

对手规划的 识别与应对

谷文祥 刘莹 著



科学出版社

对手规划的识别与应对

谷文祥 刘 莹 著

国家自然科学基金面上项目 (No: 60473042, 60573067, 60803102, 61070084) 和吉林省教育厅“十二五”科学技术研究重点项目 (吉教科合字 [2015] 第 563 号, 吉教科合字 [2015] 第 572 号) 资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书综述了国内外学者的相关研究,对对手规划的研究历史、研究现状、研究方法和发展趋势等重要问题进行了比较详细的讨论,并在智能规划与规划识别的基础上,从对手领域出发引入对手规划的相关内容,详细介绍了适合一定对手领域的对手规划的识别和应对方法。本书以简明、通俗的语言把智能规划与规划识别、对手规划的识别与应对、敌意规划的识别与应对、网络入侵规划的识别与应对这一前沿的科学理论和方法介绍给广大读者。

本书可作为计算机专业硕士研究生或博士研究生教材,也可供相关领域研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

对手规划的识别与应对/谷文祥,刘莹著. —北京:科学出版社,2016.5
ISBN 978-7-03-048311-9

I. ①对… II. ④谷… ②刘… III. ①人工智能-研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 109126 号

责任编辑:刘凤娟 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕 者

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 5 月第 1 次印刷 印张:32 1/4

字数:626 000

定价:188 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是一部综述性专著,详细介绍智能规划与规划识别、对手规划的识别与应对、敌意规划的识别与应对,以及网络入侵规划的识别与应对。

智能规划的研究最早可以上溯到 1957 年,由于其重要的应用价值,近年来已经成为人工智能领域极为活跃的一个研究热点。特别是规划技术在航天器“Deep Space One”以及“沙漠风暴行动”等一系列领域中的成功应用,激起了研究人员的极大热情,各国在相关项目中也投入了大量的人力、物力和财力。目前,卡耐基梅隆大学、华盛顿大学、普渡大学、斯坦福大学、澳大利亚国立大学和美国国防部高级研究计划局(DARPA)等机构所做的工作比较突出,对这一领域的研究有着广泛而深刻的影响。其中,影响最大的研究成果当数美国卡耐基梅隆大学的 Blum 和 Furst 教授发表的论文 *Fast planning through planning graph analysis*。作者在该论文中提出的规划图算法被普遍认为是智能规划研究史上具有革命性的一个算法。

规划识别问题是指由观察者(即规划识别系统)观察动作执行者(即规划智能体)的动作,根据观察到的动作推断出规划智能体的目标,以及为完成该目标而实施的规划的过程。根据观察到的片面的、琐碎的现象,利用规划识别技术,可以推断出具有合理因果联系的、完整的规划描述。因此,规划识别技术广泛应用于故事理解、自然语言识别、多智能体交互系统、入侵检测等多个领域中。著名学者 Geib 和 Goldman 在美国 DARPA 举办的 DISCE 会议上发表的论文 *Plan recognition in intrusion detection systems* 指出,入侵检测系统需要智能规划识别技术来提高防御能力。此后,研究者相继提出适用于入侵检测领域的规划识别方法。

对手规划对当前规划领域提出了一个新的挑战,该领域不仅包括规划识别相关内容,同时还包含规划的生成,即产生应对规划。对手规划是智能体在存在竞争或敌对等因素的对手领域中执行的复杂规划。首先,对手领域是存在竞争或敌对等因素的特殊领域,在对手领域中,规划器首先需要正确识别对手的规划,然后才能生成有效的应对规划。其次,对手总是试图隐藏自己的规划和目标,甚至执行一些迷惑、诱导性动作来误导识别过程。当没有完全识别对手动作时,需要随着规划的执行逐渐修改现有规划以适应新的局势。最后,执行的应对规划要考虑对手的应对,从而保证应对规划的有效性,因此,对手领域的规划问题是一个

与实际息息相关,比以往任何规划问题都难于处理的一部分。

应对规划的研究可以看作两个阶段。第一阶段,根据对手智能体的动作和规划识别其意图和目的;第二阶段,根据识别出的规划目的,我方做出相应的规划和应对。在多智能体系统中,应对规划是必不可少的组成部分。国际智能规划研究专家、马里兰大学计算机系教授 D. S. Nau 指出这方面的研究是智能规划的未来方向之一,并强调了规划识别和应对规划在智能规划应用过程中的作用。

2005 年 1 月,在国家自然科学基金项目“应对规划研究”和“对象集合动态可变的图规划及其数学模型的研究”的支持下,本书作者谷文祥带领项目组和他的研究生对应对规划和 1995 年由美国卡耐基梅隆大学 Blum 和 Furst 教授提出的国际难题“对象集合动态可变的图规划”发起冲击。在项目结题时,不但发表了多篇学术论文,还根据我们自己的算法开发出了可以处理对象集合动态可变的规划问题的规划器 CDOP,以及可以处理对象集合可变的概率规划问题的规划器 CDOFF。这一困扰大家十几年的国际难题被我们课题组较好地解决了。

本书分门别类地介绍最近十几年国内外相关研究的主要成果,着重介绍在图规划框架下智能规划的研究工作,特别关注当前研究的热点、难点问题,系统、全面地研究其间出现的各种新方法,客观、深入地介绍各项研究成果,重点展示对手规划的识别与应对、敌意规划的识别与应对,以及网络入侵规划的识别与应对技术的研究现状及面临的问题,试图勾画出目前对手规划与应对规划研究的重要方面、关键技术及其发展趋势,并结合我们自己的实际研究工作,以智能规划的发展过程为对象,以对手规划方法为中心,以对图规划进行的扩展为主线,综述对手规划与应对规划整体发展及其结构演进的大趋势,总结国内外有关理论书籍和文献,着重介绍 1995 年以来二十多年的发展情况。旨在以尽可能简明、通俗的语言及尽可能少的预备知识把智能规划与规划识别、对手规划的识别与应对、敌意规划的识别与应对和网络入侵规划的识别与应对这一前沿的科学理论介绍给广大读者。同时,我们还提供了一些有益的分析与研究资料,希望可以使读者摆脱在众多资料中辛苦查询的烦恼,为对此领域感兴趣的研究者带来快捷查找所需资料的方便,提供一个开阔视野、了解研究动态、尽快进入实质性研究的途径。

本书的前言、第 1 章、第 2 章、3.1 节、3.3 节、3.5 节、3.6 节、3.7 节由谷文祥、殷明浩和徐丽执笔;3.2 节、3.8 节、3.9 节由谷文祥和孙秀丽执笔;3.4 节由张新梅执笔;第 4 章由谷文祥、殷明浩和王芳执笔;第 5 章由谷文祥、殷明浩和张新梅执笔;第 6 章由刘莹和王艳执笔;第 7 章、第 8 章由刘莹和王金艳执笔;第 9 章由王金艳、李丽和李丹丹执笔;第 10 章和第 11 章由刘莹和尹吉丽执笔;第 12 章由刘莹执笔。最后由刘莹进行统稿,谷文祥进行修改、整理和

定稿。在本书出版之前，刘莹又对全书的图表和文字的排版进行了统一处理，花费了大量时间和精力。

本书参考了《智能规划与规划识别》和 *Automated Planning: Theory and Practice* 两本专著。

本研究得到国家自然科学基金面上项目 (No: 60473042, 60573067, 60803102, 61070084) 和吉林省教育厅“十二五”规划科学技术研究重点项目 (吉教科合字 [2015] 第 563 号, 吉教科合字 [2015] 第 572 号) 资助, 在此表示感谢。

由于本书涉及的知识面比较宽, 对手规划的识别与应对又是一个崭新的研究方向, 而我们对这一领域的研究还不够深入, 所以书中错漏之处在所难免, 欢迎读者和专家批评和指正。

谷文祥 刘 莹

2016 年 1 月 15 日

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 智能规划发展历史	1
1.2 智能规划的应用	2
1.2.1 在航空航天中的应用	2
1.2.2 在机器人中的应用	2
1.2.3 在智能工厂中的应用	3
1.2.4 在商业中的应用	4
1.3 本书概要	5
参考文献	5
第 2 章 规划表示语言	8
2.1 STRIPS 表示	8
2.2 动作描述语言	9
2.3 规划领域定义语言	9
2.3.1 PDDL 的提出及其背景	9
2.3.2 PDDL 各版本简介	10
2.4 规划语言的发展	15
参考文献	15
第 3 章 图规划	16
3.1 经典规划	16
3.1.1 问题定义	16
3.1.2 状态空间规划	16
3.1.3 规划空间规划	18
3.1.4 偏序规划与全序规划	19
3.1.5 现代经典规划	19
3.2 图规划方法	20
3.2.1 基本概念	20

3.2.2	扩张规划图算法	22
3.2.3	搜索有效规划算法	23
3.2.4	Graphplan 的局限性与未解决问题	27
3.3	求解方向的变形	27
3.3.1	正向求解	27
3.3.2	反向求解	28
3.3.3	基于双向并行的图规划	36
3.4	最小承诺的图规划	38
3.4.1	预备知识	38
3.4.2	最小承诺的图规划算法	40
3.4.3	简单的规划问题举例	41
3.4.4	最小承诺的图规划算法的优缺点	43
3.5	图规划中的条件效果	43
3.5.1	条件效果	44
3.5.2	全扩展法	44
3.5.3	要素扩展法	46
3.5.4	IP ² 扩展法	47
3.5.5	利用兄弟元件改进要素扩展法	50
3.5.6	四种方法的比较	51
3.6	利用约束可满足问题在规划图中求解	51
3.6.1	约束满足问题	51
3.6.2	约束满足问题求解技术	52
3.6.3	用 EBL 和 DDB 提高图规划搜索效率	52
3.7	灵活图规划算法	54
3.7.1	图规划的局限性	54
3.7.2	灵活规划问题	56
3.7.3	灵活图规划算法描述	58
3.7.4	以目标为导向的灵活图规划	60
3.7.5	基于启发式搜索的灵活规划	63
3.7.6	基于软约束的多智能体灵活规划	66
3.7.7	灵活图规划方法特性	77
3.8	数值图规划	77
3.8.1	ADL 中的基本概念	78
3.8.2	BRL	82

3.8.3 搜索算法	87
3.8.4 嵌入模糊部件的数值图规划算法	95
3.9 时序规划	100
3.9.1 概述	100
3.9.2 时序动作	101
3.9.3 时序规划图	102
3.9.4 解搜索	106
参考文献	107
第4章 启发式规划方法	111
4.1 启发式的设计原则——放松	111
4.2 HSP	112
4.2.1 启发式	112
4.2.2 搜索算法	114
4.2.3 HSP2.0——最优最先搜索规划器	115
4.3 HSP-r	115
4.3.1 状态空间	116
4.3.2 启发式	116
4.3.3 互斥	117
4.3.4 搜索算法	118
4.3.5 相关工作	118
4.4 FF 规划系统	119
4.4.1 FF 系统结构	119
4.4.2 符号说明	120
4.4.3 用 Graphplan 作为启发式估计	120
4.4.4 爬山算法的一个新的变体	125
4.4.5 剪枝技术	127
4.4.6 扩展到 ADL 域	130
4.4.7 基于部分延迟推理的快速前向规划系统	132
4.5 LPG	139
4.5.1 在动作图空间中的局部搜索	140
4.5.2 相邻状态的提炼	143
4.5.3 模型化规划质量	147
4.6 基于因果图启发的多值规划算法	150
4.6.1 基本概念	150

4.6.2	AMCG 规划算法	154
4.6.3	启发函数的设计	158
4.7	小结	162
	参考文献	162
第 5 章	符号模型检测理论	165
5.1	域描述语言 NADL	165
5.1.1	采用 NADL 描述的规划问题	165
5.1.2	NADL 语法	166
5.1.3	NADL 语义	167
5.1.4	NADL 的 OBDD 表示	168
5.2	符号模型检测方法的由来	170
5.3	逻辑及形式化表示	170
5.3.1	量化布尔公式	170
5.3.2	Kripke 结构	171
5.3.3	计算树逻辑	171
5.4	二元决策图	173
5.4.1	OBDD 的值	173
5.4.2	BDD 的化简	173
5.5	符号模型检测	175
5.6	转移关系的划分	176
	参考文献	177
第 6 章	不确定规划	178
6.1	不确定规划简介	178
6.1.1	不确定规划问题	178
6.1.2	不确定规划问题的解	178
6.1.3	不确定规划方法	179
6.2	图规划框架下的概率规划	180
6.2.1	PGP 概述	181
6.2.2	图规划框架下的表示方法	181
6.2.3	图扩张算法	182
6.2.4	有效规划提取算法	183
6.2.5	缩减状态空间方法	185
6.2.6	结论及未解决问题	187
6.3	一致图规划	187

6.3.1	CGP 概述	187
6.3.2	预备知识	188
6.3.3	CGP 算法	189
6.3.4	结论及未解决问题	196
6.4	感知图规划	197
6.4.1	SGP 概述	197
6.4.2	预备知识	198
6.4.3	SGP 算法	198
6.4.4	结论	204
6.5	基于决策理论的多目标概率规划	204
6.5.1	规划问题模型	204
6.5.2	多目标评价函数	206
6.5.3	多目标概率规划求解算法	210
6.5.4	启发式的应用	220
6.5.5	多目标概率规划器	221
6.6	图规划框架下的可能性规划	223
6.6.1	为什么引入可能性规划	223
6.6.2	可能性规划表示	224
6.6.3	相关定义	225
6.6.4	可能性规划图算法	227
6.6.5	结论	230
	参考文献	230
第 7 章	对象集合动态可变的图规划	233
7.1	图规划框架下可创建/删除对象的规划	233
7.1.1	关于可创建/删除对象的规划问题分类	233
7.1.2	关于可创建/删除对象规划的动作的表示	234
7.1.3	对象命题化的思想	235
7.1.4	可创建/删除对象的图规划的基本思想与算法	235
7.1.5	一个例子: 关于火车运输问题	237
7.1.6	算法分析	240
7.2	可创建/删除对象的快速前向规划	240
7.2.1	CDOFF 中的基本概念及理论框架	241
7.2.2	对象元件命题化算法	242
7.2.3	部分放宽方法	244

7.2.4	启发函数的设计	245
7.2.5	加强爬山法及剪枝策略	246
7.3	基于条件效果的对象动态可变图规划	249
7.3.1	基于条件效果的对象动态可变的规划问题	249
7.3.2	CECDOP 规划	251
7.3.3	结论	254
7.4	对象集合动态可变的概率规划	255
7.4.1	算法背景	255
7.4.2	基本概念	256
7.4.3	对象动态可变的概率规划算法	257
	参考文献	260
第 8 章	八届国际规划比赛综述	261
8.1	第一届国际规划竞赛 IPC-1	261
8.1.1	参赛规划器	261
8.1.2	比赛所用的语言及测试域	261
8.1.3	比赛结果	261
8.1.4	冠军介绍	261
8.2	第二届国际规划竞赛 IPC-2	262
8.2.1	参赛规划器	262
8.2.2	比赛所用的语言及测试域	262
8.2.3	比赛结果	262
8.2.4	冠军介绍	263
8.3	第三届国际规划竞赛 IPC-3	263
8.3.1	参赛规划器	263
8.3.2	比赛所用的语言及测试域	263
8.3.3	比赛结果	264
8.3.4	冠军介绍	264
8.4	第四届国际规划竞赛 IPC-4	264
8.4.1	参赛规划器	265
8.4.2	比赛所用的语言及测试域	265
8.4.3	比赛结果	265
8.4.4	冠军介绍	265
8.5	第五届国际规划竞赛 IPC-5	266
8.5.1	参赛规划器	266

8.5.2	比赛所用的语言及测试域	266
8.5.3	比赛结果	267
8.5.4	冠军介绍	267
8.6	第六届国际规划竞赛 IPC-6	268
8.6.1	参赛规划器	268
8.6.2	比赛所用的语言及测试域	269
8.6.3	比赛结果	269
8.6.4	冠军介绍	269
8.7	第七届国际规划竞赛 IPC-7	269
8.7.1	参赛规划器	270
8.7.2	比赛所用的语言及测试域	270
8.7.3	比赛结果	270
8.7.4	冠军介绍	270
8.8	第八届国际规划竞赛 IPC-8	271
8.8.1	参赛规划器	271
8.8.2	比赛结果	271
8.9	智能规划中未解决的问题与展望	272
8.9.1	未解决的问题	272
8.9.2	展望	273
	参考文献	273
第9章	规划识别	275
9.1	规划识别综述	275
9.1.1	规划识别分类	275
9.1.2	规划识别方法	277
9.1.3	规划识别的应用	294
9.2	Kautz 的规划识别理论	299
9.2.1	相关概念	300
9.2.2	事件层描述	302
9.2.3	四种假设	305
9.2.4	举例	309
9.2.5	Kautz 规划识别算法	316
9.3	基于目标图分析的目标识别	319
9.3.1	域表示	320
9.3.2	目标图、有效规划和一致目标	325

9.3.3	目标识别算法	328
9.3.4	目标冗余以及最一致目标	333
9.4	基于回归图的规划识别方法	334
9.4.1	域表示	335
9.4.2	回归图	336
9.4.3	回归图算法	337
9.5	基于规划知识图的概率规划识别算法的研究	339
9.5.1	事件间的两种关系	340
9.5.2	规划知识图算法存在的问题	340
9.5.3	支持程度及 KGPPR 算法的解图描述	342
9.5.4	KGPPR 系统的相关概念和算法设计	344
9.6	基于灵活规划的规划识别算法	350
9.6.1	基于灵活规划识别算法的目的	350
9.6.2	FPRA 算法思想	351
9.6.3	FPRA 算法描述	352
9.7	关键问题与展望	354
9.7.1	关键问题	354
9.7.2	展望	355
	参考文献	355
第 10 章	对手规划的识别与应对	360
10.1	对手规划简介	360
10.1.1	对手规划	360
10.1.2	对手规划领域的特点	361
10.1.3	对手规划问题的发展	363
10.2	对手规划的识别与应对	366
10.2.1	基于目标驱动的 HTN 规划方法	367
10.2.2	基于 OBDD 强循环对手规划方法	374
10.2.3	基于完全目标图的对对手规划的识别方法	383
10.2.4	基于多智能体的对手规划的识别与应对	392
10.3	对手规划领域存在的问题与展望	399
10.3.1	存在的问题	399
10.3.2	对手规划研究的展望	399
	参考文献	400

第 11 章 敌意规划的识别与应对	401
11.1 基于目标驱动理论的应对规划	401
11.1.1 相关概念	401
11.1.2 基于目标驱动的应对算法	405
11.1.3 应对算法描述	405
11.1.4 算法的功能与特点	408
11.2 复杂领域中多智能体条件下敌意规划的识别与应对	408
11.2.1 相关知识	408
11.2.2 敌意规划识别系统的组成	409
11.2.3 敌意规划的识别	410
11.2.4 敌意规划的应对	413
11.2.5 结论	413
11.3 基于规划语义树图的敌意规划识别	415
11.3.1 规划知识图和 Kautz 方法的不足之处	415
11.3.2 规划语义树图表示	416
11.3.3 带标记的双向搜索的敌意规划算法	418
11.4 基于 DCSP 的敌意规划识别算法	423
11.4.1 传统的规划识别理论中的假设和应用条件	423
11.4.2 相关概念	424
11.4.3 基于 DCSP 的识别方法	426
11.4.4 基于 DCSP 识别模型的特性	427
11.5 基于抢占式动作的敌意规划	428
11.5.1 相关定义	428
11.5.2 抢占算法在敌意规划中的应用	429
11.6 敌意规划的识别与应对系统	434
11.6.1 敌意系数与敌意动作	434
11.6.2 敌意规划识别系统	435
11.6.3 敌意规划识别算法	436
11.6.4 敌意规划的应对	438
11.7 应对规划器模型	444
11.7.1 基本概念及敌意规划分类	444
11.7.2 模块组成及功能	445
11.7.3 运行流程图及系统特点	451
11.8 基于战术的敌意规划识别	452

11.8.1	战术规划识别应用领域的特点	452
11.8.2	规划与规划模板	453
11.8.3	规划识别的形式化定义	454
	参考文献	465
第 12 章	网络信息对抗领域的敌意规划的识别与应对	467
12.1	网络信息对抗领域	467
12.2	基于行为状态图的入侵检测问题	469
12.2.1	研究前提与基本原则	469
12.2.2	行为状态图的组成与抽象表示	470
12.2.3	基于行为状态图的登录问题描述	472
12.2.4	基于行为状态图的规划识别算法	474
12.2.5	ASGPR 算法描述	480
12.2.6	一个规划识别算法的实例	482
12.3	基于应对规划的入侵防护系统的设计与研究	485
12.3.1	基于应对规划的入侵防护系统框架设计	485
12.3.2	一种系统应用方案	486
12.3.3	技术特色	486
12.3.4	开放的问题	487
12.4	基于待定集的入侵检测方法	488
	参考文献	489
附录 A	相关项目与会议	490
附录 B	主要智能规划器	491
附录 C	Kautz 规划识别的算法描述	493

第 1 章 绪 论

1.1 智能规划发展历史

智能规划是人工智能中研究较早的一个分支,它的研究最早可以追溯到 20 世纪 50 年代后期,当时人们利用程序来模拟人类的问题求解能力。作为此目的的第一个系统是由 Newell 和 Simon 设计的逻辑理论家程序,随后他们又设计了通用问题求解器(general problem solver, GPS)^[1],这个系统将领域知识与一般的搜索控制信息相分离,采用分析当前状态和目标状态间差别的启发式方法来执行状态空间搜索,它在人工智能领域中具有非常重要的地位。

20 世纪 60 年代末,Green 提出使用定理证明的方法来构造规划,并基于此理论设计了 QA3 系统^[2],因为它是第一个面向现实规划问题提出的规划系统,所以被大多数智能规划研究人员认为是第一个真正的规划器。然而,由于当时定理证明技术的不成熟,这种方法不久就被舍弃了。

20 世纪 70 年代出现了非线性规划(偏序、因果链接)方法,它在域独立规划中占有主导地位,该方法直到 20 世纪 90 年代中期仍深受欢迎^[3-5]。基于此方法,1971 年 Fikes 和 Nilsson 设计了 STRIPS 规划系统^[6],它是历史上最具影响力的规划系统之一。在 STRIPS 域中,状态是命题的集合,状态描述的改变由操作从集合中添加和删除命题来实现,搜索使用类似于 GPS 的启发式方法。这一系统采用的与文字相关的术语直到今天仍在使用,引入的 STRIPS 操作符使得规划可以非常容易地进行描述和操作,原来很神秘的规划问题求解从此变得明朗清晰起来。此后至 1977 年,先后出现了 HACKER, WARPLAN, INTERPLAN, ABSTRIPS, NOAH, NONLIN 等规划系统。

20 世纪 80 年代,对智能规划的研究陷入了低谷,这期间仅有 SIPE, ABT-weak^[7] 和 Prodigy^[8] 等智能规划系统出现。人们通过使用模态逻辑和动态逻辑从理论上对演绎规划进行了调整^[9],但这些工作对于规划算法的发展所起到的作用微乎其微。1987 年,Chapman 在此基础之上全面地分析了利用定理证明理论解决规划问题中出现的 key 问题——模型与规划解的对应关系,提出了著名的模态真值标准理论,并设计了规划系统 TWEAK^[10]。后来随着经典命题逻辑可满足问题的发展,规划问题的演绎方法和基于逻辑的方法在 20 世纪 90 年代末再次得到广