在9.3.3节中将详细叙述。

9.2.2 人类、机械、环境模拟

如9.2.1节所述,感觉代行系统设计中,最主要的研究课题,大致可分①外界测量,

②测量信息的处理, ③把处理的信息向人提示或人一机系统等等。

关于①大体上依靠超声波元件、半导体激光PSD、CCD、CID等特性好的传感元件的开发和用巧妙的方法有效地利用这些元件。这与一般的机器人传感器的共同点很多。

②中的信息处理部分很重要, 但提取什么样的信息才好, 还要做系统的研究。关于通讯机能, 不用说, 可以利用遥感、利用在医疗或工业界所用的图像处理 and 图象识别、声音的信息处理方法等, 实际上也不断地取得切实的成果。但另一方面, 关于环境认识和步行问题, 已经到了这样的阶段, 它将与三维物体的认识、人工智能、或者机器人技术等领域中的尖端题目同时并行地进行研究。

③中的人—机接口, 是感觉代行系统中最重要领域。迄今为止以听觉和触觉为中心的信息传递系统的研究虽有进步, 但通讯方面的题目仍很多, 这些题目中信息是与动作结合在一起的。比如以盲人的步行辅助为目的的研究就属于这种。

过去的盲人用辅助步行器的设计, 在某些方面往往是从当时研究者的想法出发的, 由于②、③系统基础的讨论, 不是以事实为背景的, 所以对某个人有效的步行辅助装置, 对其他人会全然无用, 很难成为一般性的装置。从以上的回顾出发, MIT的Mann主张必须对②、③进行系统的研究⁽²⁴⁾, 为此, 对①的种种传感器, 在②中进行各种各样的信号处理, 还要用③的不同的提示法为盲人提供信息, 并将其在实际环境中应用。人们必须根据上述的步骤, 评价采用什么样的组合, 调整什么样的参数时, 才对利用这个装置的那位盲人的步行有最有效的帮助。然而, 上述的组合方式极多, 不可能分别试制各种装置。另外, 试制要花费很多时间, 而在试制期间又会逐渐发现新的传感器、新的处理方法和有效的提示手段, 是追莫能及的。

解决这个问题一个有效的方法, 是由Mann提案的人类、机械、环境模拟的研究中得到的。正如图9.9所示, 它是这样一种方法: 在实际环境中或在与实际环境非常相似的环境中, 盲人利用各种步行辅助装置而自由行动, 实时地测量盲人的步行图, 根据测量结果的讨论, 对于②、③方面的问题, 进行系统的而且定量的评价。具体的做法: 步行辅助器的使用者, 在对外界环境模拟的极好的室内, 利用计算机仿真的各种辅助装置、自由地行动。把外部环境、辅助装置的特性模型化, 全部储存在计算机中, 另外实时测量使用者是在什么位置, 面向什么角度去利用辅助器的, 以及使用者当时是什么样的运动状态, 把这些测量结果输入计算机。计算机对辅助器得到的信号(实际的输入信号, 或者从模型关系用计算机推算出的信号)进行信号处理, 用③中的提示法提示使用者。对②和③进行种种变化, 比较当时使用者的步行状态来研究外界用什么样参数、以何种形式提示使用者, 才能让使用者用与明眼人相近似的形式行动, 达到本研究的最终目的。

这样做没有必要实际制造各种装置, 而用计算机进行模拟, 找出相应于不同残疾程度的或者不同人的状况, 采取什么样方式适合的一般规则来。同时对于每个人, 都可以找到其中最合适的辅助装置, 把其参数最佳化, 就可以设计出最适合那个人的装置。然后或者开发实际的硬件或者在已有的辅助器的ROM中, 存入适合那个人的参数即可。

具体的研究在MIT和机械研究所中均处在迈出了第一步的阶段。这开始于盲人步行机在用某种方法诱导盲人去得到一条没有障碍的安全的路径时, 用什么形式向盲人传送有关信息才行的定量评价问题。如图9.10所示, 由计算机随机地发生前进的方向, 盲人根据它回避障碍。盲人的动作由两台阴极射线管来捕捉, 并进行实时测量, 这样就可实时地计算

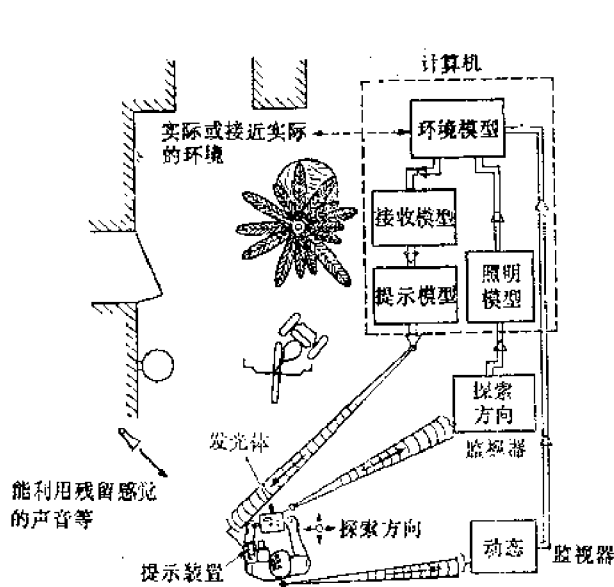


图 9.9 人类、机械、环境的模拟

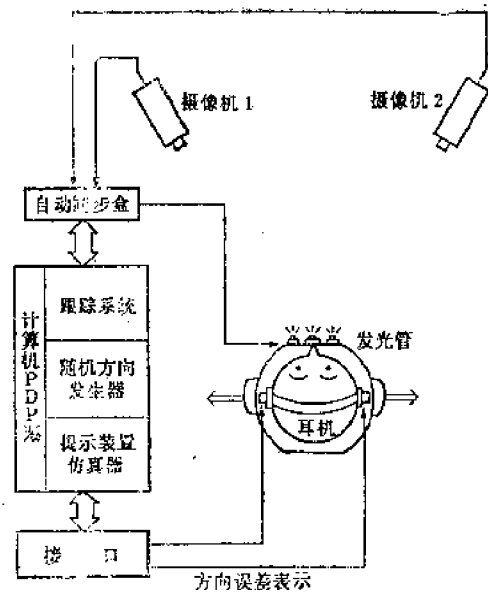


图 9.10 步行信息最佳提示实验

出人所在的位置与计算机发生的随机方向的误差，根据计算机发出的听觉信号，被实验者借助于耳机听到这个信号，按着这个信息修正自己的位置。在上述的过程中，人们考虑了把盲人前进的方位与应前进的方向的差变成听觉信号的种种方法，具体地，用计算机模拟变换的部分，实现对各种信息的提示方法，从盲人对这些方法的响应特性中求出最佳的提示方案。

9.2.3 用电刺激法传递信息

我们已经知道，在构成感觉代行系统和运动机能代行系统时，把来自装置的信息提示给人的这一部分极为重要。提示时，做视觉取代者就不能利用视觉，做听觉取代的就不能利用听觉，而失去视觉的人的听觉和失去听觉的人的视觉，是残存的机能中最重要的部分，通常觉得不愿意让机器来的信息污染它们的人较多。难道没有代替视觉、听觉的某种别的信息通道吗？人们正在研究利用作为第三信息传递通道的，分布于人体全身的，通常没怎么利用过的触觉。

以前是制成一个振动元件的阵列，把它接触在人的皮肤上。其成功的有代表性的例子是盲人阅读器。盲人右手拿着口红那样大的相机，在书上操作，以 24×6 单片硅集成型光敏晶体管摄取文字，驱动与此相应的 24×6 的半导体话筒型压电晶体，提示盲人的左手指尖，据说这种阅读器使用已超过5000台。

通讯用的触觉提示装置除了利用振动刺激以外，还做了种种实验研究、产品开发，并取得了成功。然而，把这些研究成果用于步行辅助装置或提示假肢的触觉信号时，则发生很多问题：①在刺激元件多的情况下，由于它们的驱动源一般是大型的和大容量的，所以不便携带；②由于刺激元件具有机械的可动部分，特别是为了提示那些不得不把强度范围取得很宽的刺激，提示的频率将受到限制；③产生噪音；④由于皮肤与振动元件间的机械的接口的影响，强度感觉特性根据装着的状态不同而变化等。

由于这些理由，对于步行辅助器等携带性的装置，对于假手假腿等有运动部分的装

置，需要找到一种代替振动刺激的提示方法。其中之一是利用有希望的电刺激方法，各国正在推进电刺激法的研究。电刺激借助于皮肤上装着的电极把脉冲电流传给人，发动电极下的神经。电刺激的最大问题：①用满足什么条件的电刺激可以正确地传递信息，并且使人感觉良好；②可传递的最大信息量有多大；③用什么样的传递方式；④用什么样的电极、如何装着方便、感觉舒畅且稳定地传递信息等。

馆等人特别对①和③进行了系统的定量的讨论，得出以下结论。

(i) 在利用脉宽1ms以下的单一方向脉冲的传递方式中，决定电刺激的感觉强度的参数，是其脉冲能量⁽²⁶⁾。如果控制了能量，即使皮肤和电极间的接口变化，也可以在某种程度上稳定地进行信息传递。

(ii) 关于强度，有3.0~4.0 bit/symbol的通讯容量⁽²⁷⁾，关于频率，有2.5~3.0 bit/symbol的通讯容量⁽²⁸⁾。

(iii) 当在同一通道上传送强度和频率2个参数时，有必要用频率去补偿强度。进行这种补偿后的信息传递时的通讯容量为5.6~6.0bit/symbol，最大传递信息量为2.7~3.2 bit/symbol。

(iv) 听觉上的两耳听，或在振动刺激中，听觉会有错觉传感现象⁽³⁰⁾，这种现象在电刺激时也会产生⁽³¹⁾。由于这种效应，在两点强度差错觉传感时，通讯容量为2.0~3.0 bit/symbol，而3点错觉传感时，通讯容量为3.9~4.2 bit/symbol，最大传递信息量约为2.8 bit/symbol⁽³²⁾。

在今后的研究课题中，上述的①和④的研究将变得越来越重要。

9.3 医疗福利机器人

9.3.1 机器人在医疗福利方面的应用

在医疗福利领域中，机器人技术的应用形式主要有两种。一种是前边说过的对人类能力的取代方法，把假肢、感觉代行装置等装在使用者身上，构成人—机系统，以此恢复失去的能力。

在借助于人和动物进行的那种医疗福利工作方面，机器人技术的另外一种应用是把人和动物的劳动置换为机器人的劳动的方法。我们这里将叙述的是后者意义上的机器人。

医疗福利机器人，现在正好处在研究的开端阶段。人们虽然经过很多努力，但这种机器人目前仍在实验，没进入实用阶段。然而，这方面的研究进展是显著的，今后大有希望。

作为最早开始研究的已接近实用化的就是医学教育用机器人。由于临床医学是以人为对象的学问、技术，所以即便是在教育领域也常常利用人体本身做教材。但是，从一开始，这种用人做教材进行教育和训练的方法，就是个问题。人们想用某种东西代替患者作教材，所以对机械或者说对机器人的需要十分强烈。在美国的南加里福尼亚大学，人们研制了训练麻醉技术用的患者机器人，机器人的名字叫做Sim-one，麦阿密大学研制了心脏病诊断用机器人Harvey。日本樱井等人研制了练习急救复苏用患者机器人RESIM等。

9.3.2 护理用机器人

护理病人基本上是靠人，这是迄今为止的常识。但从病人的角度来看，自己不分昼

夜有时渴了、有时出汗了，另外还有许多日常琐事上的要求，但由于心理上的拘束，不可能把这些事一一地依靠护士。还有，假如有一会儿护士不在场，病人也只好放弃这些要求。所以，患者希望有某种机器人，可以不必客气地自由地对它提出要求，这种想法是极其自然的。

另一方面，从床上把残疾人或患病的人抱起来，挪动地方等，几乎所有情况都不得不靠人，为此，承担护理工作的许多护士，患有腰疼的职业病，是个大问题。因此，特别是在与康复有关的医院里，由于这种重体力劳动的缘故，护士的人手短缺，发展成了社会问题。也许这样的劳动是能用机器人代替的。

舟久保、齐藤等人推进了有关前者的研究⁽⁸⁴⁾。例如，他们推进了科学技术厅的研究规划：失眠的残疾人用的辅助机械系统。这种系统使得躺在室内的患者，可根据自己的需要，发出指令，开闭室内的窗帘、门窗，开关电灯、收音机和电视，也可以与其他房间的串者或室外的来访者通讯对话等。另外，还有机械手系统，患者一天所需的东西，如饮料什么的，由家属早上事先准备好，以备患者高兴喝的时候，借助该机械手就能够喝到。

中野、新井等人推进了后者的研究。⁽⁸⁵⁾在机械研究所，推出了叫做 MELKONG 的护理机器人的研究计划，设定了以下的问题：①床和它的自动伸缩机构；②能安全地搬运 80kg 左右的人；③有自行解决能源，自行信息处理的自立作业的本领；④有生手也容易操作的人—机对话方式等，他们正在设法解决这些问题。对于①，研制成功了 ODV (Omni-Derection Vehicle)，用这种装置，可自由地选择三种模式，即，即使从静止开始也能无摩擦地向任意方向前进的全方位模式，能在原地回转的回转模式，具有与汽车一样的，两前轮为舵轮的汽车模式等⁽⁸⁶⁾。对于②，利用比例绘图仪的机构，设计了不用演算、安全可靠而且耗能小的 2 只机械手，床上设计了特殊的进口，从进口处插入这 2 只机械手，可以连床一起把患者抱起来移动。对于③，在油压供给系统和油压伺服系统中巧妙地利用蓄电池，以求节约能量。

基于这些基础研究，现在工技院医疗福利机械委托研究，正在引人瞩目地推进着实用化。

9.3.3 导盲犬机器人

据称在日本国有 35 万盲人，在他们中，希望自己能自由行动的愿望是最切实的。如第 9.2.1 节中所说的那样，使这种独立行动成为可能的要点：①确保能迈出下一步；②确定方向；③包括路标的引路器等三个必要的辅助过程。通常的辅助器不过是补偿①或②的一部分机能而已。由于普通的装置能做的信号处理也是简单的，它把对这些信号的解释委托给盲人，所以盲人必须把注意力经常地集中于装置。因而，在发挥盲人的残存感觉机能上引起了障碍或者引起盲人极度疲劳，这成了一个大问题。

综合从①到③的机能，所谓的盲人步行辅助，意味着或者由帮助者与盲人同行，或者由导盲犬引路。导盲犬兼备从①到③的机能，同时关于①的大部分信息处理都由狗来进行，盲人只需验证狗漏过的危险状况，所以他可以安心的集中自身的残余感觉机能。在这种意义上，用狗导盲是最好的方法之一。但由于狗是动物，就有固有的缺点，即要在喂养和训练上下大工夫。据 1981 年 7 月统计，日本有导盲犬不过 352 只，而且在有公寓、宿舍的城市中利用这些狗也有困难。为此，人们十分希望具有导盲犬优良机能的步行诱导机械

(导盲犬机器人)问世。

馆等人为了用机械去实现导盲犬的机能，从1977年开始推进叫做 MELDOG 的研究题目。在这种以导盲犬机能为目标的步行诱导机械上，他们把导盲犬的机能大致分为三类：(i) 服从，(ii) 聪明的不服从，(iii) 人一机对话。他们设法在机械方面用适当的方法分别实现它们。这个研究的特征之一是：首先实现迈出下一步，然后引路的方式，不是从部分到整体的方式，而是和训练狗的过程一样，先确定方向或者是确定路线，然后再确保下一步的运动，这样一种从全体到部分的方式。换句话说，为了实现③的导向引路机能，机器人自己要经常识别自身的位置和方向，这是最重要的基础。

这种导向机能是用所谓的导盲犬机器人的街道地图—移动用数据库来实现的。移动用数据库是由计算机把通常的地图进行图像处理，预先制成面向机械的地图，特别，这是把十字路口和十字路口之间的连接关系作为主体的地图，机器人把来自地图的信息和自身传感器来的信息，边进行对照边行走。这时最重要的是把从机器人内部状态了解到的自身的位置和方向，用来自外部传感器得到的确切信息来修正以消除误差。进行修正的方法，可认为有 (I) 逐次修正法，(II) 在每个重要地方的离散修正法等两种方式，这里采用了后者，即离散修正法。也就是说，在某一定距离内，机器人只是按照自身内部传感器的信息和地图的信息惯性地行走，在十字路口等重要地方与外界传感器对照，消除这以前的误差，再一次继续惯性行走方式。此时，在每个十字路口等重要地方，需要由外界传感器得到外界确实的位置和方向的信息。人们把为此而设的路标或记号叫做里程碑。在从1977年开始的6年计划中，在每个十字路口等重要场所中敷设了人工标记（经济的极为简单的长2.5米，宽15厘米的方形、单色标记）作为里程碑。在1983年开始的新的研究计划中，将利用自然界已存在的自然路标（柱子、树木、楼房等）。为此，必须解决：诸如什么样物体适合做里程碑的评价问题，这些标记的利用方法的问题，如何向数据库登录的问题，里程碑的检测法的问题等，人们正向这些方面推进研究。

检索这种关于里程碑的地图，机器人就可以作盲人的响导。只要盲人向机器人输入现在的地点和目的地的编码，机器人就会找到达到目的地的途径。为了确认每个交叉路口，机器人在交叉路口处减速或停下来，根据上述的途径为盲人做响导。途中，由机器人所带的超声波、光学式传感器，了解路上障碍物的情况，并适当地把这个状况传递给盲人，达到人和机器人一体的单独行动的目的。

机器人就成了这样的系统：它不仅能把握障碍物等外界的状况，而且能实时地捕捉来自它后边的盲人的行动，根据盲人的行动决定自己的动作。即，它按照盲人通常行走时的自由步伐，决定它自身相应的移动。另外，机器人当盲人安全行动的时候，不要给盲人任何约束，以保证盲人能集中残存机能，只有在盲人的行动有危险的时候，机器人人才可以让作为主人的盲人了解到危险。

图9.11所示为实现这些机能的导盲犬机器人的系统结构。迄今为止，人们已试制了 MARK IV，并在利用人工里程碑引路⁽³⁷⁾，利用路肩控制⁽³⁸⁾，对移动的障碍物的处理措施⁽³⁹⁾，根据人的速度控制机器人⁽⁴⁰⁾，用电刺激法从机器人向人传递信息等方面的实验上得到了成功。

今后必须解决的最重要的课题：

(i) 确定利用自然路标作里程碑的方法；

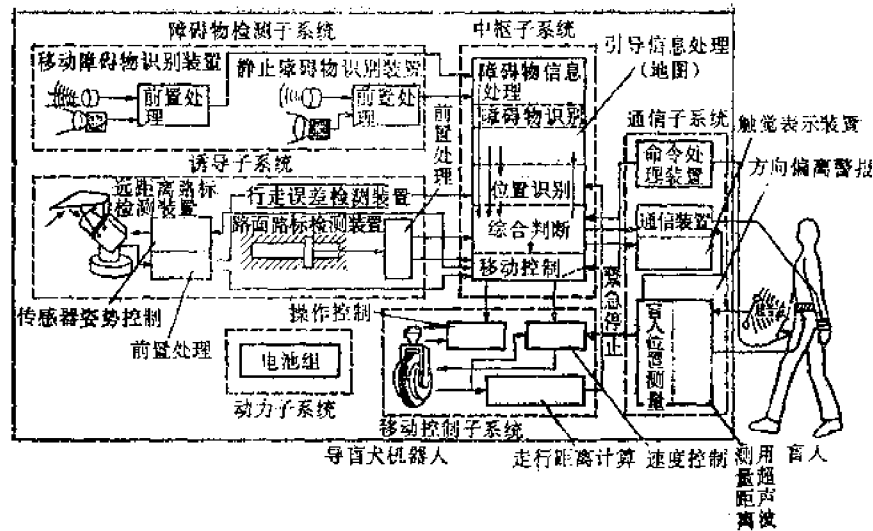


图 9.11 导盲犬的示意图

- (ii) 扩大对障碍物检测以及相应的处理能力;
- (iii) 有效地向盲人传递机器人所具有的路标的信息以及机器人得到的环境信息的方法。

9.4 极限作业的机器人

作为援助人类的机器人技术，除了在上述的医疗福利领域中应用外，还应用于极限作业领域。这些作业从根基上支持着现代社会，但是是危险而且艰苦的。作为这种极限作业的例子，有如在宇宙、海洋等特殊环境下建造的结构物，或检查、修理等作业，有在高层建筑、石油联合公司发生火灾等灾害时，救助人命、消火等救援作业。

为了能完成这些作业，机器人技术方面尚未解决的问题很多，需待今后的研究开发成果。根据对机器人分代的考虑方法，这属于第三代机器人的技术开发。为了促进下一代机器人的研究，需要推进以国家为中心的研究开发，必要时，应进行国际性的合作研究。

这里，简单地叙述，为了第三代机器人成为可能的有关的基本的技术开发题目。

最后，介绍这个领域中国家规划——“极限机器人”的大型课题的研究计划，也涉及到国际的合作研究。

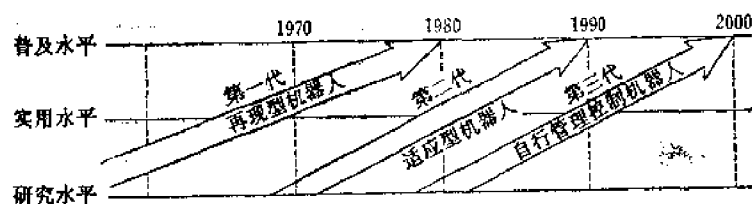
9.4.1 第三代机器人

第一代机器人，把以前只是空想产物的机器人，不管怎么说，作为能实际作业的机械，成功地产品化了。尽管它的机能极其有限，但这件事本身具有极其重要的意义。具体的是以1962年初次制成的Versatran和Unimate为原型的再现性机器人。在历史上，战后，为了在核能反应堆有强烈放射性物质的操作间里装卸核燃料，人们在研制操作型机械手，形成一股潮流，随着控制论而兴起的自动机械、数控机床等，形成了自动化技术的潮流，再现性机器人是这两股潮流汇集的成果，并处于两股潮流汇集的位置。其本质技术是检测位置、速度、力等的所谓内部信息的检测（内部传感器技术），以及利用这些复杂

的控制系统的伺服技术。

第二代机器人不仅利用了第一代的内部信息，而且利用传感器了解环境、对象的信息，即外界信息，根据这些信息来改变行动。技术中心是传感器技术和微处理器技术。

第一代、第二代机器人的应用领域主要是第二产业的制造业。考虑到在同样是第二产业的矿业、建筑业或者在农林产业这样第一产业，在原子能、宇宙、海洋、灾害救助等第三产业中应用时，只作为目前技术的延长线，还有很多不能解决的课题，只能期待着从新的角度去研究探索。图9.12中给出了第一代、第二代机器人各自的特征、所利用的技术，从其机能方面加以汇总，图中还整理未来的第三代机器人中的课题⁽⁴²⁾。



	第一代	第二代	第三代
大脑机能 (小脑)	智能 知识 数据	先天的 (再现) 数据库	后天的 (学习, 推论解决问题) 知识库
感觉认识 机能	内部信息 外部信息 通信	有 没有或识别点 单方向 (示教NC型)	有 3维 双向通信
作业机能	传动元件 移动	静态位置控制 1维有轨道	动态位置控制 2维无轨道 3维
应用范围	第2产业的 制造业的部分	第2产业 制造业	第2产业非制造业 第1产业, 第3产业

图 9.12 机器人的世代划分及其特征

第三代机器人或者说以后的技术，因为只刚刚有些头绪，所以本质上不明瞭。脑的机能可分为智能和知识，但作为智能必须有所谓的学习、抽象思维等高水平的机能。关于知识则必须有对已获得的知识能够进行补充的高级的数据库。感觉认识机能是极为重要的，并且可认为感觉机能要把它的中心移到通信上来。用语言对机器人下达指令、与机器人对话技术也是很重要的。另外，考虑到在第三产业中应用的情况，由于没有必要什么事都让机器人独立去做，如果人能在远距离安全地参加作业，也是可以的。在这个意义上，人们要实现超过以往远距离操作方式的高级的遥控方式，这也是重要的课题。

图9.13所示为人—机器人系统之一的组成的例子⁽⁴³⁾。在这样的系统中，把人与机器人的关系比做人类社会的上级和部下的关系是容易理解的。当作为部下的机器人进行作业时，将接受作为上级的操作者的作业指示。此时，必须采用对操作者也好，对机器人也

好，都容易理解的命令以及都便于使用的语言。而当机器人不能理解命令的意义的时候，不是由操作者再下达命令，而是由机器人方面在领会命令前进行质问，因此，需要机器人语言及运用语言的质疑解答系统。

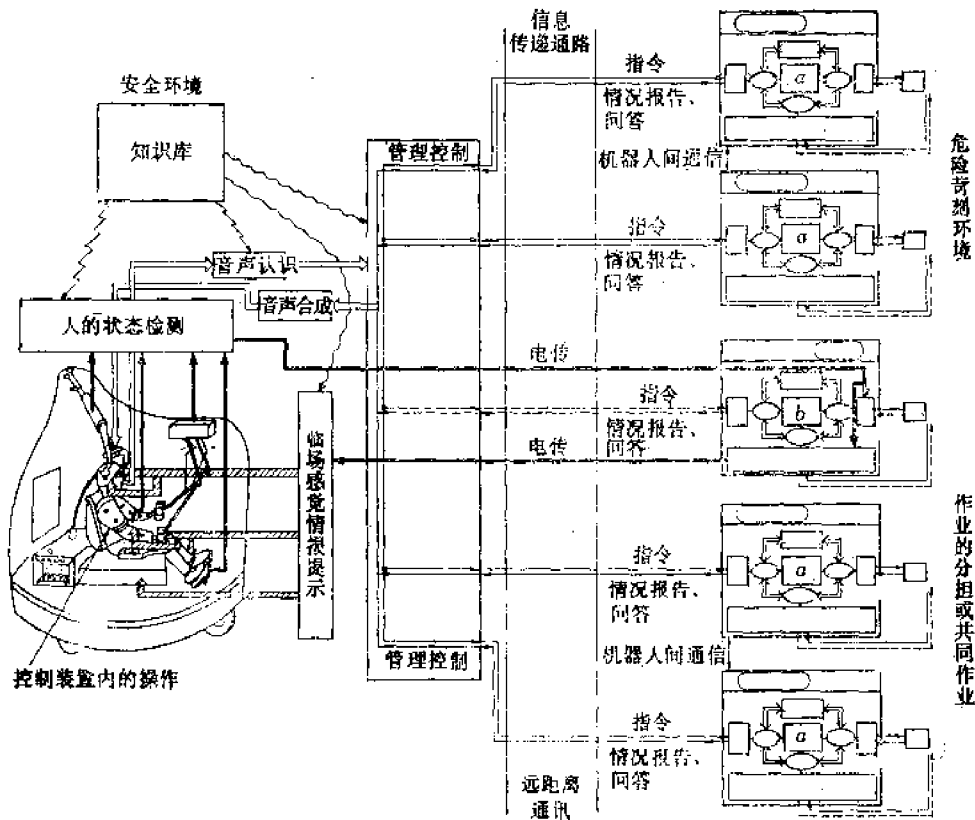


图 9.13 人一机器人系统的组成

如果机器人理解了命令，就会开始进行作业。在完成工作时（人们把以往对于这个工作有经验的人得到的知识、技能技巧编成手册）机器人边对照这种事先准备好的手册边进行作业（为此，要构筑知识库，并需要灵活运用知识的技巧）。

虽然，利用上述知识和机器人自身具有的知识，在途中也会常常碰上某种机器人自身不能解决的问题。这时，机器人向作为上级的操作者商量（人一机对话）。操作者研究了机器人的状态，知道了困难的情况，对那种状况做出最适当的判断，机器人将会尊从这种判断。同样的状况，即便不是来自机器人方面的，也会产生人一机对话。作为上级的操作者，适当地监视机器人的状况，预想机器人有困难时，从操作者方面给与恰当的指示，进行人一机对话。

如果上级判断作为部下的机器人好象自身不能解决的情况下，上级将亲自承担，解决问题。在人能直接到现场工作时，当然可以去那里解决，但当机器人在很远的地方时，或者是机器人工作的环境对人危险而艰苦的情况下，必须寻求其他的方法。

电传技术在这种情况下有用：即操作者有效地利用机器人的传感器信息，如同在机器人所在场所直接作业一样，可进行实时的有临场感的操作。

还有，在若干个机器人共同作业时，须要分担工作或合作及机器人相互之间进行对

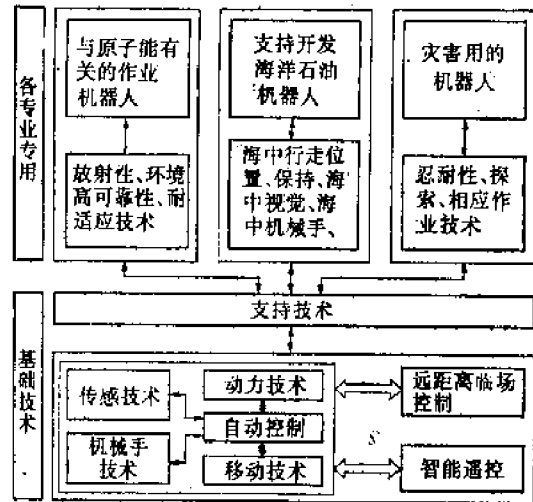
话，因此要求必要技术。

除此之外，第三代或者说下一代应解决的重要课题很多。人们期待着自身储存着能源的、在某程度上具有智能的移动作业机器人 (Autonomous Independent Mobile Robot) 实用化。

9.4.2 “极限作业机器人”大型规划与国际合作研究

从1983年开始的8年计划中，通产省工技院开始对进行极限作业的高级系统，即对极限作业机器人用的必要技术进行了研究开发。这个规划中要开发的系统是对环境适应性强的、对作业有机动性的，而且在安全距离外能迅速准确控制的人—机器人系统。他们根据原子能、海洋和救灾三个领域中各自固有的需要，开发具有专用机能的机器人，并且把各领域中共同的技术作为基本技术进行研究。

图9.14所示为极限作业机器人的示意图。表9.1列出了研究开发这种人的基本计划。



1982年在凡尔赛发达国家首脑会议上，

图 9.14 极限作业机器人研究开发计划示意图

表 9.1 极限作业机器人的基本计划

项 目	目 标	
进行有关原子能作业的机器人	研制在核电站等与原子能有关的设施中，遵从远距离操作的指示，对机械设备进行保养，检查，修理等高级作业的机器人	
支持开发海洋石油的机器人	研制在有关海洋石油开发的设施中，遵从远距离操作的指示，对机械设备进行保养、检查、修理等高级作业的机器人	
防灾救灾机器人	研制在产业设施社会设施中，发生灾害时，遵从远距离操作的指示执行，防止灾害扩大，救援等高级作业的机器人	
基 础 技 术	机构技术	研制用脚、车轮等高效地在台阶、斜面等不平整地面上移动的机构；研制由多关节、多手指的机械手进行柔软和灵巧作业的机器人 开发根据传感器得到的信息，切实地认识环境的机构
	控制技术	在研究机器人的自律机能的前提下，开发作为操作者的控制技术的，有高度实时临场感的，可按照大体上的指示正确而迅速的控制方式
	支持技术	为了有效地利用机器人，开发多台机器人组成的系统的构成方法，机器人语言及综合评价方法

注： (1) 在原子能、海洋、防灾救灾领域内，有如下的目标：
在由于有放射线、高水压、高温等原因，人员进入困难的情况下，研制可根据事先给定的指示或远距离来的指示，迅速而切实地进行、检查、保养、救援等级为多样而复杂的现场作业的、有机动性和通用性的机器人，并确立为了实用化所必需的技术。
(2) 为达成以上目标，在原子能、海洋、防灾救灾（领域）等三个领域中，在根据各自领域固有的需要，开发具有专用机能的机器人的同时，实施对各个领域共同的技术，作为基础技术进行研究开发，其目标各自如表中所列。
(3) 由于以上开发研究涉及到多分支的研究课题且适应于未来的需要，又由于谋求对国际交流规划作出贡献，所以本计划积极地推进与国内有关研究机关的学术交流。

为了使世界经济重新活跃和不断成长，各国宣言要在本国努力的同时促进国际合作。当时，为了在下一首脑会议上，就应讨论的科学技术、成长和雇用等各方面的问题准备提案，达成协议并成立了“作业委员会”。

根据这个协议，由各国专家组成的“作业委员会”汇编了“技术成长与雇用”的报告书1983年5月在美国召开的发达国家首脑会议作出了决议。

决议中，关于尖端的机器人技术，特别是在困难条件下和危险环境中可以回避人直接作业的尖端机器人系统，都作为促进世界经济活跃的关键技术之一而引人注目。

另外，日本和法国被指名为上述国际合作研究规划的领导者，希望能在国际上起重要作用。为此，日本正在以前面提到过的“极限作业机器人”规划为核心，不断推进计划进步，以第三代机器人为目标的研究，在国际相互合作中会越来越加速地发展。

参 考 文 献

- (1) 箱 肇：“人間能力の補綴と医用精密工学”，精密機械，48，5，pp.572-577 (昭57-05)。
- (2) Podlusk, M.V. and Mann, R.W.: "Letters to the editor", IEEE Spectrum (Feb. 1969).
- (3) Kobrinsky, A.E., et al.: "Problems of bioelectric control", Proc. 2nd. Int. Federation of Automatic Control Conf., pp. 1119-1122 (1960).
- (4) Mann, R.W.: "Cybernetic limb prosthesis: The ALZA distinguished lecture", Ann. Biomed. Eng., 9, pp. 1-43 (昭56)。
- (5) Almström, C. and Herberts, P.: "Clinical applications of a multi-functional hand prosthesis", Proc. 5th Int. Symp. External Control of Human Extremities, pp. 455-467, Dubrovnik (1975).
- (6) Simpson, D.C.: "An externally powered prosthesis for the complete arm", Proc. Inst. Mech. Eng., 163, 3J, pp. 11-17 (1968-09).
- (7) Tanie, K., et al.: "Apparatus for discrimination of myoelectric potential patterns", U.S. Pat., 4,314,379 (1982).
- (8) Taylor, D.R. and Finley, F.R.: "Multiple axis prostheses control by muscle synergies", The Control of Upper-Extremity Prostheses and Orthoses, Charles C. Thomas, pp. 181-189, Springfield, Ill (1974).
- (9) Jerald, R.B. and Jacobsen, S.C.: "Laboratory evaluation of a unified theory for simultaneous multiple axis arm control", Trans. ASME, J. Biomech. Eng., 102, pp. 199-207 (1980).
- (10) Hogan, N. and Mann, R.W.: "Myoelectric signal processing: Optimal estimation applied to electro-myography, Part I and Part II", IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-27, pp. 332-410 (1980).
- (11) Sheridan, T.B. and Mann, R.W.: "Design of control devices for people with severe motor impairment", Hum. Factors, 20, pp. 321-338 (1978).
- (12) 加藤一郎：“二足歩行ロボット—その歴史と課題—”，日本ロボット学会誌，1，pp. 164-166 (昭58)。
- (13) Flowers, W.C. and Mann, R.W.: "An electro-hydraulic knee-torque controller for a prosthesis simulator", J. Biomech. Eng., 99, 4, pp. 3-8 (1977).
- (14) 土屋和夫，ほか：“動力義足の開発プロジェクト”，日本ロボット学会誌，1，pp. 215-216 (昭58)。
- (15) Brindley, G.S., et al.: "The sensation produced by electrical stimulation of the visual cortex", J. Phys., 196, pp. 479-493 (1968).
- (16) Dohelle, W.H., et al.: "Phosphenes produced by electrical stimulation of human occipital cortex, and their applications to the development of a prosthesis for the blind", J. Phys., 243, pp. 553-576 (1974).
- (17) Kschy-Rita, P.: "Brain mechanism in sensory substitution", Academic Press (1972).
- (18) Goodrich, G.L., et al.: "Kurzweil Reading Machine: A partial evaluation of its optical character recognition error rate", J. Visual Impairment & Blindness, 73, pp. 389-399 (1979).
- (19) 内村喜之，ほか：“文字，音声変換システム”，感覚代行シンポジウム，感覚代行研究会，(昭57)。

- (20) 日本産業技術振興協会：“高福祉社会をめざして” (昭58).
- (21) Kay, L.: “Ultrasonic spectacles for the blind”, Proc. Int. Conf. Sensory Devices for the Blind, St. Dunstons, London (1966).
- (22) Russel, L.: “Travel Path Sounder, further results”, *ibid.*.
- (23) Benjamin, Jr. J.M., et al.: “An improved laser cane for the blind”, IEEE Int. Con. Tech. Paper, pp. 107-109 (1974).
- (24) Mann, R.W.: “The evaluation and simulation of mobility aids for the blind”, A. F. B. Research Bulletin, pp. 1-62 (1965).
- (25) Tachi, S., et al.: “Quantitative comparison of alternative sensory displays for mobility aids for the blind”, IEEE Trans Biomed. Eng., **BME-30**, 9, pp. 571-577 (1983).
- (26) 館 暁, ほか：“経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果”, 医用電子と生体工学, **15**, pp. 315-329 (昭52).
- (27) 谷江和雄, ほか：“電気パルス刺激エネルギーに対する皮膚の強度感覚と丁度可差異”, 計測自動制御学会論文集, **13**, pp. 595-602 (昭52).
- (28) 谷江和雄, ほか：“電気パルス刺激情報伝達における周波数次元の検討”, 機械技術所報, **33**, pp. 159-170 (昭54).
- (29) 谷江和雄, ほか：“電気パルス刺激による2次元情報伝達”, 計測自動制御学会論文集, **16**, pp. 379-386 (昭55).
- (30) von Békésy, G.: “Sensory inhibition”, Princeton Univ. Press (1967).
- (31) Tachi, S., et al.: “Information transmission by electrocutaneous phantom sensation”, Summary of Papers on General Fuzzy Problems, Working Group of Fuzzy Systems, Tokyo Ins. of Tech., **4**, pp. 10-15 (1978).
- (32) Tachi, S., et al.: “Information transmission by two-dimensional electrocutaneous phantom sensation”, Proc. 8th Annual Northeast Bioengineering Conf., pp. 258-262 Cambridge, MA (1980).
- (33) 板井晴久, ほか：“医療とロボット”, 日本ロボット学会誌, **1**, pp. 44-50 (昭58)..
- (34) Funakubo, H., et al.: “Application of manipulator for environment control system of bed ridden patients in private house”, Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 71-78, Tokyo (1981).
- (35) Nakano, E., et al.: “First approach to the development of the patient care robot”, *ibid.*, pp. 87-94.
- (36) Arai, T., et al.: “The control and application of omni-directional vehicle (ODV)”, Preprints of 8th IFAC Congress, **14**, pp. 1-6 (1981).
- (37) 館 暁, ほか：“ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法”, バイオメカニズム, **5**, pp. 208-219 (昭55).
- (38) 館 暁, ほか：“視線可動型センサを用いる自律移動機械の移動制御”, バイオメカニズム, **6**, pp. 242-251 (昭57).
- (39) Tachi, S., et al.: “Guide dog robot-Feasibility experiments with MELDOG MARK III”, Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots, pp. 95-102, Tokyo (1981).
- (40) 館 暁, ほか：“人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の方法”, バイオメカニズム, **4**, pp. 279-289 (昭53).
- (41) Tachi, S., et al.: “Electrocutaneous communication in seeing-eye robot (MELDOG)”, Proc. of Frontiers of Engineering in Health Care, IEEE/EMBS, Philadelphia, PA, pp. 356-361 (1982).
- (42) 館 暁, ほか：“第3型代ロボット”, 計測と制御, **21**, pp. 1140-1146 (昭57).
- (43) 館 暁, ほか：“テレビジョンスタンスの研究, 第1報”, 第21回 SICE 学術講演会予稿集, pp. 167-168 (昭57).
- (44) 工業技術院研究開発官室：“大型プロジェクト「極限作業ロボット」研究開発計画”, 工業技術, **24**, 11, pp. 13-18 (昭58-11).

第10章 与机器人相关的技术动向

机器人周围的环境是各种各样的,在我国由于正在步入老龄化社会,也由于学历普遍较高,形成了缺乏年青工人的这样一种社会环境。其结果使得劳动现场熟练技术工人不足,急须采取相应措施加以解决。另外,不用说劳动力升值,在生产率不得不提高的经济环境下,对引入机器人的花费及其后果的考虑方法也在逐渐变化。还有,在更加重视劳动安全性的劳动环境下,把人们从危险作业和过苛的作业条件下解放出来的要求越来越高。这样的社会环境、经济环境、劳动环境也必然向机器人要求新技术,这对机器人工程学的动向有很大影响。然而作为技术书,本书不从这些角度进行论述,而是到前一章为止叙述了目前机器人工程学的中心技术。

这些技术是以机械工程、控制工程学、计算机工程学、电子工程学等领域的技术为基础的,所谓机器人工程学,就是把这些技术按各自的目的融合起来的,可以说是综合化的系统技术。因此,这些相关领域的技术动向也会给予机器人工程学体系有很大影响。本章的目的是着眼于机器人周围的技术环境,概观其变化对机器人的将来具有什么样的意义。

10.1 工业机器人和智能机器人

回顾机器人研究开发的30年左右的历史,可以认为有并行的两个不同的潮流:一方面是工业机器人的发展,另一方面是智能机器人的发展。在1950年机器人初创期,对这两者的区别没有特殊的意识,到了1960年工业机器人普及时,两者的分化已相当显著,引人注目。

正如们见到的我那样,工业用机器人,作为目前机器人的主流的程序机器人、再现式机器人和数控机器人等,是用已有的技术,从贯彻了实用的、实现可能的设计思想而产生出来的。另一方面,作为智能机器人的设计目标,曾实现了具有与人类尽可能接近的智能的机器人。在这种意义上的智能机器人的研究,从1960年开始,被认为是信息处理的新领域的人工智能研究,已象征性的存在了。

然而,到了70年代中期,正如所见到的那样,智能机器人的研究开发有停滞的兆头。由于智能机器人的本质技术是把人工智能研究中的各种各样领域的技术作为要素的,所以,当研究者们把智能机器人作为系统进行开发而发觉行不通时,他们陆续地开展了各自技术要素的研究。

这是因为人工智能的研究成果,还没成长到可以实用的程度时,将其作为系统利用是不合理的。代表智能机器人的典型实例是手·眼系统。那种通过电视摄像机输入的三维的外界的状况,然后由计算机识别的技术,在目前人工智能的研究方面也还没确立。现状是许多研究者至今尚在摸索着解决作为计算机视觉的各种各样课题。

有趣的是,在智能机器人停滞的时期,工业机器人的普及面却越来越扩大。特别是,日本从美国导入工业机器人技术,相反地却超过了美国,成长到可夸耀机器人生产量占

世界第一的程度。而支持这种发展的是利用计算机的控制技术进步了。加上手·眼系统的手和臂的部分着实地进步和改良，在工业界得到了今天的成功。

人们从机器人的历史过程中所感觉到的是工业机器人和智能机器人的相对关系，并不是实际实用的计算机系统和被研究的人工智能的关系的缩影。

当然，计算机诞生到现在40余年发展、普及的过程及其环境与工业机器人的不同。然而除了规模和时间不同以外，两者之间有很大的类似性。计算机系统的技术切实的进步着、普及着，计算机产业正在成长为巨大的产业，产业用机器人的技术与其普及也是追寻着同样的道路。

另外，还可以认为，相对于这种实用的计算机系统的发展，人工智能的研究所起的作用，也与智能机器人的研究开发对工业机器人的影响非常相似。两者之间的相似是非常有趣的事实。

这样，要事先指出，过去工业用机器人和智能机器人分化是事实，最近可以看出两者之间陆续有互相渗入的倾向。

机器人的视觉也正在检查机器人上部分的实用化了。在实际的计算机系统的技术上，它就像一部影片，不断地拍摄下人工智能的研究成果，这些成果虽然是慢慢得到的，但却不断收获。

以上从宏观观点来考察，对机器人周围的技术环境具有最大影响的，虽然是计算机系统的开发研究和人工智能研究的动向，所以在以下各节将把它们作为重点，论述有关的技术环境。

10.2 计算机系统技术

10.2.1 计算机系统的变迁

区分计算机系统的发展过程，分出计算机的代，是在60年代中期的事，这是这样一个时期：对计算机系统的利用者从以前的一小批，迅速地扩大了。

所谓计算机的代，正如大家熟悉的那样，通常是着眼于它的元件，把真空管的时代叫做第一代，晶体管时代叫做第二代，集成电路（IC）时代叫做第三代，那末现在是大规模集成电路（LSI）的时代，或许是第四代吧？或者由于人们认为没有那么大的变化，叫第三点五代也好、三点七五代也好，使用了各种各样的表现方法。

主要以变换元件来区别计算机系统的发展的单纯的划代的观点，如上所述已经不再通用了。这种划代观点的迷惑，启发我们有必要从别的观点来评价计算机的发展。

从另外的侧面看计算机系统的发展过程，第一代计算机系统的利用领域是以科技计算为主的。虽然也曾有如IBM650那样的优秀机种，但是作为研究者的用户，也曾十分盛行亲手制作计算机系统。而且，通常程序用汇编语言书写，用户亲手操作计算机系统。

进入第二代，由于可以利用晶体管，磁芯等性能良好、可靠性高的元件，所以，与第一代比较，就有可能制作特殊的大型的高性能的计算机硬件了。

除了商用机种的标准大型机以外，把研究开发做为主要目的的更高性能的LARC、STRETCH、ATLAS等超大型计算机也被开发出来了。人们提出了各种各样的逻辑方式，并且产生了硬件的构成方法。所以是构成了今天的计算机硬件系统技术基础的时

代。

另外，普及了Fortran、Cobol等高级语言，产生了为充分利用计算机效率的分批处理方式，为此人们开发了监控程序，计算机系统中软件的比重大起来了。

带有拉开第三代计算机序幕的特征的是，1964年发表的IBM公司的系统360。系统360是集前几代技术和经验之大成，是在此基础上实现了对规模不同的机种统一的结构格式的系统。它是由足以区别计算机代的战略技术所产生的。另外，它还集计算机系统程序之大成，把操作系统体系化了。人们从这时开始使用结构格式、操作系统这些概念和用语，许多计算机制造商在很短时间内就追随了这种战略技术。

从这个时期开始以后，首先把商用大型机的性能价格比作为先导，然后决定它以下的低级机种的性能价格比成了通例。图10.1所示为标准的商用大型机在提高处理速度方面的平均变化。在1960年左右，用了7~8年性能曾提高10倍，其后比率钝化了。

另一方面，在第二代中以通用机为目的而研制的超大型机的技术成果，到了第三代作为标准大型机技术而被继承。现在的超大型机是把高速地处理大规模的技术计算作为目的专用机，与标准大型机向不同方向发展着，图中虚线表示了这种超大型机的性能提高。

其后，商用大型机的结构格式，到现在为止虽然逐渐地发生着变化，但并非是革新的变化。由于必须继承以巨大的操作系统为首的过去积蓄的庞大软件资产负担沉重，所以其实际情况已经成了不能进行革命性变更的状态。

有趣的是，小型计算机的产生与计算机系统的第三代是同时的。小型机缩小了字长且采用了简单的结构格式，因而实现了低价格，因此为扩大计算机系统的利用面作出了重大的贡献。

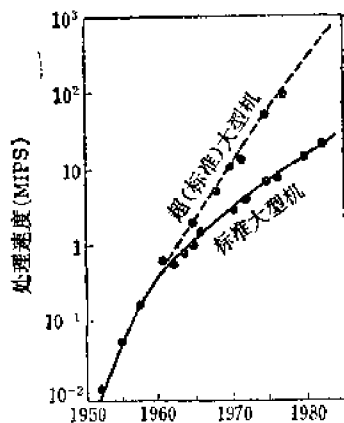


图10.1 商用大型机和超大型机处理速度的变化

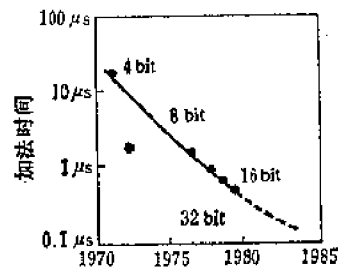


图10.2 微处理机加法时间的趋势

然而，更加迅速地发挥小型机的作用，是到了70年代登场的微机，微机中4比特，8比特的廉价品，已像使用家用电器一样被普及了。16比特的微机代替了过去的小型机，浸透到了所有的应用领域。因此，历来以为“计算机越大、性能价格比就越高”的经验准则，完全成了过时的观念了。图10.2所示为以加法时间（加法器时间）为尺度的微机的性能提高趋势。

由于微型计算机与过去的计算机没有联系，它的优点是能够采用崭新的结构格式。因而，甚至可以认为现在的微机的结构格式比僵化的大型机的结构格式有优秀的部分。然

而，正是由于微机具有广泛的普及的特性，所以即使对于微机也有标准化问题、软件积蓄问题，有着和大型机一样的问题，可以预想总有一天会到必须正视这些问题的日子。

10.2.2 计算机的结构格式

上一节介绍了商用大型机的结构，到了第三代后没有革新性的变化，但是人们作为研究还是进行了各种各样的新结构格式的提案和开发。

商用大型机提高处理速度方面钝化的事实，也证明实际上大型机的处理速度与专用件的性能改善相依存。正如后面要讲的，这暗示着大型机的元件的性能正在渐渐地接近极限。

另一方面，与大型机比较超大型机的性能之所以提高显著，是因为在结构格式上下了工夫的缘故。换句话说，还留有可能，采用新的结构格式而谋求高速化。这一点对于实时处理要求高的机器人特别重要。

CRAY、CYBER等现在销售的超大型机，采用实行管道方式运算的结构格式，这是以矩阵演算的高速化为目的的，所以把矢量数据一个接一个地送入运算线路的管道，让这些数据同时运算。因而，用这种方式的矢量计算的专用机也称为矢量处理机。

没被商用化的超大型机的其他方式，与其说它不是单纯的运算线路，不如说是并列配置了若干个有逻辑、运算机能的大型处理器。是由这些并列的处理器进行并列处理以求得到大规模计算，形成了高速化的并列处理器系统。最近，得到了了廉价的微处理器，这种方式才产生了现实的实现的可能性。

现在对处在研究开发阶段的并列处理系统，实际上，人们提出了各种各样的结构格式方案。最主要的问题是如何实现处理器之间通讯的硬件和软件，对此有各种各样方式。因而在这种并列的处理系统中，想确定一个标准的方式，无论怎样考虑都有困难。

现阶段，作为研究成功的系统被认为是所谓的用户主导型系统。这种系统首先要存在确有应解决问题的、认真的用户，研究对其问题的最佳算法，进而设计与其相适应的结构格式。以通用的并列处理系统作为目的的研究，不会马上成功的。以上问题是通用并列处理系统开发的难点，也是尽管对这方面的研究历史很长，但没有实现商用化的理由之一。

对于特定的问题，人们想办法建立对它最佳的结构格式，旨在实现比通用机性能高得多的专用机，在具有这种目的的专用机中，有以各色各样机能为对象的，其中之一就是高级语言机。高级语言机的研究历史也很早了，如图10.3所示，针对Fortran、cobol、Algol等主要程序语言的高级语言机的提案似乎提尽了。但是在真正的意义上实用的只有Lisp机。

这是由于Lisp的语言结构，特别地，并非面向现在的通用计算机，并且在人工智能领域中，有很多这样的用户，他们专门使用Lisp就足够了，有这样一种特殊的环境的缘故。其他语言的专用机，专用化的效果没有

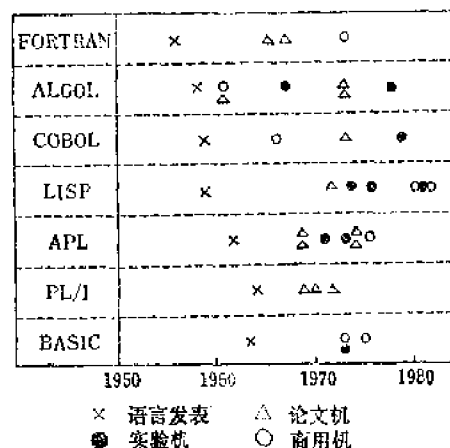


图10.3 高级语言机的开发

这么大是由于没有Lisp那样的用户的环境，所以没有普及。

然而，高级语言机的研制，并非把Lisp机作为终点，在语言世界中，有新提案的函数型语言、有在日本得到特殊关心的Prolog等新语言，针对这些高级语言的高级语言机的研制今后将会继续下去。而且，不能说将来机器人语言问题发生同样的情况的可能性不存在。

图像处理领域也是被人们期待着能大大地发挥专用机特长的领域，面向图像处理的专用系统的研究开发十分活跃。低水平的图像处理，是以二维象素为处理单位进行演算，并且并列演算多，所以，并不面向以数字或文字为处理单位，而且基本上是逐级处理的现在的通用机。

因而，即使是商用的大型机，通常对复杂的图像解析所需要的处理时间，也只是到了将要实用化并没实用化的程度，更何况动态图像的实时处理还在实用圈之外。这种现实的需要促使人们对图像处理专用系统的开发，比以往的通用机种的性能价格比高得多的专用系统的例子已有报告，有一部分已商用化了。另外，图像处理的方法渐渐地被整理出来，其软件标准化的推进都成了开发专用系统的有利条件。在实现作为机器人的输入机能的视觉方面，可以想到，一定会利用这种图像处理专用系统，只是程度上有差别而已。

在专用计算机中，还有来自其他应用领域，如通讯控制，声音识别与合成等各色各样的，但作为大的应用领域，还有管理数据库的专用的数据库专用机。在数据库专用机中，作为两个极端，既有在每个磁盘通道上设置专用的微处理器使其进行运算的类型，也有只把现存的数据库管理系统从主机上分离的所谓后置形。在两种类型中间有各种各样水平的专用机。尽管进行了长期的研究，至今仍处在研究开发阶段踏步的状态。然而，对于将来实现的大规模数据库和复杂的知识库来说，这些研究不可否定是有希望的研究。而且，也许机器人用的数据库机的问题成为现实问题的日子，说不定会意外地早早地到来。

与各种各样的专用机在某些方面类似的，人们也在进行研究，把计算机系统的整体机能，让若干个微处理器分别分担的机能分散系统。迄今为止的计算机系统，是使一片处理器得到尽可能高的性能，希望用庞大的软件实现一切机能。与此相反，将来的计算机系统，不管是什么水平，选择机能分散化的道路是当然的方向。机器人的情况，也是机能越高越向着机能分散化发展，如果考虑实时处理的要求高的话，机能分散化将会越来越成为自然的取向。

最近，用通信方式把邻近的分散计算机结合起来，谋求计算机群的整体有效利用的计算机网LAN引人瞩目。这虽不是结构格式的问题，但作为今后计算机利用的大方向，可以认为会迅速的普及。机器人方面，也可以想像到多台机器人按照LAN的协同动作的将来的无人化工厂，未必是梦中的故事。

最后，我们要涉及与过去的计算机格式结构本质上不同的引人注目的数据流计算机。过去的计算机的执行过程，是命令逐次控制的流程，支配运算的执行，在这个意义上被叫做控制驱动形。和这不同的，人们提出了种种方案，把运算中的必要数据收集起来，直接地实行运算，以求得数据流方面具有主导权的数据驱动形的格式结构。

关于用这种与过去考虑方法完全不同的设计思想去实现计算过程的数据流计算机，对其结构格式的具体设计，进而关于更适合它的语言的提案等的研究有相当的进步。然而，它尚在研究开发阶段，为了证实它比经过长年累月孜孜不倦地构筑起来的现在结构有更加

优秀的性能价格比，必须更勤恳，踏实的研究。

以上是概观计算机结构格式的最新动向，我认为这些方面给予将来的机器人的影响，绝不能低估。

10.2.3 计算机软件

从现在的计算机软件技术方面来看，要找出机器人在工作时的特殊技术，是相当困难的。

例如，为了具有通用性，现在通用机的操作系统成了一个巨大的系统，但如果考虑机器人的操作系统的话，它的目的是把专用化的高效率实时监视器作为主流的。另外，与现在的事务上应用为主体的计算机比较，机器人方面则要求高得多的可靠性。因而，它的RAS技术（可靠性、可用性、可维修性）是重要课题。进而，如果将来机器人采用机能分散系统的形态的话，其操作系统也会是分散形的。

然而，在机器人的情况下，计算机使用的环境是这样的不同，以至难以考虑本质上不同的软件技术的要求。这些软件是现在计算机软件的延长线，例如，最有亲近关系的加工控制用计算机上类似的软件正在实用化，只有程度的差别而已。

软件的生产率的提高不如过去那么快，引起了人们的焦躁，从技术经济观点曾发生过软件的危机和引起人们不安。其后，人们想把软件的生产工程在工程学方面体系化的动向很强，并把它作为现在的软件工程学的一个领域。在实际设计软件产品的规格前，为了明确规定所要求的规格语言的研究等，这些方面的研究，都是过去漏掉的。这些研究的进展，对软件的体系化会切实地做出贡献。

工业产品的设计、制造自动化的CAD/CAM的领域，现在非常活跃。实际上，很大原因是因为关于设计的过去非常贵的计算机绘图的硬件变得便宜了，而且有实用价值的绘图学的基本软件普及起来了。

还有，在这个领域中，包括必要的数据库的更加综合的CAE（计算机辅助工程）的考虑方法也被提倡。从机器人的立场来看，这种CAD/CAM/CAE的进展中，将把机器人的能力和效果置于什么位置，是今后有趣的课题。

10.3 设备技术

10.3.1 计算机用设备

半导体LSI技术的飞速进步将给计算机系统今后的发展极大的影响，是没有异议的。它对机器人的硬件也将给与大的影响，也是确实的。

图10.4所示为代表性开关元件传递的延迟时间和消费电力的关系。作为大型计算机的逻辑元件使用的ECL、CML等的开关速度，大致为1ns，它的速度快但消耗电力很大。因而随着元件的集成度提高，每个触头消耗电力竟达数瓦，这种触头散热与冷却用的实装技术，最近成了大型机的重要问题，被认为是大型机的处理速度提高之所以钝化的重要原因。

另一方面，人们希望半导体元件集成度飞速提高，即所谓的超LSI，研究耗电小的MOS的问题的主流。作为微细加工的尺寸门脉宽的设计基准，一到了1 μ m以下，过去的

光刻技术就不适用了。因而，人们开发了用光学缩小翻拍使用电子束制成的掩膜方法，开发了由电子束直接描画，进而利用软X线翻拍等技术。另外，与这些微细化技术相应的，半导体的加工技术也进步了。

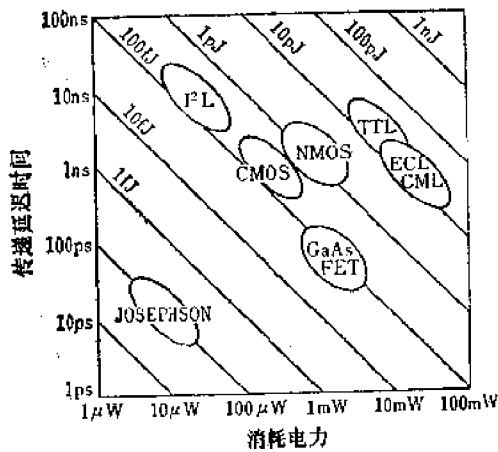


图10.4 开关元件延迟时间和电力消耗

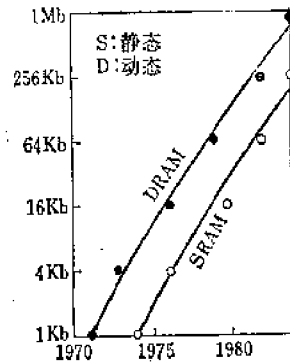


图10.5 存储器芯片的记忆容量

现在的半导体元件制造厂，为了取得批量化效果，正在变成大规模的工厂。上述的超LSI技术，在批量生产上仍存在问题，但随着对这种元件的需求增加，大概可以克服制造技术上的难点。

最直接得到这种LSI技术进步的实惠的，是逻辑结构简单的计算机存储器。图10.5所示为存储器的芯片集成度提高。图中开始时的增长趋势虽没有每2年增加一倍，但至少是每3年增加到4倍左右的集成度。其中原因，不仅有纯技术问题，而且也有经济上的理由，即从制造商立场上看，在没有回收完在制造设备上的投资，难于推出新的产品。

现在已经有每个芯片1M比特的存储器成为现实的东西了。这种存储器集成度的迅速提高，将有助于计算机系统以及终端装置等的价格大幅度下降，性能大幅度提高。

在处理器方面，由于逻辑结构复杂，集成度问题没有存储器那么简单。首先，如果提高集成度逻辑结构就更复杂，为此，物理的配线量就会迅速增加。这样，实际地减小了芯片的有效面积，与此同时，引起来自配线的信号的延迟，结果处理速度下降。为克服这种难点，人们研究了芯片内多层配线技术，但多层化也是有限度的。

一般，从系统的观点看，逻辑LSI的集成度如果提高，则设计的费用和时间会急剧增加。然而，每个LSI的机能的价格下降，则使用得越多越合算。然而，机能一旦提高，与低机能的比较，被使用的系统数就会减少。要兼顾这些方面，然后决定作为系统的LSI的集成度。

现在计算机系统处理的门的数目，小型机1万门左右，大型机数十万门。设计这样集成度高的LSI，如果没有CAD的进步，几乎是不可能的。特别是为了使微处理器的LSI大型化，不单是LSI技术的进展，还有为了能批量化生产的标准化问题、软件问题、与已存系统的关系问题等各种各样的原因，是很复杂的。但是，还没有人认为微机进步快接近极限了。

比起现在的单晶硅材料来，作为将来的元件，人们正在研究化合物半导体GaAs元件、作为极低温元件的约瑟夫森元件。这些是在原理上延迟时间、耗电极小的元件（参照

图10.4)，但还在研究开发阶段，实用化的可能性仍是未知数。

10.3.2 感觉设备

机器人为了取得外界信息，首先需要作为窗口的传感器，有没有良好的传感器，对取得信息的能力有很大影响

传感器的材料大致分为半导体材料、陶瓷材料、金属材料、有机材料等多种，各自发挥着各种材料的固有特性的作用。例如，耐热、耐蚀、耐磨损的强陶瓷，是高温、潮湿等恶劣环境下不可少的材料。另外，金属材料传感器过去多用于机械式或电磁式传感器，最近出现了像记忆合金那样的有趣的合金，它可作为执行元件，具有机能变换的可能性。有机材料传感器，叫做生物传感器也好，酶传感器也好的酵素膜等已实用化了。

微机的普及是促进传感器研究开发的一个因素。特别是关于半导体传感器，由于半导体元件制造技术的进步，在技术上普及的结果，又由于它有如下优点：传感器和逻辑、演算、记忆等元件可以一体化地制作出来，所以最近进步十分显著。

对于智能机器人，重要的图像传感器中，人们正在开发小型摄影机上用的具有 800×800 像素的分辨率的半导体传感器，另外，在一维的像传感器中，有16线对/毫米分辨率的4096像素的传感器。像这种程度的图像传感器，能用作机器人的视觉，作为装置，它的集成度还会继续提高。还有，人们正在以彩色摄像机为目标，开发推进固体摄像装置，并改良滤波器，逐渐地使其性能得到提高。

在检测力学量的半导体传感器中，除了利用应变片外，我们还知道检测位移和位置的利用霍尔效应的磁传感器。随着机器人应用范围的扩大，可考虑利用这些传感器的可能性。

以上不过是介绍了极为简单的传感器，但我认为机器人的传感器尚未到真正的研究阶段，今后，随着对机器人用传感器需求的高涨和装置技术的进步，这是一个被期望发展的领域。

10.4 人工智能的研究

到了60年代，被认为是信息处理的新领域的人工智能，是研究用计算机实现人类所具有的智力机能的，以此为目标的研究已经有20年以上的历史了。

人们进行了种种研究，其中的一个大的分支是从解决问题的方法开始的，作为其具体的结果，已提出了各种人工智能语言的方案。作为记号处理用语言，有60年代初被提出的、至今仍在广泛地使用的人工智能语言Lisp，与此不同，Planner、Conniver、Small-talk、Prolog等其它许多人工智能语言几乎都是70年代被提出的。这些语言是面向那些适合于推论过程的问题的。

利用这样的语言，研究具体的解决问题的事例时，突出地表现出解决问题所必要的知识问题，在框架结构上怎样去表现这些知识且有效地加以利用，是个大的研究课题，人们研究了种种的方法，从这个观点出发的人工智能的研究和开发，现在也叫做知识的科学或知识工程学。

人工智能的另一个大分支，与上述分支所追求一般方法论的倾向比较，其目标是具

体地研究用计算机去实现与人类的视觉、听觉相当的机能、进而理解自然的语言等。这其中，理解输入图像的计算机视觉的研究，包括声音识别在内的自然语言理解的研究，成了现在人工智能研究的大的领域。另外，这些研究也可从意味着人和机械的相互作用的人—机通讯的研究中找到。

像这样的两个分支，当然不是相互独立的。是相互联接相互促进的。如果把人工智能作为一个系统的话，可以考虑分为有关推论过程、知识库和与人类通讯等三个大部分。

对于人工智能的研究成果，过去也好、现在也好，不同人有不同的评价。有的人认为它只能实现远比人类的智力机能低得多的能力，转向失望，有的人则相反，对于在最近的将来不能实现的东西，抱有乐观、焦急的期待。

然而，无论对这种广泛的评价正确与否，人工智能的研究，虽然对于要达到的目标来说还差得很远，但已切实地积累了研究成果。另外，借助于计算机系统的进步，研究成果变成实用的、正在接近实用圈内的研究已相当引人注目。

限于篇幅，以下介绍各领域概略的现状。

10.4.1 图像理解

从计算机的输入图像中，以提取的信息作为对象，建成模型，利用已知的知识，判断输入的图像表示什么，叫图像理解。图像理解技术，与被称为计算机图学、图像处理等领域共同技术很多，但最终的目的却有本质的不同。

关于图像特征的提取，以前就开发了各种方法，曾是某一个时期的研究中心。最近，人们整理了研究结果，使之成为可利用的基本的标准的子程序包。

然而，根据从图像得到的信息，建立关于对象的模型及有关图像知识的表现法等，实际状况尚处在“终于开始研究”的阶段。

为了构成关于对象的模型，往往需要图像的照明条件、有关对象的物理条件等的预备知识。如自由曲面形状的判定、结构的识别、关于物体深度信息的了解等，相关的问题很多，对于复杂的对象，是困难的课题。

关于图像模型与已存知识间的对照，例如，从航空照片中提取的图形与地图之间相应对照，使两者之间位置重合、对照顺序等都是问题。在一般情况下，如何得到相当于地图的已存知识是个大问题。

然而，关于图像理解的现状虽然问题不少，但根据限定问题的领域不同，实现作为机器人的视觉的想法，即使在目前的技术水平上也有可能，人们正在推进实用化。

10.4.2 声音识别与自然语言的理解

限定识别语汇的单词声音识别装置，已有产品销售了。还有，声音合成技术比识别技术先一步成了实用技术。作为机器人与人对话的手段，为了理解这些意义必须具有：语言本身的知识、作为常识不得不具有的知识、关于句子状况的知识及专门知识等等。

关于知识的利用和表现问题，如前所述，是人工智能的中心研究课题，人们提出了各种意义上的框架结构，术语的逻辑、意义的网络、制造的规则、结构、手写体等等，正在试用中。

语言的意义论是语言学、伦理学从很早前就追求的深奥问题，按照进行人工智能研究

的技术上的框架结构，能在什么程度上去理解意义，直率地说是难预测的。但是，限定问题的领域，问题可以在某种程度上单纯化，所以，人们正在积极地试验提问回答系统和语言理解系统。另外，限定目的的机械翻译系统的研制同样处在研究开发阶段。

10.4.3 专家系统

作为数据库，事先准备关于特定的专门领域的知识，对于来自用户的询问，根据从知识库中的推论，提取有用的解答，这样的系统叫做专家系统。由于限定专门领域，容易制成知识库，它把推论和知识库这一人工智能的很早就研究的课题与实际问题的结合起来了，公认有很大的意义。

目前，人们正在积极地开发种种专门领域的系统，最常用的数据库是生产制造规则构成的。生产制造规则是“如果 X 的话就实行 Y ”这种形式的规则，这种条件中也能让其包含某种不确定性。在适合于多数规则的情况下，按照推论决定优先的顺序。

这样的专家系统在今后的各种领域中试用就可以对其有用性进行评价，然后考虑将来继续开发更具有柔软性的结构，构筑更大规模的知识库，和能灵活地运用于用户愿望的推论结构。

10.4.4 生物信息处理

了解生物体特别是人的智力活动为目的的生物信息处理，也在广义上属于人工智能领域的一个部分，人们正在进行有关的基础研究，这个领域从前是从心理学、生理学等方面研究起来的，但这些研究虽然与生物信息处理有重复的部分，在方法论上是有差异可区别的。

目前生物信息处理研究的主流是基于生理学知识，尽可能地模拟人类的智力机能。作为基础的模型，既有像神经系统那样微小的东西，也有像感觉器官那样的宏观上的东西，但无论在什么场合下作为模拟的有用工具，都是利用计算机这一点是共同的。

曾经有过这样的时期，盛行把神经元作为模型去识别、去学习。另外，有人提出作为声音识别模型的音调参照说。还有，还盛行关于视觉的各种各样的模型的提案和实验研究。还有，作为这些基础的认识科学，也十分活跃。

然而，生物信息处理机构和计算机硬件，有本质不同，特别是关于生物的机能神经元的数目相当于使用大型计算机所用的门数。因而，为了把生物信息处理研究中得到的知识，原封不动地在工程上加以利用，被认为是相当困难的。

目前，想要用工程学方法实现人工智能的研究与生物信息处理的研究之间，还有着相当的距离。但是，了解人类理智活动这一欲望也是人类理智活动。所以虽然道路漫长，研究仍会进行下去。而这种基础研究的成果对于人工智能将来的研究，尚且不能认为是有用的东西。