

工业机器人技术的现状及其展望

余 达 太
(北京钢铁学院)

摘 要

“综合技术”是现代科学技术发展的一大特点。机器人就是综合技术的典型代表。它是自动化技术高度发展的产物,也是控制论、仿生学、计算机科学以及运动学、动力学的研究目标之一。本文全面介绍并分析了目前国外工业机器人技术,特别是工业机器人的传动机构及其控制技术的现状、存在问题及今后的研究课题。同时也对未来机器人作了预测与展望。

一、工业机器人的定义及其分类

工业机器人的问世,大约是25年前;微处理机的诞生,大约是15年前。正是由于微处理机的出现,以及各种LSI、VLSI的飞跃发展,才使得工业机器人控制系统的机能大幅度提高,从而使数百种不同结构、不同控制方法、不同用途的工业机器人终于在八十年代,真正进入了实用与普及的阶段,并发挥了令人难以置信的巨大威力与经济效益。

那么,什么是工业机器人?回答是令人遗憾的。因为关于工业机器人的定义,仍在专家们的争议之中,至今还没有人能够提出一个令人信服的明确定义。美国机器人协会(RIA)对机器人的定义是:“所谓工业机器人,是为了完成不同的作业,根据种种程序化的运动来实现材料、零部件、工具或特殊装置的移动并可重新编程的多功能操作机。”日本产业机器人协会(JIRA)的定义是:

“所谓工业机器人,是在三维空间具有类似人体上肢动作机能及其结构,并能完成复杂空间动作的多自由度的自动机械”或“根据感觉机能或认识机能,能够自行决定行动的机器(智能机器人)。”

不管各国机器人专家们如何定义和解释工业机器人,有一点是可以明确的,这就是人们开发研究工业机器人的最终目标,在于要研制出一种能够综合人的所有动作特性——通用性、柔软性、灵活性的自动机械¹⁾。

目前,工业机器人象计算机一样,可以按“代”进行分类。

第一代工业机器人。所谓第一代工业机器人主要是指T/P方式(Teaching/Playback方式,示教/再现方式)的工业机器人。即为了让机器人完成某种作业,首先由操作者将为了作业的各种知识(例如:空间轨迹、作业条件、作业顺序等)通过某种手段,对机器人进行“示教”,而机器人的控制系统则将这些知识记忆下来,然后再根据“再现”指令,逐条取

本文于1985年4月13日收到。

1) ISO于1984年12月的巴黎会议上进行了统一定义。

出这些知识。经过解读之后,在一定精度范围之内,反复忠实执行各种被示教过的复杂动作。目前,国际上商品化与实用化的工业机器人,绝大部分都是这种 T/P 方式,也就是所谓的第一代工业机器人。

第二代工业机器人。所谓第二代工业机器人,是指具有一些简单智能(如视觉、触觉、力感觉等)的工业机器人。第二代工业机器人早在二、三年前就已获得实验室性的成功,但是由于智能信息处理系统的庞大与昂贵,尚不能普及。

第三代工业机器人。所谓第三代工业机器人是指具有自治性的工业机器人。即不仅具有视觉、触觉、力感觉等智能,而且还具有象人一样的逻辑思维、逻辑判断机能。机器人依靠本身的智能系统对周围环境、作业条件等作出判断后,即可自行进行工作。第三代工业机器人目前刚刚进入探索阶段,在第五代计算机问世之前,恐怕难以实现。

根据其信息输入方式、示教方式、动作形态、自由度、负载能力、动作领域、动力源等,工业机器人也可进一步从技术上进行分类。

1. 根据输入信息,示教方式分类(主分类)

工业机器人根据其作业顺序、位置或路径等信息的设定方式的不同,可有表 1 所示分类方式。

表 1 根据输入信息、示教方式分类

记 号	类 别
A	操纵机械手 (Manual Manipulator)
B	固定程序机器人 (Fixed Sequence Robot)
C	可变程序机器人 (Variable Sequence Robot)
D	再现机器人 (Playback Robot)
E	数控机器人 (N. C Robot)
F	智能机器人 (Intelligent Robot)

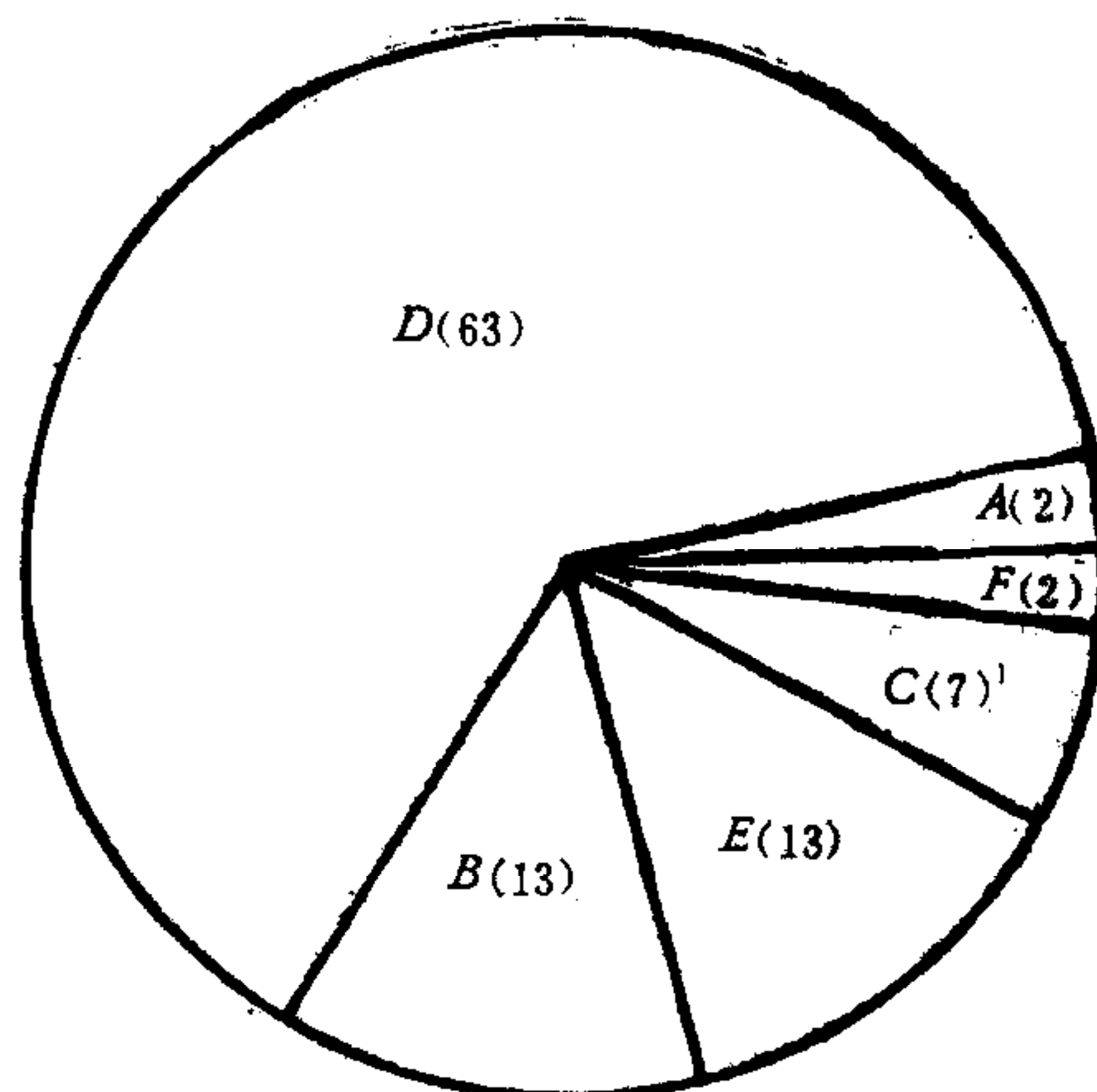


图 1 1984 年日本工业机器人产品类别(%)

图 1 反映了 1984 年国际市场对各类工业机器人的需求情况(该资料为北京钢铁学院机器人研究室对 1984 年日本 159 个厂家的机器人产品的分析统计数据)。其中, T/P 方

式工业机器人已占主导地位。

2. 根据动作形态分类(以下为副分类)

工业机器人的动作形态,是由几个不同的单位动作如伸缩、回转、转动等组合而成。其动作形态可归纳为表 2 所示 4 类:

表 2 根据动作形态分类

参考图	类 别
图 A	直角坐标形机器人 (Cartesian Coordinates Robot)
图 B	圆筒坐标形机器人 (Cylindrical Coordinates Robot)
图 C	极坐标形机器人 (Polar Coordinates Robot)
图 D	多关节形机器人 (Articulated Robot)

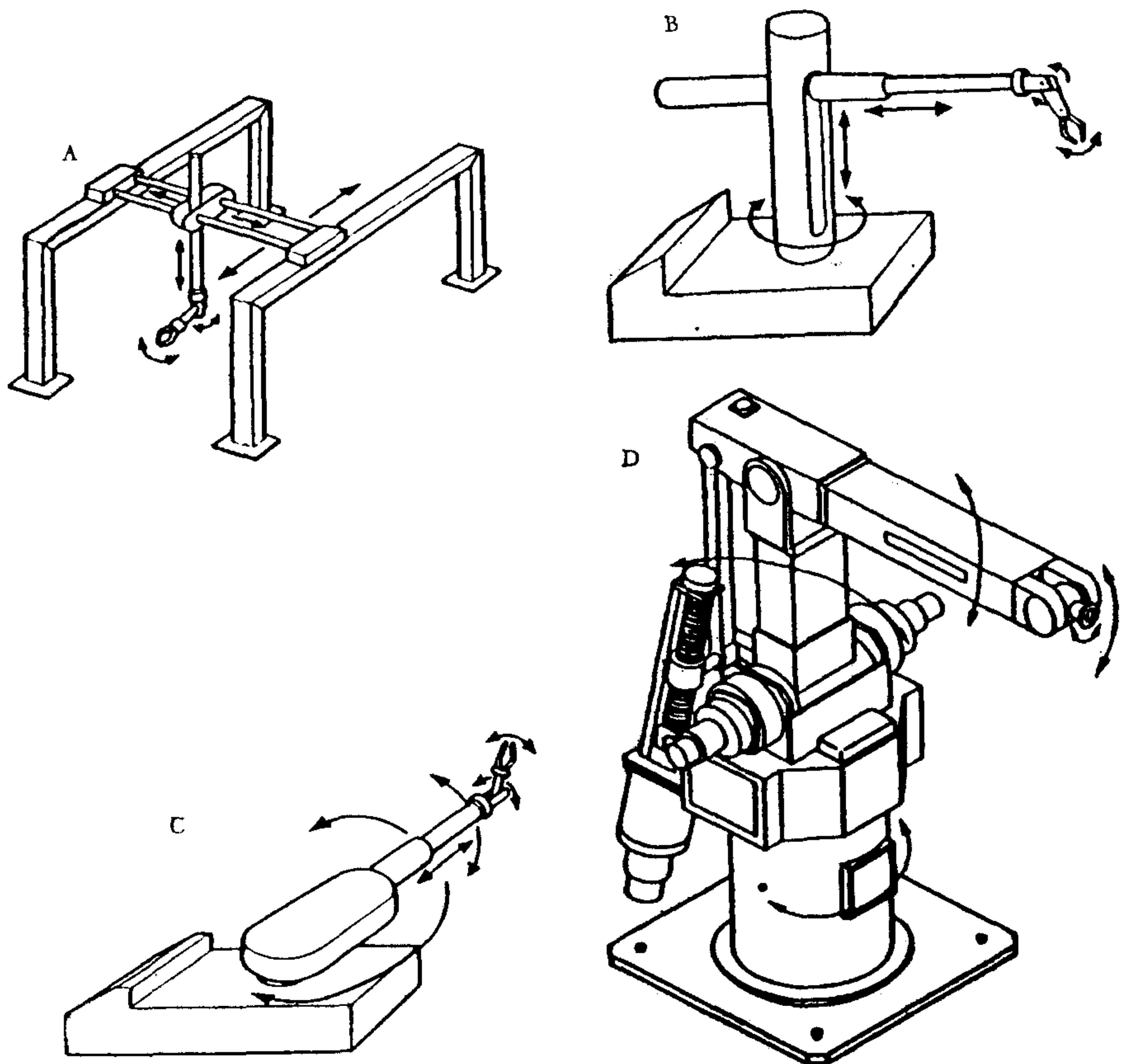


图 2 不同动作形态的工业机器人

3. 根据自由度分类

自由度是表达机器人通用性、灵活性的主要指标。我们将机器人的单位动作组合数称之为自由度。一般随着自由度的增加,机器人的通用性、灵活性也大幅度提高,但是反之,由于机构变得更为复杂,所以控制系统及控制手段也相应困难起来。因此,评价一台工业机器人往往不能只看其自由度的多少,而要看其实际效果。目前,一般商品化的工业机器人大多在 3—7 个自由度之间。

4. 根据负载能力与空间动作领域分类

负载能力与空间动作领域是表达一台工业机器人的本体大小及其“力量强度”的指标。

表 3 根据负载能力与动作领域分类

类 型	负载能力与空间动作领域
超大型机器人	1t 以上
大型机器人	100kg—1t 动作领域 10m ² 以上
中型机器人	10kg—100kg 动作领域 1m ² —10m ²
小型机器人	0.1kg—10kg 动作领域 0.1m ² —1m ²
超小型机器人	0.1kg 以下 动作领域 0.1m ² 以下

5. 根据顺序信息分类

所谓顺序信息是指机器人软件程序的机能,它表达了机器人的智能水平。

表 4 根据顺序信息分类

名 称		定 义	
操纵机械手		直接操作形的机械手	
单机能机器人		仅具有固定记忆机能的机械手,这种控制装置无法实现多种反复作业。	
反 复 作 业 机 器 人	单纯反复 作业机器人	固定程序	作业程序难以变更的机器人。
		可变程序 (1)	作业程序容易变更,而且根据程序可以进行固定顺序控制的机器人。
		可变程序 (2)	作业程序容易变更,而且具有作业条件分枝机能的机器人。
	多种反复 作业机器人	可变程序	具有多个作业程序,根据指令或作业条件,作业程序可以自由选择或自动选择的机器人。
智能机器人		根据感觉机能或认识机能,能够自行决定行动的机器人。	

6. 根据动力源分类

动力源是指驱动机器人可动部分的传动方式,一般多采用电动、液压、空压三种方式。

7. 根据 RANK 的分类

RANK 是表达机器人所具有的回转关节数。RANK 的大小,决定了机器人的位置,姿势运算的繁杂程度。

RANK 与自由度的关系为

$m = n - 3$, 直角坐标形;

$m = n - 2$, 圆筒坐标形;

$m = n - 1$, 极坐标形;

$m = n$, 关节形

(m : RANK n : 自由度)。

表 5 RANK与自由度的关系

自由度 RANK	1	2	3	4	5	6	7 以上
0	直角坐标形		冗长 机器人				
1	圆筒坐标形						
2	关 节						
3	极 座						
4	节 形						
5	机械约束机构		形				
6							
7 以上							

上述 1, 3, 4, 5, 7 项的分类情况是很容易理解的, 下面我们仅对 2, 6 项的分类作进一步的技术解说。

二、工业机器人的结构、执行机构及其控制方式的技术现状及其问题

不同用途的工业机器人, 根据其结构、执行机构与控制方式的不同, 有着不同的评价标准。

1. 机械结构

1) 直角坐标形机器人

直角坐标形机器人的作业精度很高, 这是因为它不需要进行坐标变换, 沿着导轨部移动的工件也不发生姿势的变化, 所以控制非常简单。因此, 直角坐标形机器人目前多用于精密装配, 搬运(配合数控机床)等作业。如果在其手部追加自由度的话, 也可用于特殊焊接作业。其最大缺点在于机器人本体占地面积大, 而动作范围小, 缺乏灵活、柔软、通用性。

2) 圆筒坐标形机器人

圆筒坐标形机器人动作领域较大, 但手臂后侧占有很大静区。由于其垂直面是直交形, 而水平面是极坐标形, 故需要进行坐标变换计算及被加工对象的姿势控制。这种类型的工业机器人主要用于搬运作业。

3) 极坐标形机器人

极坐标形机器人的占地面积与其空间动作领域相比较小, 但也是由于需要进行坐标变换计算和进行被加工对象的姿势控制以及需在其手部追加自由度之后, 才能发挥其灵活性, 所以控制难度较大。目前, 极坐标形机器人主要用于点焊和喷漆等作业。

4) 多关节形机器人

与 1)–3) 类机器人相比, 多关节形机器人本体占地面积最小, 而动作范围最大, 虽然它需要进行多次坐标变换及进行对被加工对象的姿势控制, 使得控制系统难度最大, 但由于它的空间速度快, 灵活性、柔软性、通用性好, 且最接近于人手的构造, 所以多关节形作为今后机器人的发展方向, 受到极大的重视。目前, 它主要用于连续路径电弧焊、装配、喷漆及各种智能系统。

2. 执行机构

从执行机构的历史来看, 一般机械系统基本采用三种典型的驱动方式, 即电动、液压与空压三种。工业机器人可动部的执行机构的开发, 也是沿用这三种基本原理, 只不过是按照机器人的特殊运动与作业要求, 在生产加工技术上下了不少功夫而已。

1) 电动执行机构

电动式的执行机构不仅能源容易得到保证, 而且随着微电子技术的飞跃发展, 电动执行机构的控制系统的构成也越来越简单, 加之位置控制, 力控制很容易实现, 因此, 是最能满足于各类机器人的要求, 也是目前最普及的一种驱动方式。

10 年前, 直流伺服电机的输出功率/重量比较低, 系统的响应性比液压、空压的差, 所以主要用于轻负载工业机器人中。但是, 最近由于采用稀土类磁性体的强磁场型, 永磁低惯性大扭矩的直流伺服电机、直线电机等的出现, 使得 200kg 负载以下的各类工业机器人都已开始转向这种驱动方式。另外, 随着交流电机控制技术的日益成熟, 电动执行机构的最大缺点, 即防爆性差, 也得到根本的解决。因此, 从今后的发展趋势来看, 电动驱动方式必将成为工业机器人的主流。

2) 液压执行机构

液压驱动系统一般由液压源、各种阀及传动机构所组成。由于液压系统根据液体的压力、流量的控制, 可以改变执行机构的输出功率和速度, 所以与电动驱动方式相比, 无需减速装置。根据液体的高压化, 可以得到输出功率/重量比很大的驱动系统。再有, 由于系统的刚性较高, 所以可以得到高精度的位置控制。目前实用化的工业机器人中, 特别是大型作业机器人中, 主要采用这种驱动方式。液压执行机构虽然其系统刚性较高, 可以实现高精度的位置控制, 但很难实现力的控制这是液压执行机构的缺点。要想进行力的控制, 必须在其液压回路中设计其它控制阀, 这将大大降低系统的效率。此外, 液压源体积较大、移动不便, 以及液体内一旦混入杂质, 将造成系统故障, 加上漏油等, 都是令人头疼的问题。不仅如此, 一般为了控制的方便, 尽管是液压系统, 通常也以电信号为控制信息, 所以电气-液压变换装置是必不可少的, 这又造成了控制系统的复杂性。

3) 空压执行机构

空压系统的构成, 大体上与液压系统相同。由于空压方式的动作媒介是空气, 所以系统极为简单。因为动作媒体具有压缩性, 所以刚性差, 无法进行位置控制。目前一般只用于极简单的顺序形工业机器人中。但是, 空压系统的优点是力控制比较容易, 特别是具有防暴性, 输出功率/重量比高。最近, PTP 型空压再现工业机器人也开始出现。虽然仅为有数的几台, 但已有从简易形向高机能机器人发展的趋势。

4) 执行机构的课题

随着工业机器人的系统化与智能化, 小型、轻量、多自由度、一体及具有爆发力和柔软

性的机器人执行机构,已作为新的技术开发课题,越来越受到人们的重视.例如,模仿人体肌肉动作的机构;利用形状记忆合金方式的机构;将化学反应转变为机械运动的机构;相当于数十至数千个人体骨骼肌肉运动的超小型并行驱动机构;利用弹性体的振动能源的超声波电机以及双手臂机构;双足或多足行走机构等的研究,都已获得不同程度的实验室性的成功.可以期待在不久的将来,这些新型执行机构将出现于新一代机器人系统之中.

3. 控制方式

工业机器人诞生以来,在喷漆、焊接、搬运等产业中逐步普及后,又开始向高度智能化的产业领域发展. 机器人技术之所以得以如此迅速地发展,除了社会的进步与要求之外,最重要的原因就在于控制技术的进步. 近年来,由于各种微处理器,各种 LSI, VLSI 的不断更新以及低惯量大扭矩直流伺服电机,大容量晶体管, GTO, FET 等大功率电子产品的进步及软件技术的发展,使得工业机器人的控制技术已经实现了电子化、集成化、数字化及软件化.

一般, T/P 方式工业机器人对控制系统有如下要求:

- 1) 对外部环境(包括作业条件)的检测,感觉机能;
- 2) 对作业知识的记忆机能;
- 3) 位置控制,加减速控制机能;
- 4) 时间、外部输入、输出等机能;
- 5) 反复动作指定机能;
- 6) 工作程序的有条件、无条件跳转机能;
- 7) 对外部设备的控制机能等等.

目前,上述机能只有采取以微处理机为核心,根据其软、硬件的巧妙配合才能很好地实现. 一般工业机器人的微处理机直接控制系统,基本上大同小异. 系统框图如图 3 所示.

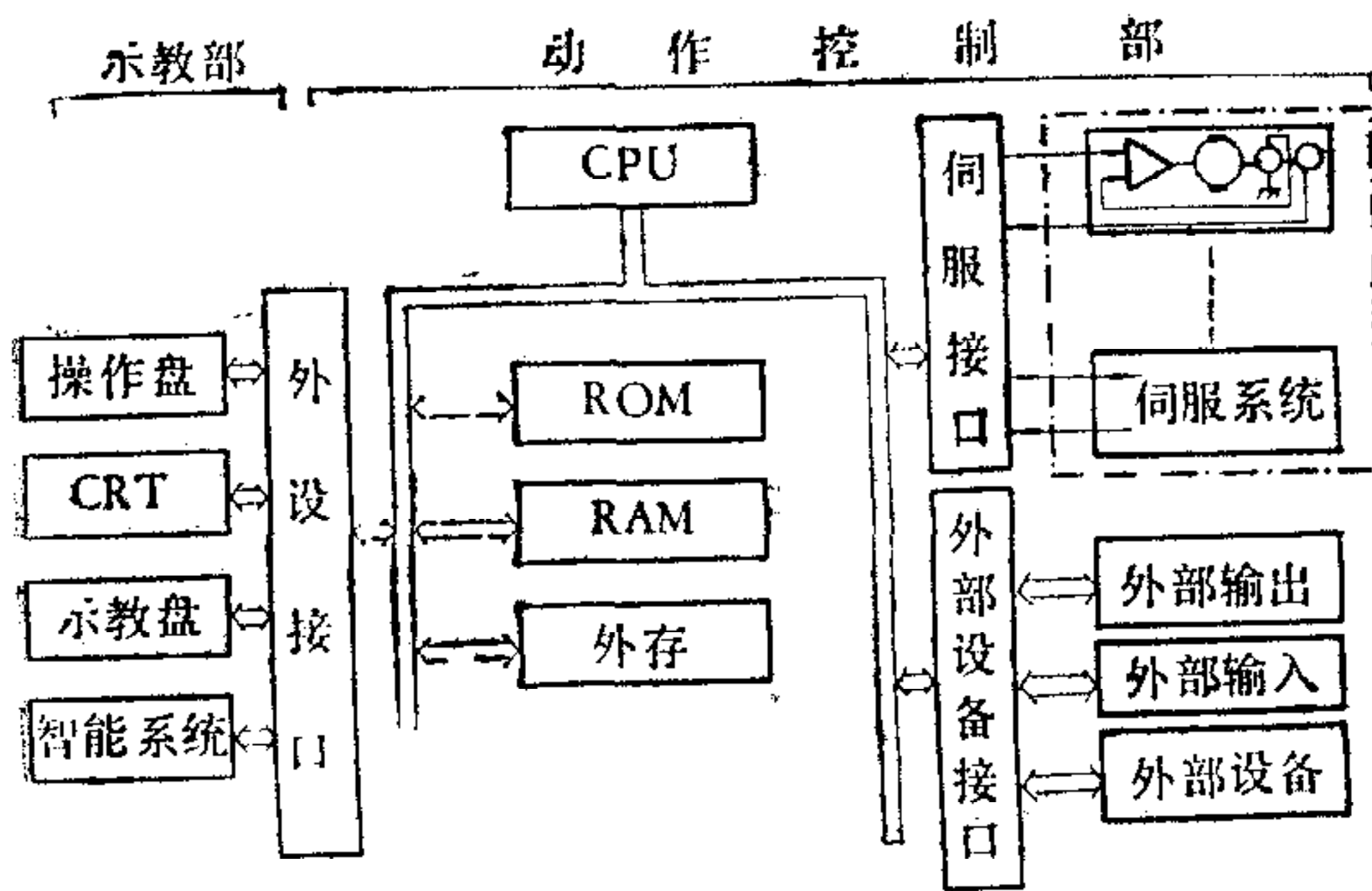


图 3 工业机器人微处理机直接控制系统框图

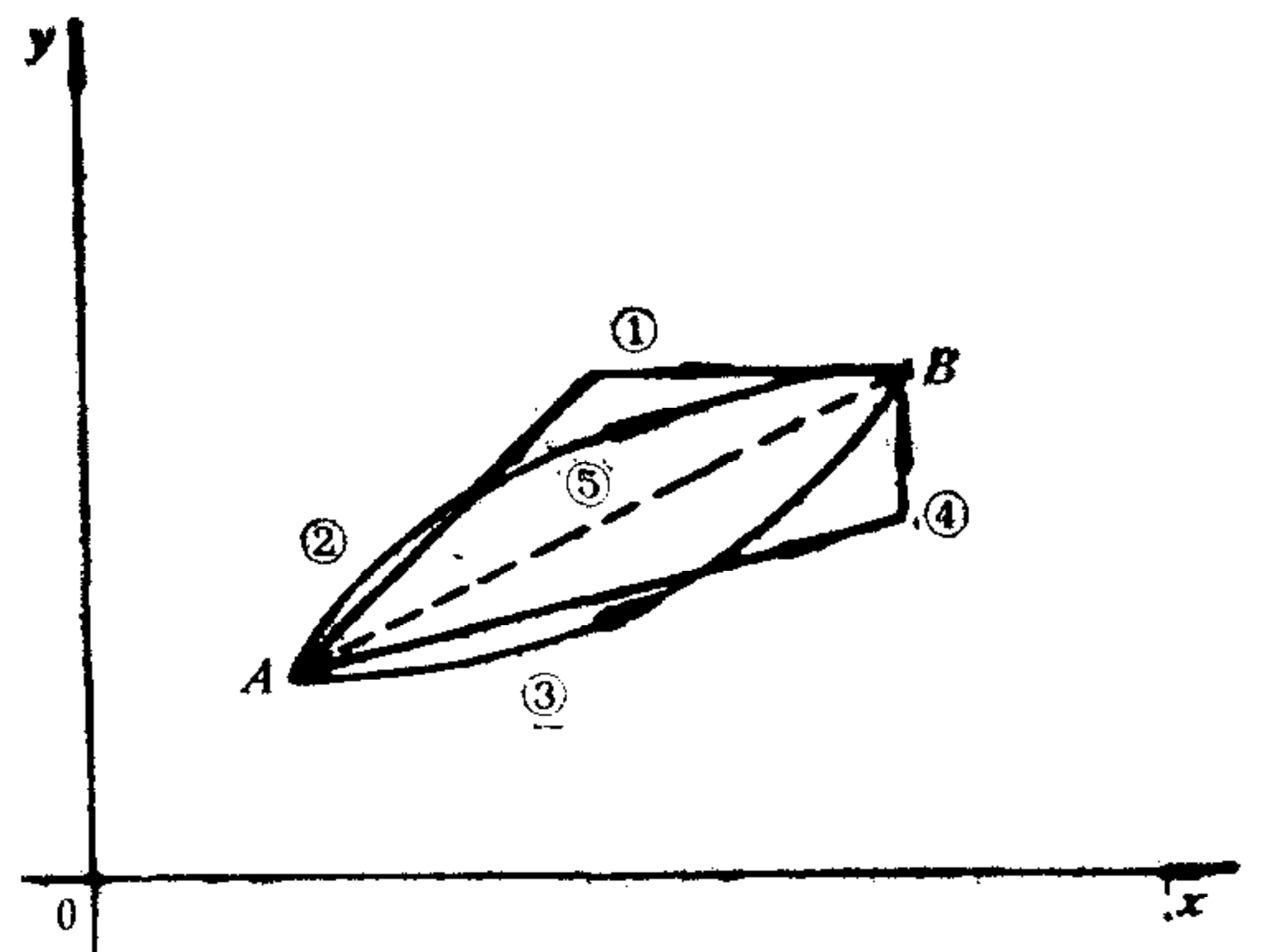


图 4 PTP 控制的动作

这种以微处理机为核心,对机器人进行直接控制的系统,通用性很强. 它不受机器人本体结构的影响. 同样一个硬件系统,只要分别改变系统软件及部分接口线路,就可以适用于多关节形、直角坐标形、圆筒形或极坐标形机器人.

目前, T/P 方式工业机器人控制技术的核心问题在于动作控制方式与示教方式.

A. 动作控制方式. 动作控制方式是决定让机器人的动作机构部从一点向另一点移动时,如何实现其位置控制、速度控制及加速度控制的问题. 现在的工业机器人一般采用下述两种控制方式.

- (1) PTP 控制(Point To Point). 这种方式的特点在于我们只关心目标点,而不考虑

空间两点的移动路径。如图 4 中的①—④, PTP 控制比较简单, 一般只用于简单的搬运、焊接、送料等作业。机器人中 PTP 控制属于低级控制水平。

(2) CP 控制 (Continuos Path)。所谓 CP 控制就是连续路径控制, 即我们不仅关心机器人到达目标点的精度, 而且必须保证机器人能沿着我们所希望的路径在一定精度范围内移动。例如图 4 中的⑤。CP 控制比较复杂, 它需要通过各种插补运算, 进行多轴脉冲的同时分配, 才能实现精确的空间轨迹。一般连续电弧焊、切削作业、喷涂作业、封接作业等必须采用这种方式。CP 控制属于高级控制水平。在 CP 控制中, 大量采用的直线或圆弧插补方式有 DDA 方式、最小偏差方式、BRN 方式、BRM 方式等。最近, LSI, VLSI 技术发展很快, 很多具有特殊机能的芯片不断出现, 基于新原理的完全等脉冲分配已经可以实现。

这里值得指出的是, PTP 控制与 CP 控制过去是数控机床中的技术用语, 而现在用其表达机器人的控制机能, 含意是大不相同的, 其主要区别在于:

① 非点位控制机器人中的“PTP”实际上是指图 4 中的⑤那样的动作, 即直线插补运动。

② 数控机床中的 CP 控制, 一般是“全路径指定”控制方式。而机器人中的 CP 控制通常是“多点指定”(例如圆弧: 3 点指定; 圆: 4 点指定等) 控制方式。即根据多点空间坐标变换, 利用单纯折线的 PTP 控制来实现它的连续路径控制。所以用“拟 CP 控制”来代替上述 (2) 的 CP 控制可能会更确切一些。

B. 示教方式。T/P 方式工业机器人中, 采用两种示教方式。即:

(1) 集中示教方式: 集中示教是指对机器人同时进行位置、速度、作业知识、作业顺序的示教方式。集中示教的优点在于简单。缺点在于所需内存较大, 修改、变更比较困难, 灵活性较差。

(2) 分散示教方式。分散示教是指对机器人分别进行位置、速度、作业知识、作业顺序的示教方式。分散示教的优点在于节省内存容量, 修改灵活方便, 容易实现计算机控制系统软、硬件的模块化。

目前, 在工业机器人控制技术中, 应重点解决以下几个问题:

- ① 坐标变换与插补的高速运算问题;
- ② 根据多 CPU 进行多任务处理及防止机器人失控的问题;
- ③ 利用人-机对话或智能系统取代烦琐的示教作业问题;
- ④ 部分系统的软件化与模块化(标准化)问题;
- ⑤ 机器人语言问题;
- ⑥ 根据各种传感器的反馈控制问题等等。

三、机器人的发展动向及其展望

根据美国 Business Week 和日本产业机器人协会的预测, 1985—1990 年, 国际上连续电弧焊与装配机器人将占主导地位。但是如果用于装配作业的低价格智能机器人能够投入市场的话, 则装配机器人将占领最大市场。九十年代工业机器人的需求量以装配为第一位; 连续电弧焊、点焊为第二位; 喷漆、冲压等为第三位。特别是随着产业的 FMS 化

以及由于海洋开发、宇宙空间、原子能等新技术领域以及军事、农业、林业、矿产业、公共福利事业等部门对机器人的兴趣越来越高,并积极开展有关的研究工作。这些机器人比起“低智能”的工业机器人来说,要求有更高的对外部环境的感受与认识,以及高度的判断与行动机能。因此,机器人的研究已不再是限于工业部门。工业用机器人也迫切希望尽快智能化,以适应高度柔性生产系统及其它非工业部门的需要。过去那种机器人与智能机器人作为机器人研究的两个不同主流的看法,也开始逐渐被“机器人系统的研究”这种提法所统一。

另一方面,由于 VLSI 技术,超大容量存贮器的实现,超高速电子元件,光通讯技术以及信息处理技术的进步,人工智能与第五代计算机技术在近期内可能会有较大突破。这样,机器人技术也必将随之更进一步得到发展,机器人的应用领域也将不断扩大。下面对未来机器人的应用作一展望。

1. 军事应用

根据 1983 年 8 月美国陆军关于未来战争预想报告书,在未来战争中,机器人将承担下列军事任务:

- ① 敌战斗机及其它飞行物的识别;
- ② 攻击目标的跟踪及攻击先后顺序的决定;
- ③ 敌情的收集、分析及向部队的传达;以上为加强部队指挥系统的机器人。
- ④ 对被放射性物质、有毒物质及细菌污染的物体进行处理;
- ⑤ 探雷及其排除;
- ⑥ 布雷;
- ⑦ 战壕的挖掘;
- ⑧ 无人驾驶军事车辆、坦克、飞机、舰艇等。以上为直接参与战斗的作战机器人。

2. 其它产业未来机器人

1988—1990 年多目的医院,家庭机器人的实用化,高速高精度(μ 级)装配机器人的实用化,低价格通用机器人将得到普及。

1990—1994 年宇宙空间、海洋、核电站等特殊环境中智能机器人的实用化。深海(几百米)作业机器人的普及;小型驱动源及微结构的假手、假肢的实用化;恶劣环境作业条件下的无人生产线的普及;具有 1000×1000 画素的 100 幅/sec 速度的视觉机器人的成功。

1994—1998 年土建、隧道、高空等智能作业机器人的采用;瘫痪病人辅助活动机器人的普及;无人采矿作业机器人的开发;海上气象机器人的实现;6000 米超深水作业机器人的实用化。

1998—2002 年海上人工养殖场的收获用机器人的实用化;医院看护机器人的普及;建筑工地智能机器人的采用;盲人引路机器人的普及;自治性机器人的实用化。

2002—2006 年弹性结构机器人手臂的开发;自诊断、自修复机器人的开发;无人工厂自动巡回检测、排除故障的机器人的开发;林业采伐、搬运、加工机器人的实用化;与人四肢协调作业的机器人的开发;与人具有同样功能的各种感觉器官的开发。

以上对未来机器人的展望并不是梦想。现在很多研究、开发中的机器人,正是上述未来机器人的模型。在科学技术不断发展的未来,它们会一个个成为现实。

四、结 束 语

美国是机器人的故乡,但在第一台机器人问世之后,由于种种原因,政府限制了机器人的进一步发展,结果被日本人抓住战机,并且仅用 10 年工夫就一跃成为世界“机器人王国”。目前,无论在机器人的数量上,还是质量上都处于世界的领先地位。五、六年前,美国又开始重新评价机器人技术,并制定了新的机器人战略方针。目前,由美国 NSF (国家科学财团) 空军、海军、陆军,能源委员会等国家机构直接投资,在以机器人基础研究为主的方针下,大力发展机器人的生产技术,并委托大学、研究机关、企业进行工业机器人、智能机器人与作战机器人的研制工作。日本政府为保住“机器人王国”的宝座,仅通产省在 1983—1990 年内就投资几百亿日元,实施用于 FMS 系统的智能机器人以及极限作业机器人,老年人的手、脚、眼辅助“银色机器人”计划。并提出 2000 年日本将依靠机器人技术使日本国民经济总产值翻一番。西德将机器人技术列为 80 年代十大发展技术的第一位。最保守的英国政府也将机器人作为复兴英国工业的主要措施。机器人技术比较落后的苏联,也开始大力发展机器人技术。其它如南斯拉夫、瑞典、比利时、澳大利亚等国也都把机器人技术列为国家重点项目。

国际上机器人技术的发展动向应该引起我们的重视。在新技术革命的潮流之中,我们期待着中国机器人技术的日益成熟与不断发展。

参 考 文 献

- [1] MECHATRONICS DESIGN NEWS, 10(1985),No. 5, Japan.
- [2] 江崎玲於奈等,科学革命, Japan ダイヤモンド社,(1983年).
- [3] 機械と工具,ロボット設計ハンドブック, Japan 工業調査会,(1982年).
- [4] 日本ロボット学会,日本ロボット学会誌, Japan, 日刊工業新聞社(1983年).
- [5] 牧野洋,自動機械機構学, Japan 日刊工業新聞社,(1983年).

THE PRESENT AND PROSPECTS OF INDUSTRIAL ROBOT TECHNOLOGY

YU DATAI

(Beijing University of Iron and Steel Technology)

ABSTRACT

One of the distinguishing features of modern scientific and technological development is “Comprehensive Technology”, of which robot is a typical example. Robot, a result of the highly developed automatic technology is one of the major objectives of cybernetics, bionics, computer science, kinematics and dynamics. The paper generally addresses the current industrial robot technology in the world, covering the driving device and present control technology of industrial robot, the existing problems as well as the trend of research in this aspect. The description of the future robot is also given in the paper.