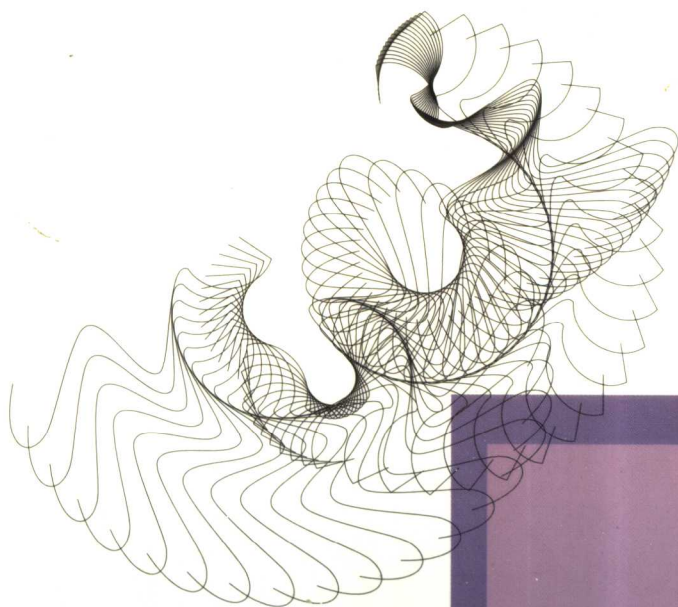


国家九五重点图书

计算机应用技术前沿丛书

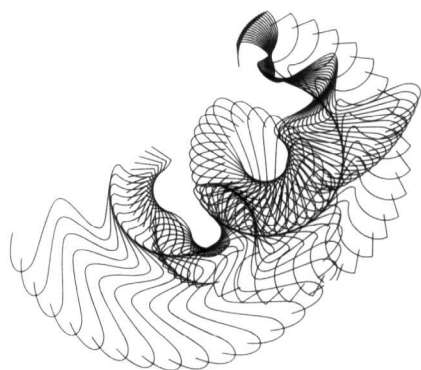


自主式智能系统

朱淼良 杨建刚 吴春明 编著

浙江大学出版社

国家九五重点图书



计算机应用技术前沿丛书

自主式智能系统

朱淼良 杨建刚 吴春明 编著

0275110/07

图书在版编目 (CIP) 数据

自主式智能系统 / 朱森良等编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2000.12

(计算机应用技术前沿丛书 / 潘云鹤主编)

ISBN 7-308-02160-2

I. 自... II. 朱... III. 人工智能-自动化系统
IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 46561 号

总 责 编 陈晓嘉 梁 兵

封面设计 俞亚彤

版式设计 孙海荣

责任绘图 张作梅

责任出版 李慧华

出版发行: 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑: 陈晓嘉

排 版 者: 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷: 浙江印刷集团公司

经 销: 浙江省新华书店

开 本: 889mm×1194mm 1/16

印 张: 24

字 数: 560 千

版 印 次: 2000 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-308-02160-2/TP·186

定 价: 48.00 元



序

20 世纪是一个科技、经济空前发展的时代,从世纪初相对论、量子理论的创立到今天以信息产业为龙头的高科技产业成为经济发展的第一支柱,人类社会发生了根本性的变革。而在这场以科学技术为社会发展直接动因的变革中,意义最深远、影响最广泛的就是计算机及其相关技术的发展和运用。

在过去的 50 年里,计算机已从最初的协助人类进行精密和复杂运算的单一功能的运算器发展成为能够模拟人类智慧、感觉,可以适应环境、具有多种功能的设备;计算机及其技术的应用已从尖端科学、国防工业延伸到了人类活动的各个领域。它不仅充实和革新了传统的科学与技术研究手段,带来了新的方法和理念,成为科学技术谋求新发展的沃壤,而且作为信息处理的核心工具和技术支撑起庞大的信息产业,进而改变了全球的产业格局。

目前,一个由遍布全世界的计算机连接起来的跨越国界、巨大而高速的多媒体信息网络正在形成,因此,不仅信息产业本身,而且各行各业都将面临计算机应用技术研究和发展的重大课题。我们针对国内外有关计算机应用技术的最新进展,根据浙江大学及国内其他学者在计算机辅助设计系统和方法、计算机动画、设计思维模拟、自主式智能系统、智能决策系统、软件智能化技术、工程数据库管理系统、图象与声音

压缩技术等方面取得的成果,组织编撰了《计算机应用技术前沿》丛书。
我们希望,通过这套书,为从事相关领域研究工作的专家和学者提供一些有参考价值的方法和技术,为普及、推广,进而开拓计算机及其网络的新的应用技术作出一点贡献。

潘云鹤

一九九九年十月

前 言

自主式智能系统(Autonomous Intelligent System)是 20 世纪 80 年代出现的一种集智能、行动于一体的高性能自动机系统。它能模仿人的智能和行为,在复杂多变的未知环境中主动地执行预定任务;能通过环境感知、决策规划及有计划、有目的地产生智能行为来适应环境,改变现状,从而完成预定的目标任务。

自主式智能系统由于具有优异的智能性能和处理复杂环境的能力,已被许多领域作为有前途的新型技术。例如,在柔性制造系统(FMS),计算机集成制造系统(CIMS),计算机集成过程控制系统(CIPS),各种航天、军用、水下机器人及智能车辆与公路系统中,自主式智能系统均有重要的应用。特别是一些危险场合下的工作,例如搬运核电厂的废料和在有毒的化工场地作业,自主式智能机器人的操作都是不可代替的。随着信息化时代的到来,自主式智能系统可望在信息高速公路中得到用武之地——各种知识机器人或网络智能代理人将活跃在信息化数字空间中,进行信息收集、故障诊断、事务处理等工作。可见,自主式智能系统的应用前景是十分诱人的,这一点将在 21 世纪得到证实。

但是,自主式智能系统作为新兴的技术系统,至今尚未形成统一的系统的理论,目前仍然停留在多学科的交叉阶段,所用的基础理论几乎

均来自计算机科学及自动化理论等相关学科。本书的目的是力图从自主式智能系统自身的特点和规律出发,通过运用相关学科的理论和技术,并且结合作者长期工作的实践经验,争取在整体上形成有关自主式智能系统的系统理论和技术。我们将首先介绍相关智能学科的基础知识和基本理论,并结合自主式智能系统作一定的扩展;随着讨论的深入,重点将逐步转向自主式智能系统本身的一些关键技术;最后以两类典型的应用系统——自主式智能机器人和自主式智能代理人为例,对自主式智能系统的体系结构、功能原理等作系统的分析。

本书的第3章、第5章由杨建刚编写,第2章、第6章由吴春明编写,朱淼良负责编写其余各章及全书的统稿。

与本书有关的研究工作得到了多方面的研究基金和研究计划的资助,包括国家自然科学基金、国防预研基金、国家863高技术计划、国防科委重大预研项目等等。在此,作者对上述各种资助计划表示感谢。

由于自主式智能系统作为新兴的技术系统,其理论和基础远未成熟,不同的学术观点也很多,加上作者学识有限,错误之处不乏存在,欢迎批评指教。

作 者

2000年8月

目 录

1 导 论

- 1.1 什么是自主式智能系统 1
- 1.2 自主式智能系统与相关学科 4
- 1.3 自主式智能系统的一般结构和关键技术 10
- 1.4 自主式智能系统的现状及前景 13

2 人工智能基础技术

- 2.1 知识表达 16
- 2.2 问题求解与启发式搜索 25
- 2.3 知识推理技术 34
- 2.4 开发实时推理系统的工具 ROPS 49
- 2.5 分布式人工智能与多智能体系统 62

3 计算智能技术

- 3.1 人工神经网络技术 74
- 3.2 模糊集理论应用技术 110

4 环境感知

- 4.1 传感系统及传感信号 132
- 4.2 环境的特征描述和识别 143
- 4.3 空间模型及其匹配技术 154
- 4.4 环境空间三维信息估计 168

5	多传感器信息集成与信息融合	
5.1	概 述	175
5.2	多传感器信息集成系统的控制结构	183
5.3	多传感器信息融合的层次与拓扑结构	189
5.4	多传感器信息融合的方法	194
5.5	基于 D-S 模型的信息融合算法分析	205
5.6	智能机器人多传感器信息融合实例	213
6	规划技术	
6.1	基本规划求解系统的功能	228
6.2	任务规划	230
6.3	空间规划	237
6.4	野外机器人路径规划	245
7	体系结构技术	
7.1	分层递阶式结构	255
7.2	包容式体系结构	261
7.3	分布式人工智能的体系结构	267
8	建模理论与综合集成	
8.1	自主式智能机器人形式化结构模型	279
8.2	Petri 网建模工具	287
8.3	离散事件系统(DES)	298
8.4	自主式智能系统的综合集成	308
9	自主式智能机器人——ALV	
9.1	ALV 系统简介	313
9.2	ALV 体系结构和工作模型	315
9.3	ALV 系统的关键技术	321
9.4	ALV 系统集成	336
10	自主式智能代理人	
10.1	自主式智能代理人简介	348
10.2	自主式智能代理人的核心技术	354
10.3	自主式智能代理人实例	366



1 导 论

随着社会信息化技术的深入发展,工业、农业、科研、国防等各个领域越来越需要高性能的自动化系统。如果说 18 世纪出现的各种动力机械代替了人的繁重的体力劳动,20 世纪出现的电子计算机在一定程度上代替了人的脑力劳动;那么,在 21 世纪,人们自然希望出现一种既能代替体力又能代替脑力的机器系统,这就是以智能机器人为代表的自主式智能系统(Autonomous Intelligent System)。

自主式智能系统是 20 世纪 80 年代出现的新技术名词,在许多文献中简称为自主式系统或自治式系统。它是集人类的智能、行为于一体的高性能自动机系统。许多相关的技术领域对它的目标、功能、结构、性能作了探索^[1,2],但对于它的严格定义或权威解释至今未有定论。以下,我们将首先讨论什么是自主式智能系统,然后再进一步探讨与相关学科的关系及它本身的特点和应用前景。

1.1 什么是自主式智能系统

为了说明什么是自主式智能系统,我们不妨以科技界一致公认的自主式地面车辆系统 ALV(Autonomous Land Vehicle)为例,探讨一下自主式智能系统的基本概念。

ALV 是 20 世纪 80 年代美国国防部高级研究计划署(DARPA)制订的“战略计算计划”中的主体研究课题^[3]。它的目标是研究与新一代的无人驾驶地面车辆相关的技术,这种车辆能借助地图等先验知识自动地在野外自然地形中执行指定的任务。这里的先验知识除了一般的地图外,还包括道路知识、驾驶经验等等。自然地形泛指车辆可通行的地面,包括各种等级的道路网络、平坦或略有起伏的荒野地带。在这些路面上,允许出现一般的障碍,如石头、树木等。许多著名的大学、公司、研究机构投入了该项研究。图 1.1 是其中的一个 ALV 外型。该车辆系



图 1.1 自主式地面车辆(试验床系统)

统配有多台彩色摄象机、激光雷达、超声距离传感器等,内部有多台高性能的计算机负责各种自动智能驾驶功能。该车辆系统一旦接到行驶命令,就能调用内部计算机系统地图等知识,通过搜索比较,决定最佳的达到目标的路径规划;然后按照预定的规划,由摄象机等环境识别模块去发现所需要的自然地形特征。当规划包含交通道路段时,系统根据道路几何形状进行道路跟踪;当遇到路标、分叉时,系统必须作出正确转向的决定,并像驾驶员那样沿道路形状减速转弯。在越野时,参考定位系统给出车辆方位和目标的差别,再根据传感系统给出的当前局部地形特征,一步一步地找出理想的逼近目标的通路。对于突如其来的事件,例如道路上出现行人、石块、凹坑等,车辆系统作出绕障决定,并指挥驾驶系统实现绕障动作。出现不测事件时,例如内部故障,车辆系统能自动检测并自行停车,以免造成不可挽回的损失。图 1.2 是 ALV 系统的一种内部结构模式^[4]。

从上面的 ALV 系统中可以看出,作为一个自主式智能系统,很明显地具有下列特征:

(1)所处的工作环境复杂。由于自然世界属于非结构化环境,除了像地图这样形式化的标记之外,系统对于具体的环境特性基本上一无所知,而且对出现的事件也无法预知。

(2)从行为方式来说,只要给出目标指令,ALV 就能够自动地作出任务规划,在规划的驱动下主动地识别、理解客观环境和形势,并通过决策规划产生一定的行为来改变现状。因此,从某种意义上说,其行为相当于有一定经验的驾驶员。

(3)从结构组织来说,ALV 由环境感知、知识推理、规划决策、行动执行等多种功能的子系统集合而成,其组织结构、功能划分及综合调度的能力可以与人的

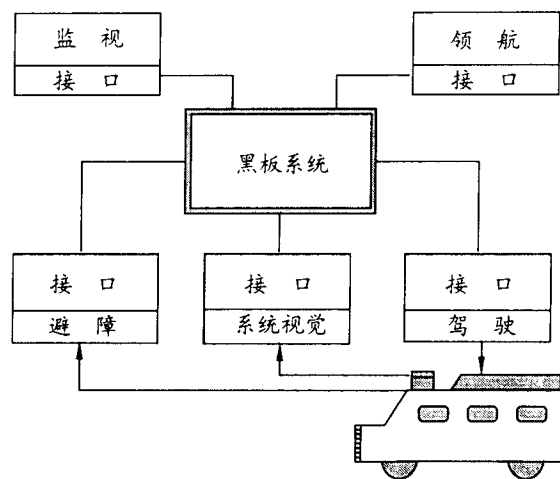


图 1.2 ALV 系统的内部结构

智能系统相比,是当前人类发明的具有最高科技水平的机器之一。

从以上分析,可以对自主式智能系统给出如下描述:

自主式智能系统是一个模仿人类的智能和行为的高度自动化系统。在无人干预的情况下,它能在复杂多变的未知环境中主动地执行预定任务;能通过环境感知、决策规划,有计划有目的地产生智能行为,以适应环境、改变现状,从而达到预定的目标。

事实上,在自主式智能系统之外,还存在着各种应用目的的智能系统或自动化系统。从功能行为来说,它们之间并无严格的界限,都可以看作是自主式智能系统。因此,广义地说,自主式智能系统可按它的自治化程度由低到高分若干层次。例如在冶金化工企业中,由计算机控制的炉温、压力、流量等参数控制系统,能在一定范围的复杂环境中作出相应的反应,出色地完成目标控制,即有一定的自治能力。再如,在许多特殊场合中使用的带有传感器的遥控机器装置,如搬运核废料的遥控机器人,除了接收、执行遥控命令外,还能根据感知到的环境部分地决定合适的行动,这些机器人系统也可称为自主式智能系统。至于在一些无人工厂中的生产线或恶劣环境中执行任务的自动机系统,如空间探险机器人或上述的 ALV,则属于高度自治的自主式智能系统。这些不同程度的自主式智能系统代表了当今信息自动化领域的最高成就和未来的发展方向。因此,研究它们的技术特点,掌握它们的技术规律从而推动它们的发展,是这门新兴学科面临的迫切任务,也是本书要讨论的主题。为此,了解该技术系统的特色、形成、发展以及与其他学科的渊源关系是十分重要的。下面先介绍一下自主式智能系统的发展过程。

与任何一门现代技术分支一样,自主式智能系统的产生一方面是社会生产发展的需要,另一方面也是相关技术领域交叉发展的结果。其中,一个最直接的因

素是计算机技术的发展,从20世纪50年代开始至70年代,计算机科学出现了一系列令人耳目一新的新兴技术分支学科,而最令人感兴趣的是以人的智能模拟为目标的几个相关技术分支,如模式识别、人工智能专家系统等。它们从信息处理这一基本要素出发,分析人对世界的认知、感知和思维规律,利用计算机进行信息处理和模拟仿真。到20世纪70年代末,利用模式识别技术,人们已可以利用卫星遥感自动识别地球资源的分布,估计农作物收成,进行环境监测;在工厂,则可以跟踪零件产品、检验质量等。另外,利用人工智能的推理技术可以模仿专家思维,进行有限领域的问题求解,于是出现了大量适于各种领域的专家系统。这些感知和思维仿真技术使人很容易地想到把它们应用到能产生一定动作行为的机器系统上,使之成为自主式智能系统。

此外,原先大量用于工厂自动化领域的自动控制技术,也在计算机技术发展的推动下,由传统的模拟量自动调节系统发展成为数字式计算机控制系统,进而产生了建立在大量数值计算基础上的现代控制理论和相应的系统。但是,随着这些应用系统的进一步深入发展,人们发现,许多控制对象不能用单纯的数学方法来建模,相反,采用非数值方式的经验知识却能有效地进行控制。因此,结合专家系统的发展便出现了专家控制系统。之后,人工神经网络、模糊理论的出现,又使控制系统大量地汲取了这些新思想、新技术,形成了所谓智能控制技术,而这些技术在工厂过程控制、柔性制造系统的深入应用,便导致了具有高度自主能力的智能系统的产生。

显然,自主式智能系统主要是计算技术、自动控制技术相结合的结果,它的许多核心技术直接来自于这些技术学科。为了更好地了解自主式智能系统,有必要进一步对这两门学科进行较深入的介绍和比较。

1.2 自主式智能系统及相关学科

从上面的讨论可知,自主式智能系统主要来源于两大学科:自动化学科中的自动控制理论和计算机学科中的人工智能技术。值得欣慰的是,随着自主式智能系统的发展,它正在逐步形成有自己特色的理论体系。为了更好地区别自主式智能系统与自动控制和人工智能之间的特点,下面将进一步讨论它们之间的相互关系。

1.2.1 自主式智能系统与人工智能

人工智能是近二三十年发展起来的研究用计算机模拟人的智能行为的计算机学科。虽然历史不长,但在不断地探索和发展中,形成了多个分支,其中较突出的有模拟人的感知功能的计算机视觉系统、以思维为对象的计算机专家问题求解

系统和智能机器人学。后者是作为智能技术的载体而加以研究的,但核心技术仍来自于前两者。

1. 计算机视觉

计算机视觉的研究开始于 20 世纪 70 年代末,来源于计算机图象处理和模式识别技术,目的是使计算机系统能像人的视觉系统一样,识别、理解周围的世界,所以计算机视觉又被称为目标识别、图象理解或景物描述等等^[5]。一个典型的计算机视觉系统如图 1.3 所示,可以分为下列三个层次:

(1)低层处理。对摄像机或其他环境传感器输入的原始图象作简单的处理,包括除去噪声、校正畸变、增强特征等;对图象进一步分割,包括对景物中物体的边缘检测、物体区域的划分等。低层处理的结果仍为图象,但经过上述处理已向识别前进了一步。

(2)中层处理。根据任务需要提取与目标有关的特征。这里的特征指图象中有关目标的边界、表面、色彩纹理、运动量等等。把这些特征抽象成为用几何参数或符号公式表达的模型,称为建模。

(3)高层处理。指景物分析。在系统中根据知识和经验建立的有关目标对象的模型,称为世界模型。在该模型的基础上,高层处理对中层处理所获得的特征进一步分析比较,以识别、确定图象中的目标或描述图象中景物的结构和涵义。

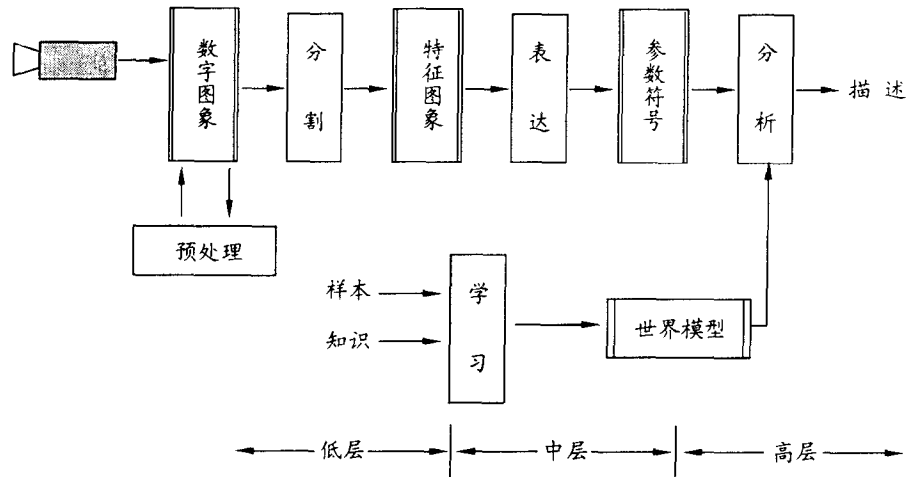


图 1.3 计算机视觉系统

可以看出,一个计算机视觉系统的最终目标是对环境景物的感知,其主要任务是从二维平面图象中理解三维真实世界;采用的方法与人的感知过程相似,即通过观察、分析、抽象记忆,达到对环境有目的的认识和理解,这是计算机视觉的一大特点。但是,这个目标仅止于对环境的认识、理解,没有进一步考虑如何作用于世界。

2. 专家问题求解系统^[6]

设计专家系统的目的是把所要求解的问题的可能答案和过程先确定下来,即定义求解空间,然后利用最有效的方法从求解空间中求得最好的解答。早先发展的技术是以搜索为主的各种算法,最有名的是利用先验知识的启发性搜索算法。随着问题要求的提高及求解过程的复杂化,出现了基于规则形式的求解系统,这就是产生式系统。它的特点是:

(1)问题求解空间为有限的专家领域;

(2)所有的求解过程可以用类似于“if…then”的规则构成,称为基本推理单元,或知识单元。

可见,产生式系统因限于专家领域,减少了问题的复杂性,保证了可解性,因此称为专家系统。它的求解过程不是采用复杂数学进行计算的,而是用规则一步步推理的,因而产生式系统又称为知识推理系统或专家推理系统。专家系统由于目标和知识表达的方式不同,而有许多不同的形式(例如黑板系统)。它们的一般结构可用图 1.4 表示,其中各部分功能如下:

·知识库——存放问题求解的基本知识单元,例如产生式系统中的规则或黑板系统中的知识源,它们代表了问题求解过程所用到的全部知识。

·工作库——存放问题求解的初始条件、最终目标及推理过程中的中间数据对象,如事件、事实、参数等等。

·推理机器——又称为推理引擎。它是整个推理系统的核心。

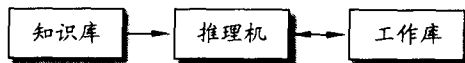


图 1.4 专家推理系统

下面以产生式系统为例,说明专家问题求解系统的工作原理。

产生式系统中的工作库中存放着初始条件,每一个条件均称为事实。推理系统把这些事实与知识库中的规则逐条比较,若规则中的“if<条件>”部分与当前的事实相匹配,则称该规则条件被满足,该规则被激活,其“then<动作>”部分的动作发生作用,结果是把新产生的事实写入工作库中。然后,该库中新的事实又被推理机构用来与知识规则进行匹配,激活新的规则。此过程反复进行,工作库的事实就被不断刷新,直到出现所要求的结果(事实),即推理过程达到了预先的要求,问题找到了答案。

需要指出的是,一个实际的专家系统远比上述过程复杂,例如,常常出现多条规则同时被激活的情况,即存在冲突问题,因此必须有冲突消解策略;规则的动作部分可被附加其他输入输出操作,从而在推理过程中产生复杂的动作行为。

从上述过程可以看到,一个典型的专家系统也仅限于预定的工作条件,工作过程基本上是封闭的。初始条件一旦决定,它的推理过程就基本确定下来。虽然

它可通过输出动作产生一定的行为,但这是预设的,外界的变化无法被系统感知,因此不能影响它的工作过程,即它不形成反馈。

专家系统提供了一种全新的问题求解方法,它不需要复杂的数学模型,而只要简单的规则。这种规则虽然是用口语形式的“如果……那么”方式表示的,但却能表示许多数学模型无法表示的世界模型,例如专家经验、日常知识等。这种看似简单但十分有效的模型被称为知识模型。许多智能系统常常用知识模型表示,因此知识模型、符号推理是专家系统的精髓。当然,专家系统也有它的缺点:一是专家知识的脆弱性,用“if…then”类型的规则只能表达简单的浅表的知识,而许多深层的知识由于结构复杂,不能如此简单化地表达;二是传统的基于符号匹配的推断方式效率不高,难以用在实时系统中。

通过上述的讨论可以看出,人工智能技术为自主式智能系统提供了三种十分有用的技术:

(1)环境感知技术。利用计算机视觉方法可识别、理解周围环境,为自主式系统深入了解周围环境提供了十分有用的技术。

(2)基于知识的世界模型建模方法。自主式系统常常要在非结构化的环境中工作,与这些环境相应的变化机理通常很难用数学方法来建模,但专家知识模型可较好地解决这类问题。

(3)基于推理的问题求解方法。这种方法为自主式系统提供了拟人的思维工具,从而加强了处理复杂情况的能力,提高了智能水平,有助于进行问题求解和环境应变。

1.2.2 自主式智能系统与自动控制理论

自从维纳在1946年提出控制论以来,自动控制理论作为一门正式的学科获得了很快的发展,各种实用的自动控制系统在工农业、国防、科研领域中发挥了巨大的作用,成为当今现代化企事业不可缺少的工具。从技术上来说,自动控制技术经历了模拟调节系统、直接数字控制和现代控制技术三个阶段,但它的核心是一致的,即一个自动控制系统基本的目标是用机器代替人,对控制对象实施预定的操作,使对象产生期望的行为和结果。为了达到这个目标,系统必须预先了解被控对象的基本特点和变化规律,并且监视它的变化,根据检测到的变化,通过控制器产生相应的约束,使其朝着预定的目标变化。图1.5表示了一个自动控制系统与对象的相互关系。

在早期的模拟式自动控制系统中,检测系统最常用的仪器有温度、压力、位置等传感器,它们把相应的物理量转换成电信号。控制器的功能由各种调节装置实现,后者根据传感信号产生相应的输出控制信号,由执行装置产生相应的行动去施加给对象。这类调节器的种类十分丰富,最简单的有由误差驱动的开关式调节

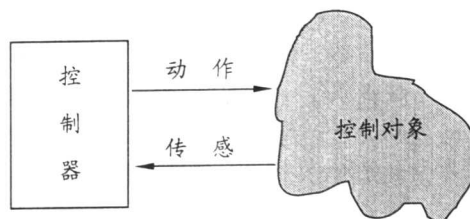


图 1.5 自动控制系统与控制对象

器,最复杂的可用模拟计算机按照对象的变化用数学模型加以控制。控制方式有开关式、PID 方式和状态方程。它们的理论基础是以状态方程、传递函数为基础的自动调节理论,用来对控制对象的特征和变化规律进行建模、分析和综合。系统采用机电元件本身的特性,如比例、微分、积分电路等来实现调节功能。这类调节系统的特点是结构相对简单,反应快,但无法对复杂的对象进行调节控制。

计算机的出现及普及应用,以它强大的信息处理能力,特别是高速的数字计算能力,使得精确描述对象的物理化学方程能在计算机上实现,从而使自动控制水平提高了一大步,它的特点是:

(1)由对控制对象的简单的信号传感发展成为系统辨识技术。利用计算机对多方面信号数据进行复杂的处理计算,如滤波、综合等,可以对环境对象的现状特征有更全面更本质的描述,从而起到辨识的作用。

(2)由于采用了数学模型控制,通过对对象的物理化学本质的分析,可得到对对象变化规律及输入输出之间关系的精确的数学描述,这就是数学模型。数学模型比 PID 或其他调节器具有精度高、针对性强的特点,因而使控制性能大为改善。

数字化控制发展于 20 世纪 70 年代,它使自动控制提高到一个新的水平,差不多凡是可以用数字模型描述的对象均可用计算机加以精确控制,因此可对相当复杂的控制对象加以控制。特别是由于计算机的逻辑处理、非数值处理等功能,使得后来的专家控制、模糊理论、神经网络方法能引入控制,成为现代智能控制的重要组成部分。

智能控制出现于 20 世纪 80 年代初^[7],可以说它是人工智能技术与控制论相渗透的结果。它的最主要特点是引入人工智能问题求解方法作为控制手段,例如搜索、规划、推理,特别是专家系统中符号推理技术的引入,使得计算机执行的数学模型扩大成为专家知识模型,进而出现了各种专家控制系统。到了 80 年代中期,模糊理论的发展使得原先无法用数学模型表达的复杂对象可以用模糊数学来表达,从而使控制对象又扩大到一个相当大的领域,例如日常家电中的空调、洗衣机均可用模糊的方法来表达控制对象(空气温度、衣服的干净程度)特征。同样,当对象是复杂的非线性系统,无法用确定性工具建模时,神经网络的大规模并行处理能力及学习功能,往往使其能很好地被描述,因此神经网络也是现代智能控