

人工智能及其应用丛书

问题求解理论 及应用

张钹 张铃 著

清华大学出版社

TP18
24

问题求解理论及应用

张钹 张铃 著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是人工智能及其应用丛书中的一本。本书以数学为工具,探讨人工智能中问题求解的理论基础,建立了一种称为商结构的形式化体系,并运用这种理论和方法,解决推理、规划和搜索等若干领域中的问题。

全书共七章和两个附录。第一章叙述不同粒度世界的商空间描述方法,它是贯穿全书的理论基础。第二到第七章分别讲述分层递阶技术、信息合成、推理、运动规划、时间规划以及启发式搜索的原理、数学模型及应用等诸方面的问题。这些章节可看作是第一章所建立的理论的应用,其内容虽仅涉及若干问题领域,但这里所提供的方法和技术是人工智能尤其是问题求解中所普遍存在的,具有广泛的意义。

本书是从事计算机、数学以及一切对人工智能有兴趣的科学工作者很有益的参考书。

2086/28 14

问题求解理论及应用

张 钺 张 铃 著

责任编辑 贾仲良

★

清华大学出版社出版

北京 清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

★

开本: 850×1168 1/32 印张: 15 3/8 字数: 400 千字

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数: 0001—4000

ISBN 7-302-00789-6/TP·286

定价: 6.40 元

出版说明

人工智能自 1956 年问世以来的三十年间已经取得了一些进展,并正在引起越来越多人的重视。它的基础研究难度大,如知识表示、推理方法、机器学习等问题虽取得了一些成果,但还远未形成完整的理论和体系。在应用研究方面,近十多年来成绩显著,象大家熟知的专家系统,已广泛应用于各种性质不同的领域,从工业、农业到医学,从商业,教育到军事,都取得了不少实际成效,有的还形成商品投入市场。这些进展正吸引着各类专家加入人工智能的研究队伍,他们之中有计算机学家、心理学家、语言学家、数学家、哲学家和各部门的工程技术人员。近几年来还有为数不少的企业家也加入这支庞大的队伍。世界各地已成立了几十、上百个销售人工智能产品的企业和商号,组成了一支号称“人工智能商业”的队伍。这股研究和开发人工智能技术的热潮目前也正在我国兴起。

人工智能为什么具有这么大的吸引力?与其说由于它的已有成就,不如说是由于它的潜在能力。专家们已经看到,人工智能将使计算机能够解决那些至今人们还不知道如何解决的问题,从而大大地扩充其用途。它将带来计算机硬件和软件的革命。人工智能正向各个领域渗透,带来这些领域的更新换代。智能计算机管理、智能计算机辅助设计,智能机器人等新的研究领域,由于人工智能的发展而不断出现。人工智能的发展还有助于我们进一步理解人类智能的机制。这一切都将促进和加快社会经济的发展,因此受到各国的普遍重视。

为了满足广大读者的需要,我们组织编写了《人工智能及其应

用》这部丛书并准备通过这部丛书向大家介绍人工智能的基本原理及其主要应用技术。包括人工智能原理与基础,知识工程与专家系统,计算机视觉,计算语言学,计算机语音处理与识别,智能机器人学以及智能控制等内容。全书将分十多册在两、三年内陆续出版。

清华大学自1979年就开始人工智能的教学和科研工作。十年来,共开设了十多门与人工智能有关的本科生与研究生的课程,进行了几十项人工智能的科研项目。这部丛书的内容基本上来自上述工作,丛书的作者都是上述教学、科研工作的参加者。多数书是集体合作写成的,仅署名的作者就有几十位。有的内容取自本科生或研究生的论文,实验研究的成果,所以确切地说,这部丛书是集体劳动的成果。

由于人工智能是一门正在发展中的学科,尚未形成自己的完整体系,所以收集在这部丛书里的内容,不可能全是系统和成熟的,这些将留给读者自己去判断。

这部丛书可作为计算机、自动化、无线电等有关专业的本科生或研究生的教材,也可作为一般工程技术人员和科学工作者的参考书。

欢迎广大读者对本书提出批评与改进意见。

人工智能及其应用丛书编委会

主 任：常 迥

副主任：张 钹

委 员：（按姓氏笔划）

边肇祺 朱雪龙 吴中权 李衍达

李幼哲 林尧瑞 周远清 徐光佑

前 言

人工智能 (Artificial Intelligence, 缩写为 AI) 自 1956 年问世以来, 已经取得了许多引人注目的进展。这些进展的取得应该归功于符号主义 (Symbolicism) 思想。可以认为, 符号主义是这 30 年间人工智能发展的理论基础。

符号主义把符号作为人类思维的基本元素, 认为认知就是在符号表示上的运算。因此, 符号主义的思想可以简单地归结为“认知即计算”这一基本原理。

符号主义的理论和主张主要反映在以下两个基本原理上。首先是 A. Newell 的物理符号系统假设 (Physical Symbol System Hypothesis), 即是: 物理符号系统是智能行为的充要条件。人脑和电子计算机都可看成是一种物理符号系统, 因此, 它们都能表现智能的行为。诚然, 依据这个观点, 用现代计算机模拟人的智能行为, 不存在原则上的困难。显而易见, 这个假设为用计算机实现人工智能提供了理论依据。第二是 H. A. Simon 的有限合理性原理 (Bounded Rationality), 这个原理为人工智能指出了一条具体实现的途径, 是 Simon 对人工智能的重要贡献。Simon 从心理学出发, 分析并研究了人类活动的特点, 他注意到人类尽管自身的能力和知识有限, 但却能自如地解决那些看来难以胜任的问题, 并作出正确的决策和反应。他发现其秘密在于, 人们通常不是采用系统的、精确的方法去追求问题的最佳解, 而是通过逐步尝试的办法, 达到有限的合理的目标, 即取得所谓足够满意的解。人类就是采取这种办法, 避免了计算复杂度高的困难, 使原来看来是非多项式 (Non-Polynomial, 缩写为 NP) 难解的问题迎刃而解。这就是有限合理性原理, 也就是所谓启发式 (Heuristic) 的求解问题方法。

启发式方法的特点是把知识和搜索结合,即用搜索来弥补知识的不足,反过来,知识越多越完全,则搜索量越少。启发式搜索也是人工智能中采用的基本方法,如人工智能中已经建立起来的各种问题求解法,基于知识的系统以及启发式搜索策略等均是以此种原理为基础的。实际上,它也是人们在求解问题中使用的试错法的模型。启发式搜索是求解复杂问题的强有力工具,它使人工智能在近30年的实践中获得巨大的成功,专家系统研制成功以及随后的广泛应用,就是一个例证。这些成就使符号主义为越来越多的人所接受,使它在七十、八十年代的人工智能研究中占据主导地位。

当然,人工智能中已经提出的问题求解方法,由于历史比较短,自然也存在许多不足之处。比如,当问题的领域扩大、知识量增多时,计算复杂性就很高。与人的问题求解能力相比,现有的人工智能方法则缺乏灵活性,难以进行分层处理等等,这些均有待于改进和提高。作者从1979年开始从事人工智能的研究工作,并结合具体的科研项目,着重研究了问题求解的理论,建立了一种称为商结构的形式化体系。并运用这种理论和方法,解决推理、规划和搜索等若干领域所面临的问题。本书是这十年期间理论研究成果的总结。

符号主义者把思维归结为符号计算,当然也受到许多学者的怀疑和批评,并指出它的各种局限性。比如,符号主义的核心是知识表示,那么对于象感知、形象思维一类问题,又该如何表示(Representation)呢?这是符号主义遇到的难题。于是,近年来,连接主义(Connectionism)的思想,即神经网络的方法,又重新抬头,大有压倒符号主义的势头。应如何认识这个问题呢?

我们认为,思维的现象是复杂的,符号主义和连接主义的思想表面上看起来是相互对立的,也许它们都只是从不同的侧面或不同的层次上观察思维现象所得出来的不同结论,各从不同的角度

反映了思维的某一部分性质,有可能相互统一和结合。因此,在没有完全弄清智能的本质之前,对哪一种方法采取绝对肯定或绝对否定的作法,都是不慎重,甚至是有害的。符号主义也好,连接主义也好都值得我们深入去探讨。此外,本书的目的不是讨论智能的本质,而是从建造智能机器这一工程目的出发,讨论人工智能技术。因此,这里有必要讨论一下机器智能与人的智能的关系。

显然,建造智能机器需要研究、借鉴并学习人的智能的原理,但二者毕竟有区别。这只要看一下一般机器的发明史就很清楚了,如飞机的发明固然受到飞鸟的启迪,借鉴了鸟类飞行的某些原理,但它并不是简单地模仿鸟类扑翼飞行的机制,而是根据人造机器本身的特点,根据空气动力学原理,创造出比自然物飞得更快、更高和更远的“人造鸟”。再如汽车,它与人腿的步行原理并不相同,但不可否认,汽车确实代替并实现了人腿的某些功能,在某些方面且超过人的步行能力。我们认为,上述机器与人体器官之间存在的关系,也将存在于当今的“电脑”与人脑之间,即人工智能与人的智能之间。建立在符号主义基础上的所谓计算机模式(Computer style)的智能,它的硬件结构与人脑的结构固然不同,但人工智能 30 年的实践证明,在建造机器智能上它是成功的、有效的,当然它有自己的局限性。目前提出的以连接主义为基础的所谓大脑模式(brain style)的人工智能,由于它的结构与人脑的结构有许多相似之处,因而在模拟人脑功能上会有一些新特点,是一种可取的人工智能技术。但不可否定,目前还只是开头,其道路也是十分艰难的。这好比目前有人研制模仿人腿的步行机构,由于这种机构酷似人腿,因而会具有人腿的某些特点,但是不能因为汽车的外观不象人腿而否定汽车是一个代步工具。在代替人腿的功能上,汽车以及未来的步行机构都是一样的,都是一种有效的代步工具。因此,符号主义也罢,连接主义也罢,从建造智能机器的角度来看,它们都是一种可行的途径。通向智能的道路不是唯一的。

、 本专著共分七章和一个附录。第一章讲述问题的描述方法，关键是不同粒度世界的描述问题。我们提出一种可以描述不同粒度世界的商空间模型。本章着重讲述这个模型，它也是贯穿全书的理论基础。第二章讲述分层递阶技术，它不仅是人工智能，而且也是控制与信息理论中的重要概念。本书是从人类求解问题的一种思维方法，来分析和讨论这个问题，重点在于建立它的数学模型，分析分层递阶与计算复杂性的关系以及它的应用。第三章是合成技术，它是分层分析的反过程，即从不同观察角度、不同来源所取得信息的综合问题。书中提出一种合成的数学模型，并由此导出合成的原则和方法。第四章推理模型，人工智能中虽然已经有了若干推理的模型，我们这里提出的网络推理模型，与已有的模型有所不同，即能够考虑不同层次的推理，并且把确定性推理、非确定性推理和定性推理统一和联系起来。这一章还介绍了网络推理中合成与传播的规律。第五章运动规划，除简单介绍目前较普遍采用的几何法外，重点讲述我们提出的规划的拓扑方法，介绍它的原理及实现技术。第六章时间规划，讲述时间规划的关系矩阵法，它的理论、算法及其完备性。第七章介绍统计启发式搜索方法，分析它的理论、计算复杂性、算法的实现，这种算法的特点及其与分层技术的关系。最后，在附录中，介绍了若干与本书内容关系密切的数学内容，主要是统计推断与点集拓扑的某些概念和结论，作为不熟悉这部分数学内容的读者阅读时参考。

本书内容均取自近年来我们理论研究的成果，这些研究得到国家自然科学基金，国家教委博士点基金以及国家高技术计划的支持。其中有些内容已应用到实际中，因而比较完整和系统。有些内容还只是初步的探索，有待发展和深化，错误或不完善之处在所难免，欢迎读者批评、指正。

涂序彦教授审阅了全书，特别是李幼龄同志在病中为本书作了大量的文字修改工作，作者对此表示衷心的感谢。

目 录

前言

第一章 问题描述	1
1.1 问题提出	1
1.2 不同粒度世界的描述	5
1.3 不同粒度世界的关系	10
1.3.1 半序格	10
1.3.2 性质的保持性	12
1.4 粒度的选择与调整	22
1.4.1 合并法	23
1.4.2 分解法	25
1.4.3 商半序的存在性与唯一性	32
1.5 小结	34
第二章 分层递阶	35
2.1 分层递阶模型	35
2.2 计算量复杂性估计	38
2.2.1 对复杂性估计的假设	38
2.2.2 确定性模型下的复杂性估计	39
2.2.3 概率模型下的复杂性估计	46
2.2.4 分层方法中的逐次运算	56
2.3 上层空间信息的提取	56
2.3.1 例	59
2.3.2 论域无结构情况下 $[I]$ 的构成	60
2.3.3 论域有结构情况下 $[I]$ 的构成	63
2.3.4 结论	75
2.4 模糊等价关系与分层技术	76

2.4.1	模糊商结构	76
2.4.2	聚类与分层结构的求法	84
第三章	合成技术	87
3.1	引言	87
3.2	合成的数学模型	89
3.3	论域的合成	90
3.4	拓扑结构的合成	92
3.5	半序结构的合成	93
3.5.1	商半序的图上构成法	93
3.5.2	半序结构的合成	96
3.6	属性函数的合成	101
3.6.1	属性函数的合成原则	101
3.6.2	例	105
3.7	小结	112
第四章	推理模型	114
4.1	各种不同的推理模型	114
4.2	不确定性与粒度的关系	120
4.3	网络推理模型(一)	125
4.3.1	投影	128
4.3.2	合成	131
4.4	网络推理模型(二)	139
4.4.1	模型的建立	144
4.4.2	与或关系的投影	145
4.4.3	与或关系的合成	149
4.4.4	结论	154
4.5	运算与商结构	154
4.5.1	商运算存在性讨论	156
4.5.2	商运算的获得	159
4.5.3	商运算的逼近	168
4.5.4	约束与商约束	173
4.6	定性推理	178

4.6.1	定性推理的模型	179
4.6.2	例	180
4.6.3	定性推理的步骤	186
第五章	运动规划	188
5.1	人工智能中的规划问题	188
5.1.1	简单世界的规划问题	189
5.1.2	现实世界的规划	192
5.1.3	空间规划	202
5.2	运动规划的几何方法	204
5.2.1	姿态空间表示	204
5.2.2	求无碰路径	215
5.2.3	小结	220
5.3	运动规划的拓扑模型	221
5.4	降维法	231
5.4.1	基本原理	232
5.4.2	特征网络	237
5.5	应用	248
5.5.1	平面杆件的无碰路规划	248
5.5.2	多关节机械手的规划	257
5.6	分层技术的应用	278
5.6.1	多关节机械手运动的分层规划	279
5.6.2	计算量的估计	282
5.7	相碰检测	287
5.7.1	计算模型的讨论	287
5.7.2	计算量的估计	297
第六章	时间规划	299
6.1	时间规划方法存在的问题	299
6.2	时间规划的关系矩阵方法(一)	302
6.2.1	基于点关系的时间逻辑	302
6.2.2	时间关系的关系矩阵表示法	306
6.3	求 R -时刻表	308

6.3.1	几个概念	308
6.3.2	关系矩阵的简化	309
6.3.3	求 R -时刻表	310
6.4	求 D -时刻表	321
6.4.1	几个符号	321
6.4.2	求基本赋值	322
6.4.3	算法 II 的完备性	327
6.4.4	求 D -时刻表的算法	337
6.5	最优 D -时刻表	345
6.5.1	引言	345
6.5.2	求最优 D -时刻表方法	347
6.5.3	算法 III' 的计算量	349
6.6	时间规划的近似解	349
6.6.1	求 ε -近似 D -时刻表的方法	350
6.6.2	算法 IV 的完备性	350
6.6.3	求渐近最优 D -时刻表	354
6.7	时间规划的关系矩阵方法(二)	354
6.7.1	关系矩阵的构成	354
6.7.2	求 R -时刻表的方法	357
6.8	资源分配	358
6.8.1	时差	359
6.8.2	劳力分配方法	360
第七章	统计启发式搜索	365
	引言	365
7.1	统计启发式搜索	367
7.1.1	启发式搜索技术	367
7.1.2	统计推断	371
7.1.3	统计启发式搜索	374
7.2	SA 法的计算复杂性	377
7.2.1	SPA 算法	377
7.2.2	SAA 算法	382

7.2.3 其它类型的 SA 法	385
7.2.4 逐次运算	387
7.3 全局信息的提取	388
7.3.1 假设 I 的讨论	388
7.3.2 全局统计量的提取(一)	393
7.3.3 全局统计量的提取(二)	404
7.3.4 SA 算法	408
7.4 统计启发式搜索方法与 A*法的比较	411
7.4.1 与 A*法比较	411
7.4.2 与其它加权技术的比较	416
7.4.3 其它方面的比较	428
7.5 图搜索的 SA 法	431
7.5.1 图搜索问题	431
7.5.2 与/或图的搜索	433
7.6 分层方法与启发式搜索技术	435
附录	438
附录 I 点集拓扑的一些概念与性质	438
附录 II 积分与统计推断的一些概念与性质	457
参考文献	471

第一章 问题描述

1.1 问题提出

人工智能的方法和技术已经应用到若干不同的学科领域，为今后讨论的方便，我们阐述其中的若干内容。

专家咨询系统。这些系统是在特定的学科领域中，代替专家的咨询工作，向用户提供咨询与建议。在已经建立的专家系统中，有能够诊断疾病的，有分析石油勘探数据的，有安排调度计划的，等等。这些系统通常都采用一种基于规则的推理方法。专家的知识用一组推理规则来表示，系统按下列方式工作：从给定的数据或事实出发，系统选择合适的规则，一边引导系统与用户之间的对话，一边产生新的结论。于是不断地运用推理规则，直至得到所需的结论为止。

机器定理证明。机器对数学中的某个定理寻找其证明。即从一组已知的公理出发，通过运用推理规则，不断地产生中间的定理，直到所需的定理被证明为止。

人工智能中不少的问题领域可以做类似的形式化，变成某种形式的推理过程。

自动程序设计、自动调度与决策、机器人动作规划等具有相似的性质，可以归纳成如下的一般性任务，即给定一个目标，要求机器在满足预先给定的约束条件下，规划出一系列的操作（或动作），

以达到给定的目标。这类问题又称**约束满足** (Constraint Satisfaction) 问题。

视听觉识别。即输入一组视觉或听觉的信号序列,要求机器理解所“看到”或“听到”的信号,即识别看到的是什么东西,听到的是什么内容。

凡此种种,均要求智能,它们都是人工智能的重要研究课题。为了建造具备上述智能的计算机,就要求对上述问题求解过程作形式的描述,简称问题描述。现先介绍两个常用的描述方法。

状态空间法 (State-Space Representation)^[1]。该方法以三个基本要素来描写要解决的问题。其一是符号结构或知识库来表示问题可能解的子集。其二是一组算子或产生式规则,描述各个符号结构之间的关系。当一个规则作用于某个符号结构上时,该符号结构被细化,产生新的符号结构,代表一个更精细的可能解的集合。最后一个要素是控制策略,代表着选取规则的原则与策略。有了以上三种要素,就可以把一个问题求解过程描述为状态空间的搜索,或图的搜索。在这里,图中的每一个结点表示一个符号结构,连系两个结点的一条弧,表示一个推理规则。控制策略就是图的搜索策略。

状态空间法可以描述相当一类问题的求解过程,自动推理、机器定理证明等可以看成状态空间中目标结点的搜索问题。而机器人动作规划、自动程序设计等可形式化为状态空间的路径搜索问题。

以专家系统 PROSPECTOR 为例^[2]。它的任务是估计潜在的矿床。图 1.1 是以状态空间表示的推理网络的片断。图中的结点(以方框表示)表示其可能解的子集,如均匀结构的硫化矿沉积,表示一个可能解的类,具体的解(如某种矿床)包含在这个子集中。随着推理的深入,解也越来越明确。结点之间的连线表示不同的推理规则,如规则 3,14 等。这些规则代表了具体的探矿知识。