

基于自动推理技术的智能规划方法^{*}

吕帅^{1,2}, 刘磊^{1,2+}, 石莲^{1,2}, 李莹^{1,2}

¹(吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012)

²(吉林大学 符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林 长春 130012)

Artificial Intelligence Planning Methods Based on Automated Reasoning Techniques

LÜ Shuai^{1,2}, LIU Lei^{1,2+}, SHI Lian^{1,2}, LI Ying^{1,2}

¹(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

²(Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of the Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

+ Corresponding author: E-mail: liulei@jlu.edu.cn

Lü S, Liu L, Shi L, Li Y. Artificial intelligence planning methods based on automated reasoning techniques. *Journal of Software*, 2009,20(5):1226–1240. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3468.htm>

Abstract: This paper introduces the concrete details of combining the automated reasoning techniques with planning methods, which includes planning as satisfiability using propositional logic, Conformant planning using modal logic and disjunctive reasoning, planning as nonmonotonic logic, and Flexible planning as fuzzy description logic. After considering experimental results of International Planning Competition and relevant papers, it concludes that planning methods based on automated reasoning techniques is helpful and can be adopted. It also proposes the challenges and possible hotspots.

Key words: intelligent planning; propositional logic; modal logic; nonmonotonic logic; description logic; automated reasoning; satisfiability

摘要: 对几种智能规划方法中利用的逻辑演绎与推理技术予以分析,分别介绍利用命题逻辑的基于可满足性的规划方法与规划系统,利用模态逻辑与析取推理的 Conformant 规划方法与规划系统,利用非单调逻辑的规划方法和利用模糊描述逻辑的 Flexible 规划方法,并结合国际规划竞赛和相关论文等的实验结论说明上述方法的有效性和可行性.最后,提出目前基于自动推理技术的智能规划方法所面临的挑战、可能的处理方法以及与之相关的研究热点与趋势.

关键词: 智能规划;命题逻辑;模态逻辑;非单调逻辑;描述逻辑;自动推理;可满足性

中图法分类号: TP18 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60603031, 60773097, 60873044 (国家自然科学基金); the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant Nos.20050183065, 20060183044, 20070183057 (高等学校博士学科点专项科研基金); the Jilin Province Science and Technology Development Foundation of China under Grant No.20060532 (吉林省科技发展计划项目)

Received 2008-07-09; Accepted 2008-10-07

智能规划(artificial intelligence planning),也称为自动规划(automated planning),是人工智能研究中的一个重要领域,同时也是一门涵盖知识表示、自动推理、非单调逻辑、人机交互和认知科学等方面的多领域交叉性学科^[1]。智能规划研究最早起源于自动推理与知识表示,在 20 世纪 90 年代之前一直采用逻辑演绎的方法予以求解,主要侧重于经典逻辑下的各种推理技术的利用。1996 年,Blum 等人设计的基于规划图的 Graphplan 规划系统很好地解决了知识表示过程中的指数级空间爆炸问题,使得智能规划领域逐步得到相关研究者的重视^[2]。

智能规划技术已广泛应用于航空航天、机器人控制、后勤调度、游戏角色设计和系统建模中,带来的成果是有目共睹的^[3-5]。海湾战争中美军配备的动态分析和重规划工具 DART 被用于自动后勤规划和运输调度中,从而使得过去需要几个星期才能完成的调度工作在几个小时内就可以完成,为此,美国国防部高级研究计划局称:“仅智能规划的这一项应用成果就足以补偿其在人工智能研究方面的近 30 年的投资”^[4]。智能规划技术在生产流水线调度领域以及火星漫步者号、哈勃太空望远镜等航空领域上的应用也展现了其巨大的应用前景^[5]。

自 1998 年至今连续举办的 5 届国际规划竞赛(International Planning Competition,简称 IPC)使智能规划技术得到了长足的发展^[6]。前 3 届参赛的规划系统主要考察系统性能,规划问题的处理时间是衡量系统优劣的唯一标准。在 IPC-4 中加入了概率规划问题,更多地考虑了复杂问题的处理能力。在 IPC-5 中加入了 Conformant 规划问题。在 IPC 发展过程中,需要处理的问题的规模逐渐加大,难度逐渐增强。标准的测试问题能够更加精细地描述复杂的客观世界,使得智能规划研究逐步贴近于处理复杂的实际问题。

现有的规划方法主要分为两大类:基于转换的规划方法与基于状态空间启发式搜索的规划方法^[7]。基于转换的规划方法将规划问题直接或间接地转化为若干经典问题(如命题可满足问题、模型检测问题、约束可满足问题、线性规划问题、非经典逻辑的定理证明问题等),通过高效求解转换后的目标问题间接地求解原规划问题。在各种基于转换的规划方法中,大都或多或少地利用了逻辑演绎与推理技术,规划问题的类一阶谓词逻辑表示是产生这种现象的根源。借鉴逻辑演绎与推理技术提高规划方法的效率已经得到相关研究者的重视。

本文主要考虑基于逻辑演绎与推理技术的规划方法与规划系统。首先介绍智能规划的相关概念和问题描述。然后分别结合目前国际上著名的规划系统来描述以下 4 类基于逻辑演绎与推理技术的规划方法:基于命题可满足性与一阶逻辑的经典规划方法、基于模态逻辑的 Conformant 规划方法、基于非单调逻辑的规划方法和基于模糊描述逻辑的 Flexible 规划方法。最后,给出结论与展望。

1 智能规划与基于自动推理技术的规划方法

目前,智能规划尚未有统一的定义,一般认为智能规划是找到从初始状态到达目标的动作序列的过程。根据 Ghallab 等人的描述,姜云飞等人将智能规划定义为“对周围环境进行认识与分析,根据预定实现的目标,对若干可供选择的动作及所提供的资源限制施行推理,综合制定出实现目标的动作序列”^[8]。在《计算机世界》上发表的“网络时代的人工智能”一文中,张钹将人工智能中的规划和推理定义为“在给定的目标和任务下,机器如何自动地生成一系列的动作和命令,以完成该给定的任务以及在不完全信息情况下,如何观察用户的行为,理解他们的意图”。

1.1 智能规划问题

规划问题的描述通常采用国际通用的规划域描述语言(planning domain description language,简称 PDDL)^[9],它类似于一阶谓词逻辑的表示方式。该语言随着 IPC 的需求,加入了条件效果、数值效果、概率效果等,可以更加详细地刻画所要处理的规划问题。现在通用的是 PDDL3.2,包含了对派生谓词与软约束的刻画以及对各种逻辑关系的表示方法。

对规划问题的抽象描述予以限制,分为经典规划问题和非经典规划问题。对于非经典规划问题,我们主要提及与本文相关的 Conformant 规划问题和 Flexible 规划问题。

规划问题包括域定义与问题定义两部分,分别定义规划问题的操作和初始/目标状态。一个经典规划问题 P 是一个三元组 (I, O, G) ,其中, I 为初始状态, O 为操作集, G 为目标状态集。这里,每个操作 $o \in O$ 发生的前提和导致的效果都是确定的。基于封闭世界假设, I 明确刻画描述一个状态的所有命题,在 I 中未出现的命题默认真值为假。 G

刻画目标状态需要满足的条件.例 1 是一个经典规划问题基于 PDDL 的部分描述.

例 1(Logistics 规划问题):Logistics 规划问题描述的是对于若干个城市的多个卡车与包裹,通过装载、运送与卸载等操作将包裹运送到指定位置的后勤调度问题.对于一个包含两个包裹 A, B ,两个位置 L, P ,以及一个卡车 R 的规划问题,其域描述与问题描述如下:

域描述: $load(X, Y, Z): PRE: at(X, Z), at(Y, Z); ADD: in(X, Y); DEL: at(X, Z)$
 $unload(X, Y, Z): PRE: in(X, Y), at(Y, Z); ADD: at(X, Z); DEL: in(X, Y)$
 $move(X, Y, Z): PRE: at(X, Y), fuel(X); ADD: at(X, Z); DEL: at(X, Y), fuel(X)$
 问题描述: $Init: at(A, L), at(B, L), at(R, L), fuel(R)$
 $Goal: at(A, P), at(B, P)$

Conformant 规划问题 CP 是一个三元组 (I, O, G) ,其中, I 为初始状态集, O 为操作集, G 为目标状态集.这里, I 不再是一个状态,而是所有可能的初始状态组成的状态集,每个操作 $o \in O$ 的效果是不确定的. Conformant 规划问题要解决的是在初始状态和动作效果不确定的情况下,找到一定能到达目标的规划解.

Flexible 规划问题 FP 是一个三元组 (I, O, G) ,其中, I 为初始状态, O 为操作集, G 为目标状态集.这里,每个操作 $o \in O$ 对于具体的动作带有不同的满意度.有的研究者将其定义为四元组,包含了对满意度的度量. Flexible 规划问题要解决的是对于不同动作的满意度(或偏好)度量,选择一个最让人满意或足够让人满意的高效规划解.

上述两类非经典规划问题分别是从小初始状态与动作效果的不确定性、动作的满意度方面对经典规划问题予以扩充得到的,更加符合客观实际问题的需求.

1.2 基于转换的规划方法与基于自动推理技术的规划方法

基于转换的规划方法将规划问题转换为其他类型的知识表示予以求解.1992 年之前,基于逻辑表示的规划问题仅依赖于逻辑演绎方法进行求解.逻辑演绎需要在确保可靠完全的条件下实施,普遍效率不高.1992 年, Kautz 等人提出将规划问题转换为命题可满足(propositional satisfiability,简称 SAT)问题予以求解的基于可满足性的规划方法^[10].在此基础上,陆续出现了将其转换为约束可满足问题、模型检测问题、线性规划问题和进化计算问题等的求解方法,相应的规划系统 SATPLAN^[11], AltAlt^[12], MIPS^[13], SGPlan^[14]等在 IPC 中都有不俗的表现.

本文所述的基于自动推理技术的规划方法有广义和狭义两种解释.狭义解释为:依赖于规划问题本身的逻辑语义,将其转换为某种逻辑表示的若干个定理证明问题,并调用相应逻辑的定理证明系统予以求解,转换后问题的解可以还原为原规划问题的规划解.广义解释为:在规划过程中,直接或间接地利用逻辑演绎与推理技术对规划过程中需要验证的某些结论予以证明.前者侧重于知识表示的转换,即编码过程;后者侧重于推理技术的应用,即证明过程.

规划问题转换为其他类型知识表示的转换方法称为编码方式(encoding),转换得到的新的知识表示称为编码(encode).编码可能是某种特定的存储结构、关系结构、子句集、公理或公理集等形式.为便于叙述,这里的编码只考虑公理层次的表示,尚未转换为易于处理的合取范式(conjunctive normal form,简称 CNF)或子句集形式.

定义 1(规划问题的编码). 对于特定的一种编码方式,规划问题的编码是一种知识表示,可以显式或隐式地部分刻画关于给定规划问题的如下特征:1) 操作的前提、效果之间的内在关系;2) 操作之间的关系;3) 初始状态和目标条件;4) (可选)对动作和状态的约束.

定义 2(规划问题的编码组合). 对于特定的一种编码方式,规划问题的编码组合是一种知识表示,能够显式或隐式地完全刻画关于给定规划问题的如下特征:1) 操作的前提、效果之间的内在关系;2) 操作之间的关系;3) 初始状态和目标条件;4) (可选)对动作和状态的约束.

编码组合对应于规划问题转换后的知识表示,是由若干规划问题的编码组成的.本文仅涉及各种转换为逻辑表示的编码方式.编码和编码组合是两个不同的概念,前者是规划问题的一部分知识表示,后者对应于一个合适的整体上的知识表示.在不引起混淆的情况下,本文不区分编码与编码组合.

中山大学姜云飞教授的研究组对基于转换的规划方法作了许多深入而有意义的研究.其中,吴康恒等人将

规划问题转换为模型检测问题予以求解^[15];吴向军等人将领域知识用于转换后的问题表示,设计的规划系统 StepByStep 利用了谓词知识树和谓词规划树提取领域知识^[16,17];陈蔼祥和凌应标等人深入研究了求解 SAT 问题的遗传算法,将规划问题转换为遗传算法等进化计算方法予以求解^[18,19];蒋志华等人提出了对规则集的动态基化方法,很好地处理了带派生谓词的派生规划问题,其对规则集的操作可以看作公理的推演和约简过程^[20].东北师范大学谷文祥教授的研究组对部分可观察强规划中的观察变量约减以及基于量化布尔公式的规划方法进行了深入的探讨^[21].吉林大学孙吉贵教授的研究组,研究了规划问题转换后的基于可满足性的编码的求解策略,利用(有向)归结与扩展规则等方法研究编码的性质等^[22].

2 基于命题可满足性与一阶逻辑的经典规划方法

在各种基于转换的规划方法中,目前公认的最成功的转换方法是将规划问题转化为一系列 SAT 问题进行求解,通称为基于可满足性的规划方法.

2.1 基于命题可满足性的规划方法的发展历程

1992 年,Kautz 等人提出了将规划问题转换为 SAT 问题进行求解的思想,首次提出了一种基于转换的规划方法,使成熟的 SAT 技术得以应用于处于萌芽状态的规划方法中^[10].该编码固有限制了在一个时间步仅有 1 个动作发生,只能处理生成顺序规划解的情况,故其转换后的编码也称为线性编码.1996 年,Kautz 等人通过公理的组合和规划图结构,设计了基于图规划的编码方式和基于状态的编码方式,实现了 SATPLAN 规划系统,使并发规划问题得以解决^[23].同年,Kautz 等人提出了提升的因果编码方式,部分地利用了一阶谓词逻辑的知识表示^[24].1998 年,Kautz 等人设计了倍受关注的 Blackbox 规划系统,并在 Carnegie Mellon 大学举办的第 1 届 IPC 中获得了 STRIPS 问题域的冠军^[25].

Baiocchi 等人在 1998 年提出了规划约束描述语言(planning constraints definition language,简称 PCDL)和结合 SATPLAN 与 PCDL 描述的规划系统 C-SATPLAN,该描述语言扩大了对规划问题的描述范围^[26].Rintanen 在规划问题转换为 SAT 表示过程中加入不变式约束,使得 SAT 求解器效率有所提升,提高了规划系统的性能^[27].2000 年,Giunchiglia 等人将基于可满足性的规划方法扩展到刚刚提出的 Conformant 规划问题中,并得到了较好的结果^[28].2001 年,基于因果理论的工作,Castellini 等人设计了基于可满足性的 Conformant 规划系统 C-plan^[29].

2004 年,改进的 SATPLAN 参加了 IPC-4,并获得了最优 STRIPS 规划域的冠军.结果表明,SATPLAN2004 的优势明显,在 5 个域获得第一,2 个域获得第二,其他最好的规划系统 4 个域获得第二^[6].SATPLAN 的再一次成功主要取决于 SATPLAN2004 中采用了最先进的 SAT 求解器 Siege,并且测试问题比前几届 IPC 的问题要难^[30].虽然处理并发规划解已成为可能,但直到 2004 年,一直没有足够的语义支撑.2004 年,Rintanen 等人从逻辑上给出了 \forall -Step,Process-Step 和 \exists -Step 这 3 种并发规划解的严格定义和求解策略^[31].除此之外,Rintanen 还为此设计了困难的相变问题,使得用来测试基于可满足性的规划系统的问题更加完备,也能从根本上测试其性能极限^[32].

2005 年,Benedetti 等人提出了一种基于可满足性的分布式规划方法^[33],使得对于分布式规划问题,可以将其转换为分布式可满足性问题,通过求解子问题合成规划解.该方法给出了具体的转换方法和规划解合成技术,使得多个智能体之间的协作成为可能.

2006 年,Xing 等人在 SATPLAN2004 的基础上设计了处理时态规划问题的 Maxplan 规划系统^[34].Kautz 等人设计的 SATPLAN2006^[11]是在 Blackbox 规划系统上的又一次改进.Maxplan 和 SATPLAN2006 均参加了 IPC-5,并一起获得了 Optimal Planning(即 Propositional 域)的冠军.

在 IPC-4 和 IPC-5 中获得冠军或优秀的规划系统中,依赖于转换方法的规划系统也占有绝对优势.

2.2 基于命题可满足性的规划系统框架

基于命题可满足性的规划系统框架如图 1 所示.

首先通过构造长度为 $N=1$ 的编码,对该编码调用 SAT 求解器予以判定,如果返回 UNSAT,则表示所限定的步骤数不足,需要进一步构造长度为 $N+1$ 的编码,再调用 SAT 求解器,直到 SAT 求解器返回 SAT,提取相应的规

划解.

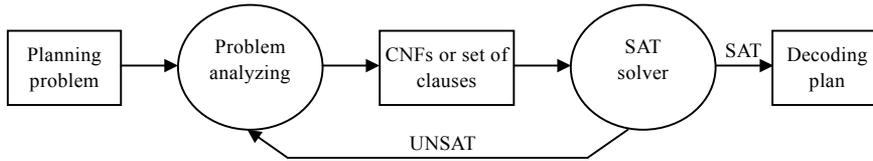


Fig.1 Framework of SAT-based planner

图1 基于可满足性的规划系统框架

在基于命题可满足性的规划方法中,最主要的是两部分:利用不同的编码方式对规划问题的编码过程和调用 SAT 求解器对转换后的 SAT 问题的判定过程.这两部分可以完全独立,即 SAT 求解器的调用与编码过程可以完全分离.SAT 求解器的发展一直领先于智能规划的发展进度,依赖于高效的 SAT 求解技术是基于可满足性的规划方法一直领先的原因.

2.3 基于命题逻辑的问题表示

编码方式是基于可满足性的规划方法中设计的关键,不同的编码方式决定了规划问题对应的编码规模与相应 SAT 求解器的求解效率.在基于可满足性的规划方法中,规划问题的表示采用命题逻辑予以刻画.将规划问题转换为 SAT 问题是通过一阶公式的完全实例化得到的.

定义 3(规划问题的命题可满足性编码). 对于特定的一种编码方式,一个规划问题的命题可满足性编码是一个公理集,可以通过完全实例化得到命题逻辑的公式集.该公理集能够刻画关于给定规划问题的如下特征:1) 操作的前提、效果之间的内在关系;2) 操作之间的关系;3) 初始状态和目标条件;4) (可选)对动作和状态的约束.

通过构造公理,得到了一个一阶逻辑下的公理集,将该公理集中的公理转换为类 CNF 范式,并用有限个实例(对应于规划问题中的个体域)对其实例化就得到了可以直接用于 SAT 求解的子句集.

一般情况下,利用通过转换并完全实例化得到的子句集的参数衡量编码规模.其参数包括子句集包含的命题变元数(变量数)、子句集的规模(子句数)以及子句平均长度.此外,也可以考虑其他对子句关系等的刻画,如互补因子^[35].子句平均长度对于随机生成的 SAT 问题的刻画是必须的,但在规划问题的编码中,一般不考虑该参数,主要原因是:大量子句(互斥公理、前提公理和效应公理)都是二元子句.我们将规划问题转换得到的编码利用命题扩展规则方法予以判定,并通过测试得到其子句平均长度均在 2.0 左右,互补因子低于 0.1,相对于直接应用命题扩展规则方法,利用归结方法更有效^[22,36,37].互补因子一般在设计专用规划系统时考虑,针对特定领域规划问题的编码中子句之间的互补程度,设计相应的启发式信息提取策略或考虑有效不完备的判定子集.

定义 4(基于可满足性的编码的编码规模). 对于特定的一种基于可满足性的编码方式,一个规划问题的编码通过转换和完全实例化得到命题逻辑的子句集.该子句集中包含的子句存储占用的存储空间称为该编码的编码规模.

针对上面的分析,一般情况下,编码规模用变量数和子句数予以刻画.

为了说明问题的具体表示形式,例 2 和例 3 分别描述规划问题命题化的编码形式和转换得到的 CNF 形式.

例 2(Logistics 规划问题):不考虑燃料问题,初始状态为包裹 P_1 在 C 地,包裹 P_2 在 F 地,汽车 C_1, C_2, C_3 和卡车 t 分别在 A, B, G, E 地,则将包裹 P_1 运到 G 地、将包裹 P_2 运到 E 地的规划问题的 STRIPS 型编码如下:

Variables: $at-p1-a$ $at-p1-b$ $at-p1-c$... $at-p2-g$ $at-c1-a$... $at-c3-g$ $at-t-a$... $at-t-e$ $in-p1-c1$... $in-p2-t$

Init: $at-p1-c$ $at-p2-f$ $at-c1-a$ $at-c2-b$ $at-c3-g$ $at-t-e$

Goal: $at-p1-g$ $at-p2-e$

Operator $drive-c1-a-d$: PRE: $at-c1-a$ ADD: $at-c1-d$ DEL: $at-c1-a$

...

Operator *unload-c1-p1-c*: *PRE*: *at-c1-c in-p1-c1* *ADD*: *at-p1-c* *DEL*: *in-p1-c1*

例 3(Logistics 规划问题):假定动作 $move(R,L,P)$ 表示卡车从 L 地移动到 P 地,其需要前提卡车 R 在 L 地 $at(R,L)$,且卡车有燃料 $fuel(R)$,则前提公理可表示为 $move(R,L,P,i) \rightarrow at(R,L,i) \wedge fuel(R,i)$,则其转换得到的 CNF 为 $\neg move(R,L,P,0) \vee at(R,L,0), \neg move(R,L,P,0) \vee fuel(R,0), \dots, \neg move(R,L,P,N) \vee fuel(R,N)$.作为标准 SAT 求解器的输入文件可能采用如下表示形式:

-12 23 0 //其中,12 为 $move(R,L,P,0)$ 的编码,23 为 $at(R,L,0)$ 的编码

-12 29 0 //其中,29 为 $fuel(R,0)$ 的编码

...

-258 658 0 //其中,258 为 $move(R,L,P,N)$ 的编码,658 为 $fuel(R,N)$ 的编码

注: $move(R,L,P)$ 在不同的时间步对应于不同的命题,有不同的编码.彼此之间直接的通过框架公理,间接的通过前提公理和效应公理相关联.

基于可满足性的规划方法的优点在于,可以定义一些“人为”的约束,灵活地添加对操作、状态变量的限制,使其能够得到满足用户特定需要的规划解.比如,某个动作一定要在某几个时间步内发生、两个动作的先后顺序、在某个时间步刻画某一性质的命题或公式成立等.若添加了这样的公理,则得到的规划解必然满足上述限制.基于这种强约束的限制在现实世界的生产加工与调度等领域是广泛存在的.

不同的编码方式是对不同类型公理的有效组合.在基于图规划的编码方式下,只需要考虑前提公理和后向链公理,而在基于状态的编码方式中,则需要考虑状态公理和状态转移公理.

下面,分别简要介绍几种最为重要的基于可满足性的编码方式,详见文献[10,11,23-25].

2.3.1 线性编码

之所以称为线性编码,是因为其对应的规划解是一个顺序规划解,不能处理并发规划问题.动作数为 N 的编码理论由以下公理组成(采用三操作 Block World 问题举例说明):

1) 表示初始状态与目标条件的静态公理(初始状态公理与目标条件公理).例如, $\vdash on(A,B,1), \vdash on(B,A,3)$.

2) 动作蕴涵执行前提的动态公理(前提公理).例如, $\vdash \forall x,y,z,i.move(x,y,z,i) \rightarrow (clear(x,i) \wedge clear(z,i) \wedge on(x,y,i))$.

3) 动作蕴涵执行效果的动态公理(效应公理).例如, $\vdash \forall x,y,z,i.move(x,y,z,i) \rightarrow (clear(y,i+1) \wedge on(x,z,i+1) \wedge \neg clear(z,i+1))$.

4) 断言在一个时间步仅有 1 个动作发生的公理(动作互斥公理).例如, $\vdash \forall x,x',y,y',z,z',i.(x \neq x' \vee y \neq y' \vee z \neq z') \rightarrow \neg move(x,y,z,i) \wedge \neg move(x',y',z',i)$.

5) 断言在每个时间步都有动作发生的公理.例如, $\vdash \forall i < N. \exists x,y,z.move(x,y,z,i)$.

将产生的上述公理分别用规划问题中的个体域完全实例化,得到若干命题逻辑公式,将该公式集输入给 SAT 求解器进行判定.

2.3.2 基于图规划的编码

基于图规划的编码利用了图规划中的规划图构建方法.其原理是通过构建一个时间步为 N 的规划图,并将该规划图自动转换为 CNF(从目标层开始反向执行转换过程).与线性编码类似,基于图规划的编码,每次产生对应于 N 层规划图的编码由如下公理组成:

1) 初始状态公理与目标条件公理(同上).

2) 每个事实蕴涵其前一层中以它为添加效果的动作的析取式.即每个事实蕴涵其支持动作的析取(后向链公理).例如,在 Logistics 域中的 $in(A,R,3)$ 命题则对应了如下的后向链公理:

$$\vdash in(A,R,3) \rightarrow (load(A,R,L,2) \vee load(A,R,P,2) \vee maintain(in(A,R,2))) \quad (1)$$

3) 前提公理(同上).

4) 动作互斥公理.这里的动作互斥关系是经过规划图中的互斥传播策略得到的.

这里,在 2)型与 3)型公理中,隐含地包含了框架公理.对于上面的例子,对于 $maintain(in(A,R,2))$ 动作,由 3)型公理,得到 $\vdash maintain(in(A,R,2)) \rightarrow in(A,R,2)$, 则与式 (1) 演绎得到: $\vdash \neg in(A,R,2) \wedge in(A,R,3) \rightarrow load(A,R,L,2) \vee$

$load(A,R,P,2)$,这就是解释性框架公理对于命题 $in(A,R)$ 的正框架公理形式.

该编码方式通过规划图中的约束表示间接生成 SAT 问题,是目前间接转换方法中一种最有效的处理方法.

2.3.3 基于状态的编码

基于状态的编码脱离了规划图结构,依赖于状态之间的转移关系构造相应的编码理论.它包含如下公理:

1) 初始状态公理与目标条件公理(同上).

2) 状态公理.例如,对于 Block World 域问题,状态公理为仅有 1 个积木可以在其他积木上;一个积木不可能上面既为空,又存在物体等.对于 Logistics 域问题,则表示每个可移动的物体每次只能装载在一个卡车上,而且每个时刻,卡车只能在 1 个地点等等.其对应了部分命题互斥公理和部分前面介绍的动作互斥公理.

3) 状态转移公理.用公理来表示状态转移,其功能部分等价于框架公理.例如, $\vdash \neg in(x,y,i) \wedge in(x,y,i+1) \rightarrow \exists z.load(x,y,z,i)$.

4) 前提公理、效应公理和动作互斥公理(同上).

基于动作的编码与此类似,在编码过程中仅依赖于表示动作的命题,二者可以看作是两种表示的极端情况.它们都脱离了规划图结构,采用直接转换为 SAT 问题的转换方式,但编码过程更加复杂,对不同的问题处理方式有所不同,难以实际操作.

2.3.4 几种编码的编码规模比较

几种编码的编码规模如文献[23,25]中所示.文献[23]中的表 2 表明:基于图规划的编码中的变量数远远多于基于状态的编码中的变量数,而基于状态的编码仍然是有效的,只不过是编码中对变量作了一定程度的约简.文献[25]中的表 4 表明:对于得到的编码,首先通过单元传播和失败文字规则等可以对其进行有效的约简.

上述实验结果有很强的对比性:约简后的基于状态的编码的效率明显低于原编码的判定效率,而约简后的基于图规划的编码,则很大程度上提高了判定效率.这值得研究者对编码规模与求解效率的关系进一步研究.

2.4 命题逻辑的推理能力

将规划问题转换为 CNF(或子句集)后,在调用 SAT 求解器予以判定的过程中,各种推理技术在编码上的利用是不同 SAT 求解技术的利用.

2.4.1 编码组合的有效性

编码的选择首先要保证可靠性和完全性,这也是此类方法的困难所在.只有在保证了可靠、完全的前提下,才能进一步考虑编码的约简和提取各种启发式信息加快 SAT 的判定过程.

定义 5(编码组合的可靠性). 一个编码组合是可靠的,对于任意一个有效模型,都对应着原规划问题的一个有效规划解.

定义 6(编码组合的完全性). 一个编码组合是完全的,对于任意一个有效规划解,存在其对应的有效模型满足编码的约束.

定义 7(编码组合的有效性). 一个编码组合是有效的,如果该编码组合是可靠的和完全的.

不同公理组合对应的有效编码方式保证编码的有效模型与有效规划解一一对应.而 SAT 判定的高效也保证了这种转换过程有实际意义.线性编码、基于图规划的编码、基于状态的编码、基于动作的编码以及基于提升的因果编码^[24]都是有效的.它们的可靠完全性也保证了如果找到规划解,则该规划解是最优的(根据最优定义,规划解的步骤最少,而不是动作数最少);如果存在最优规划解,则理论上一定能找到(在实际执行过程中,受到存储空间和程序自身能力的限制,有些问题在规定时间内难以找到有效的规划解).

由于编码组合中的编码在基于可满足性的编码方式中彼此独立,通过选择不同类型的公理或约束形式,可以构造不同种类的编码.我们在此作了许多尝试,在基于图规划的编码方式下,放松互斥公理、对目标条件预处理、明确添加框架公理等.实验结果表明:基于动作互斥公理的部分放松得到的编码是可靠完全的;框架公理的作用对并发规划问题更加明显,而在线性规划问题中,框架公理则失效;改进的基于 PMA(partial mutex axioms)的编码方式和基于 FA(frame axioms)的编码方式对应的规划系统对于 SATPLAN2006 规划系统都有不同程度的性能提高.然而,每种编码方式对于不同的问题表现出截然不同的性能,难以设计通用的有效编码组合.

2.4.2 编码组合的可满足性判定方法

基于命题可满足性的规划方法利用了命题逻辑的完全可判定性.对于转换为命题可满足性问题的编码组合,需要调用 SAT 求解器判定其可满足性,可以利用命题逻辑的归结方法、扩展规则方法、表推演等各种证明方法.目前最为有效的是有向归结方法.我们设计并实现了与归结方法互补的扩展规则方法,并将其应用于编码组合的可满足性判定过程中^[22,35-39].实验结果表明,由于编码组合对应的子句集的互补因此过小,基于扩展规则的定理证明方法不适用于直接处理转换得到的编码组合.可以考虑通过扩展规则的知识编译过程^[40]将编码组合的互补因子提高,之后再利用扩展规则方法求解.

2.5 基于命题逻辑的规划系统

基于可满足性的规划方法对应的规划系统包括: SATPLAN, Blackbox, SATPLAN2004 和 SATPLAN2006 等.

1) SATPLAN 规划系统(1996):将 STRIPS 型规划问题直接转换为一系列 SAT 问题,并使用快速的随机/系统判定器进行求解,之后将找到的有效模型转换为相应的规划解.该系统需要手工编码,需要人工干预执行.

2) Blackbox 规划系统(1998):IPC-1 的冠军,该规划系统基于 SAT 框架和规划图方法.首先构造 N 层规划图,之后将规划图转换为 SAT 问题,并使用快速的随机/系统判定器进行求解,如果判定为可满足,则将找到的有效模型转换为相应的规划解,否则继续构造 $N+1$ 层的规划图.

3) SATPLAN2004 规划系统(2004):IPC-4 的最优命题域的冠军,在 SATPLAN 规划系统的基础上, SATPLAN2004 由于存储的限制,没有计算互斥传播,仅编码动作为布尔变量.

4) SATPLAN2006 规划系统(2006):目前基于可满足性的规划方法中最高效的规划系统,IPC-5 的最优命题域的冠军.它和 SATPLAN2004 采用了相同的 SAT 求解器,在规划图生成过程中计算互斥传播,将命题和动作都编码为布尔变量,生成了命题变元之间的互斥子句,没有生成动作变元之间的互斥子句.

2.6 基于一阶逻辑的问题表示与推理

在推理过程中,有时采用一阶逻辑表示可能更方便.提升子句是可能包含自由变元的一阶文字的析取,提升的 SAT 问题是一个提升子句集的可满足性问题.

1996 年, Kautz 等人提出了提升的因果编码^[24].提升的因果编码的思想是:首先,将操作之间的关系通过一阶谓词逻辑公式表示的触发条件相关联(也可以理解为动作之间通过命题条件相关联),形成包含因果关联集和步骤集的基于因果关系的规划问题;其次,将基于因果关系的规划问题归约为提升的 SAT 问题;最后,添加对等词的处理等辅助子句将提升 SAT 问题还原为普通 SAT 问题,保证对于普通 SAT 问题的判定等同于提升 SAT 问题的判定,调用 SAT 求解器予以判定.

在基于因果图的启发式中,也利用了命题与动作的关系,其表示形式类似于因果编码中的因果关联.基于该编码的分析,目前仅局限于理论上的复杂性度量,还未得到实际应用.

2.7 结 论

上述基于命题可满足性与一阶逻辑的规划方法的共同点在于其利用了高效的可满足性判定技术.随着需要描述的现实世界的日趋复杂和处理问题的变化多样,需要更加一般化的表示形式和更加精简的编码方法.否则,占有巨大存储空间的问题编码将受到可满足性求解的限制,而不仅局限于知识表示理论.

考虑编码规模与求解效率的折衷,也分为两个不同层面的含义:1) 当规划问题的编码规模不受限制时,编码规模的大小和求解效率的关系;2) 当规划问题的编码规模必须得到控制时,编码的不同约简与求解效率的关系.这都是基于可满足性的规划方法中必须要考虑的因素.

3 基于模态逻辑的 Conformant 规划方法

Conformant 规划是目前智能规划研究领域的的一个研究热点.它可以在没有感知动作的帮助下处理初始状态和动作效果的不确定性,比经典规划更接近现实问题.

Conformant 规划问题虽然直到 2006 年才得到公认,并用来评价研究团队设计的 Conformant 规划系统的性

能.但早在1998年,Weld等人就已经提出了Conformant规划的思想,并借助于Graphplan的求解框架设计了CGP规划系统(Conformant Graphplan)用来求解Conformant规划问题^[41].Conformant规划问题在求解过程中通常被转换为信念状态空间上的搜索问题,并在此基础上设计相应的启发式策略以提高系统性能^[41].然而,初始状态和动作效果的不确定性可能导致信念空间中可能世界状态的数目呈指数级增长,利用在可能世界状态上的启发式搜索求解规划问题不能从根本上解决指数级空间爆炸问题^[42].

在2006年的第5届IPC中,Conformant规划得到了足够的重视,首次作为标准测试问题归入不确定性规划问题域中.在IPC-5中,共有3个研究团队设计的8个规划系统参加了Conformant规划问题域的比赛,Geffner等人设计了Sat,Sat-Serial, T_0 和KP这4个规划系统^[43-45].其中,Sat和Sat-Serial能够得到最优规划,而其他6个规划系统不能保证得到最优规划. T_0 规划系统获得了次优规划域的冠军,与其相关的论文获得了ICAPS的最优论文奖^[43].同时,KP^[44]规划系统以及Bryce等人设计的POND^[46]规划系统也表现不俗.

IPC-5中表现优异的Conformant Fast-Forward(Conformant FF)^[47]规划系统利用初始信念状态以及到达当前信念状态的动作序列隐含地表示当前信念状态,有效地压缩了状态表示需要的空间,并在这种压缩的编码方式下提取启发式信息,其在IPC-5中未能获得冠军主要取决于其不能处理带有析取目标的Adder和Sortnet规划问题域.而Geffner等人设计的KP和 T_0 规划系统则是将Conformant规划问题首先通过编译过程转换为可以在多项式时间内计算映射与模型计算的d-DNNF(确定性可分解否定范式)知识表示,之后通过经典规划系统FF进行求解.为了处理可能世界之间的状态转换,还利用了知道逻辑K算子和析取推理技术对命题(或状态)予以刻画和推理^[43,44].其出色的处理能力和高效的求解效率也表明,基于自动推理技术的规划方法是值得关注的.

3.1 基于模态逻辑的问题表示

Conformant规划问题中包含了初始状态和动作效果的不确定性,而初始状态的不确定性可以通过动作的转换方法而删除.对于动作效果的不确定性,从其描述语义上则对应于模态逻辑的多个可能世界,所以将Conformant规划问题转换为可能世界状态上的启发式搜索问题是自然的.

模态是指事物或者认识的必然性和可能性等性质,模态逻辑(modal logic)是研究模态推理形式及其规律的逻辑,是自动推理研究领域中最具影响力的逻辑之一,它能够精确地描述在推理情况不确定的条件下,可能世界之间的关系结构和转换关系.通常用 \square 表示必然性算子,用 \diamond 表示可能性算子.对可能性和必然性赋予特定的含义,可以派生出很多类型的逻辑,称为广义模态逻辑.如将必然性算子 \square 理解为知道(K:know),则其对应的逻辑系统称为知道逻辑.知道逻辑有时也被认为是认知逻辑的一个分支.

3.1.1 基于知道逻辑算子K的知识表示

2006年,Geffner等人首次提出将知道逻辑算子K引入规划表示,分别对一个文字L构造两个“命题”KL和K¬L,其中KL表示知道L成立,K¬L表示知道L不成立.而对于¬KL∧¬K¬L,则表示对L成立与否不确定.在这种表示下,对一个命题P的推断则转换为对KP或K¬P的真假的推断.

首先,将Conformant规划问题 $P=(F,O,I,G)$ 转换为经典问题 $K_0(P)=(\langle F',O',I',G' \rangle)$,其中: $F'=\{KL,K¬L|L\in F\}$; $I'=\{KL,\neg K¬L|L\in I\}\cup\{\neg KL',\neg K¬L'|L'\notin I\}$; $G'=\{KL|L\in G\}$; $O'=O\{L$ 替换为 $KL|L$ 为前提, $a:C\rightarrow L$ 替换为 $a:KC\rightarrow KL$ 和 $a:\neg K¬C\rightarrow\neg K¬L|a:C\rightarrow L$ 为条件效果}.

其次,为了考虑析取推理,利用动作编译过程,将动作转换为包含KL型命题的规则.如果规划问题P包含规则 $a:C\wedge\neg L\rightarrow L$,并且对于动作a,有以¬L为头的规则 $a:C_i\rightarrow\neg L(i=1,\dots,n,n\geq 0)$,则K(P)中添加规则 $KC\wedge K¬L_1\wedge\dots\wedge K¬L_n\rightarrow KL(L_i$ 是 C_i 中的文字).

对于不确定的 X_i ,引入原子 L/X_i 表示条件信念,如果 X_i ,则有L成立($X_i\supset L$).理论上,应该是对于任意规则 $a:C\wedge X_i\rightarrow L$ 都应生成规则 $a:KC\rightarrow L/X_i$.由于希望刻画当动作a刚刚发生后,如果 X_i 成立,则有L成立,需要添加相应的转换规则处理形如 $X_1\vee\dots\vee X_n,X_n\supset L,\dots,X_n\supset L\models L$ 的析取推理:1) 分裂规则,如果有规则 $a:C\wedge X_i\rightarrow L$,则添加规则 $a:KC\rightarrow L/X_i$,初始化 L/X_i 为假;2) 合并规则,添加带有条件效果 $(L/X_1\vee K¬X_1)\wedge\dots\wedge(L/X_n\wedge K¬X_n)\wedge F_{X,L}\rightarrow KL$ 的新动作 $merge_{X,L}$,初始化 $F_{X,L}$ 为真;3) 保护规则,如果有规则 $a:C\rightarrow Y(Y$ 为¬L或¬ $X_i)$,则添加规则 $a:\neg K¬C\rightarrow\neg F_{X,L}$.

基于上述表示,对于析取推理的有效处理能够保证在多可能状态下的有效推理的进行.

3.1.2 基于模态算子 \Box 和 \Diamond 的知识表示

为了刻画一个命题 P 是否成立,用 KP 和 $K\neg P$ 刻画即可.但是对于一个可能的状态或者可能的状态集,这种刻画就需要大量的 KP 和 $K\neg P$ 形式的“原子命题”.

我们提出了引入模态算子刻画命题和状态的方法,并设计了与之相关的公理形式.

在存在多个可能世界的模态下,对于一个命题(或状态)的刻画,至少包含了两种性质:一个是某个可能世界里的命题刻画的可能性,另一个是所有相关的可能世界里的状态刻画的必然性.例如,刻画物体 A 可能在 L 地和 P 地,可能性表示为 $\Diamond at(A,L) \wedge \Diamond at(A,P)$,必然性表示为 $\Box(at(A,L) \vee at(A,P))$.两个公式的组合才能精确地表示物体 A 可能在 L 地和 P 地的事实.

假定以命题 Q 为删除效果的动作集为 $\{A_i; i=1, \dots, n\}$,以 Q 为条件删除效果的动作集为 $\{B_j; j=1, \dots, m\}$,每个 B_j 的条件效果为 $(C_{jk}, CA_{jk}, CD_{jk}), k=1, \dots, t$,且至少存在 j_r ,有 $Q \in CD_{j_r}$,则产生的正框架公理为 $\Diamond Q \wedge \neg A_1 \wedge \dots \wedge \neg A_n \wedge \neg(B_1 \wedge C_{1r}) \wedge \dots \wedge \neg(B_m \wedge C_{mr}) \rightarrow \Box \Diamond Q$.由类似的一阶模态公式组成的公理集通过实例化形成最后的编码.

对于状态可能性的精确刻画能够在保证有效性的前提下,状态转换有效地进行下去.

3.2 模态逻辑的推理能力

对于上面定义的“命题” KL 与 $K\neg L$,将其看成命题逻辑下的原子命题予以判定,同时需要添加刻画两个原子之间关系的公理,使得 KL 与 $K\neg L$ 不能同时成立.

在 KP 与 T_0 规划系统的整个处理过程中,将转换后得到的经典规划问题(所有的模态算子连同其作用的文字一起看成一个命题变元)利用基于启发式搜索的规划系统 FF 予以求解.

而第 2 种表示方式则将对应的规划问题转换为一系列模态公理的判定问题,也同样可以转换为模态逻辑下的可满足性问题.不同公理的有效组合保证了编码方式的有效性.

3.3 基于模态逻辑的规划系统与规划方法

针对 $Conformant$ 规划问题中的不确定性知识表示方法和求解策略,研究人员设计了许多 $Conformant$ 规划系统,包括前面提到的 $CGP, T_0, KP, POND, Conformant FF$ 以及 $CMBP^{[48]}, CAItAlt^{[49]}, GPT^{[50]}$ 和 $C-plan^{[29]}$ 等,其中最为人瞩目的是参加了 $IPC-5$ 的 $Conformant FF, POND, KP, T_0$,其中, KP 和 T_0 利用了模态逻辑表示方法.

1) KP 规划系统(2006): $IPC-5$ 中 $Conformant$ 域的优秀的次优规划系统,该规划系统将 $Conformant$ 规划问题直接转换为经典规划问题,并调用高效的 FF 规划系统予以求解.在转换过程中,利用了定义命题模态化的模态命题,引入多个推理规则以标记效果的发生与否,很好地实现了析取推理能力.其对于 $Conformant$ 宽度为 0 的规划问题能够保证完全性,即对于不需要析取推理的规划问题是正确完全的,而对于大部分规划问题($Conformant$ 宽度为 1)则不能保证完全性.

2) T_0 规划系统(2006): $IPC-5$ 中 $Conformant$ 域的冠军,该规划系统类似于 KP ,也是将 $Conformant$ 规划问题直接转换为经典规划问题,并调用高效的 $FF(v2.3)$ 规划系统予以求解.不同的是其利用了二元相关性,保证了二值不确定性下的规划问题求解是完全的,即对于大部分 $Conformant$ 宽度为 1 的规划问题能够保证可靠完全性.

规划系统 KP 和 T_0 在 $Hector Geffner$ 看来,是一簇系统中的前两个,即 $K_i(P)$ 中 $i=0$ 和 $i=1$ 的情况.由于其分析规划问题大多数宽度都不超过 1,所以没有进一步考虑 $i=2$ 等情况.

上述两个规划系统在 $IPC-5$ 中有非常突出的表现,也体现了逻辑推理能力在规划问题求解过程中的作用,但其知识表示和处理能力还存在不足.比如,除了对动作进行预处理以外,上述规划系统还不能处理动作效果的不确定性(目前,除了 CGP 与 $CMBP$ 之外,其他 $Conformant$ 规划系统都不能处理动作效果不确定性).

我们提出了将 $Conformant$ 规划问题转换为模态逻辑 D 公理系统的规划框架不同于上面介绍的规划系统中仅利用模态逻辑的知识表示,而是将规划问题转换为逻辑演绎问题进行求解.在利用模态算子 \Box 和 \Diamond 进行知识表示的同时,构造框架公理等与动作本身以及动作之间关系相关的动态公理,生成与初始状态集和目标条件相关的静态公理,并形成模态公式集,调用相应的模态可满足性判定方法予以求解.该方法无法解决可能世界状态空间指数级爆炸的问题,若需要处理大规模问题,还需要考虑适当的启发式信息提取策略.

3.4 结 论

上述基于模态逻辑的 Conformant 规划方法的共同点在于,都利用了对命题或状态的可能世界语义下的有效刻画.Conformant 规划问题虽然由于不包含感知动作而使得其应用受限,但其需要考虑的多个可能世界下的状态转换以及对不确定断言的处理是符合现实世界问题抽象的需求的,上述两种策略都可以用来进一步研究与多个可能世界相关的不确定性断言推理.

4 基于非单调逻辑的规划方法

1997年,Dimopoulos等人提出了基于非单调逻辑的规划表示,并给出了初步的证据表明将规划系统(如SATPLAN和Graphplan)与非单调推理结合可以设计出高效的规划系统^[51].

4.1 非单调逻辑的推理能力

非单调逻辑程序的规则形式如 $R:L \leftarrow A_1, \dots, A_n, \text{not } B_1, \dots, \text{not } B_m (n \geq 0, m \geq 0, L, A_i \text{ 和 } B_j \text{ 为原子})$. Dimopoulos 等人设计了非单调逻辑程序下的规划编码、编码的稳定模型对应于有效的动作序列,即规划解.

对于规划问题 L ,其对应的逻辑程序 P_L 包含如下规则,称为基于约束的编码(constraint-based encoding)^[51]:

1) 效应公理.对于每个在其添加效果中包含命题 $fluent_i$ 的操作 $oper_j$,有规则 $fluent_i(t) \leftarrow oper_j(t-1)$.

2) 前提和互斥公理.对于每个操作 $oper_i$,有规则 $oper_i(t) \leftarrow precon_{i1}(t), \dots, precon_{im}(t), switchon_i(t), \text{not } contradict_i(t)$ 和 $contradict_i(t) \leftarrow controp_{il}(t)$,其中, $controp_{il} (l=1, \dots, n)$ 为与操作 $oper_i$ 冲突的操作, $precon_{ij} (j=1, \dots, m)$ 为操作 $oper_i$ 的前提.

3) 操作选择公理.对于每个 $switchon_i$ 谓词,添加如下两个规则: $switchon_i(t) \leftarrow \text{not } blocked_i(t)$ 和 $blocked_i(t) \leftarrow \text{not } switchon_i(t)$,保证如下两个原子当一个成立时,另一个为假.

4) 框架公理.对于每个命题 $fluent_i$,有规则 $fluent_i(t) \leftarrow fluent_i(t-1), \text{not } changefluent_i(t-1)$,对于每个在其删除效果中包含命题 $fluent_i$ 的操作 $oper_j(t)$,有规则 $changefluent_i(t-1) \leftarrow oper_j(t)$.

5) 初始和目标状态公理.初始状态的命题在第 0 时间步成立,目标状态的命题在最后一个时间步成立.

也可以通过修改上面的编码来约简 NAF(失败即否定,negation as failure)文字数.例如,前提和互斥公理可以写成:对于每个操作 $oper_i$,有规则 $oper_i(t) \leftarrow precon_{i1}(t), \dots, precon_{im}(t), switchon_i(t)$ 和 $inco \leftarrow oper_i(t), controp_{ij}(t)$,其中 $(j=1, \dots, n)$,最后需要计算一个使得目标状态为真, $inco$ 为假的稳定模型.

该方法与基于可满足性的规划方法的不同之处在于:1) 在逻辑程序中直接表示操作之间的互斥;2) 不包含前提蕴涵公理.与基于规划图的编码的不同之处是采用框架公理代替 **noop** 动作解决框架问题.与基于命题逻辑的编码方式最主要的不同之处是:1) 逻辑程序中在问题表示中需要引入新的谓词符号;2) 逻辑程序的搜索空间仅由 NAF 文字组成.

4.2 基于非单调逻辑的规划方法

Dimopoulos 等人利用其上述编码方式将规划问题转换为逻辑程序,并调用基于稳定模型语义的有效实现的 SMOBELS 求解系统^[52]来处理转换得到的逻辑程序.SMOBELS 计算稳定模型的性能主要依赖于谓词个数以及参数个数(谓词元数).在 Dimopoulos 设计的转换过程中,分别实现了线性编码、并发编码、后线性化和弱后线性化等技术,使得该系统在 Block World, Trains, Fixit 以及 Logistics 问题域体现了良好的性能.

该系统还未考虑动作数的最小化以及如何判定最优规划解等问题,但其关于动作互斥的自动推理技术值得进一步考虑.

5 基于模糊描述逻辑的Flexible规划方法

2000年,Miguel等人提出的 Flexible 规划问题(又称为柔性规划问题)在规划问题中引入对操作的满意度度量,是对经典规划的一种放松.其设计的 Flexible Graphplan 系统也是第一个处理该类问题的规划系统^[53].

由于对该类问题的描述一直难以统一,是对操作施加模糊刻画,还是对状态考虑偏好的度量,值得研究者考

虑和衡量.2007年,我们首先扩展描述逻辑 ALC*,提出了基于模糊描述逻辑 FALC*(fuzzy ALC*)的 Flexible 规划方法^[54,55].该方法将 Flexible 规划利用 FALC*予以刻画,利用 FALC*中的概念表示状态属性,用关系表示动作,使得属性具有主观真实度,动作具有唯一的偏好.另外,问题定义被转换为模糊概念的包含关系,动作定义被转换为模糊概念的蕴涵关系.

5.1 模糊描述逻辑的问题表示

根据 Badea 设计的基于描述逻辑框架的表示方法^[56],利用 FALC*对规划问题进行如下编码:

根据模糊解释 I 的标准语义, I 被解释为将 $C(s)$ 映射到 $[0,1]$ 之间的一个真值 n ,则称属性 C 在状态 s 下的主观真实度为 n ; $R(s,s')$ 被映射到 $[0,1]$ 之间的一个真值 l ,则称从状态 s 到状态 s' 所执行的动作具有偏好 l .用模糊概念的蕴涵来表示动态公理 DA: $\langle C,n \rangle \rightarrow \exists \langle R,l \rangle. \{s'\} \wedge \forall \langle R,l \rangle. \langle D,m \rangle$,其中, C 和 D 表示 FALC*中的概念, R 为 FALC*中的关系.该公式表示:状态 s 在满足前提 C ,且 C 的真实度为 $C(s)$,则触发偏好为 $R(s,s')$ 的动作,使得状态 s 转移到另一个状态 s' ,并且状态 s' 满足真实度为 $D(s')$ 的属性 D .

对于需要刻画的知识库中,包含如下类型描述: $Pkg_2 < Pkg$ 等;状态描述: $ConnectCitywithMainR < MainRoad \wedge \exists forwardCity. T \wedge \exists nextCity. T \wedge \forall forwardCity. City \wedge \exists nextCity. City$;动作描述: $atTruckCity \wedge atPkgCity \wedge \neg onGuardTruck \wedge \langle ValuableP, k_2 \rangle \rightarrow \exists \langle LoadTruck_3, l_2 \rangle. \{x(\neg atPkgCity \wedge onPkgTruck)\} \wedge \forall \langle LoadTruck_3, l_2 \rangle. (\neg atPkgCity \wedge onPkgTruck)$ 等编码.

5.2 模糊描述逻辑的推理能力

规划问题转换后的理论需要断言从模糊知识库中推导出满意度为 n 的目标,记作 $\Sigma \models \langle goal, n \rangle$,即

$$\{\Gamma_S \cup \Gamma_D, \langle S(init), n \rangle\} \models ((\exists \langle Plan, l \rangle. \{xgoal\}) \wedge (\forall \langle Plan, l \rangle. \langle goal, m \rangle))(init),$$

其中, Γ_S 为静态公理集, Γ_D 为动态公理集; $init$ 为初始状态, $\langle S(init), n \rangle$ 表示 $init$ 满足属性 S ,其主观真实度为 n ; $(\exists \langle Plan, l \rangle. \{xgoal\}) \wedge (\forall \langle Plan, l \rangle. \langle goal, m \rangle)$ 表示存在一个满意度为 l 的规划解满足目标状态,且达到满意度 m .

由于未采用剪枝策略,所以我们设计的 FPEXP 算法能够找到满意度达到要求的最优规划解.但求解时间过长,需要进一步考虑适当的剪枝策略以压缩搜索规模.详细的算法描述参见文献^[54,55].

对于满意度低于给定限制的规划解,即使规划解长度非常小,也不认为是有效的规划解;而对于长度与满意度之间的折衷,则优先考虑规划解的长度.

5.3 基于模糊描述逻辑的柔性规划方法

我们设计了基于模糊描述逻辑的 Flexible 规划方法,通过将 Flexible 规划问题转换为模糊描述逻辑下的知识表示问题来求解.这是一种新的尝试,将复杂的规划问题对应于非经典逻辑问题,并利用非经典逻辑中的推理技术处理转换后的问题.虽然实验结果不是很理想,但是考虑还未添加剪枝策略以及其他启发式搜索策略,该方法还是有很大的探讨空间的.

6 结论与展望

基于逻辑演绎与推理技术的规划方法随着问题表示的需求逐渐得到了相关领域研究者的重视.各种非经典逻辑是基于知识表示的需要提出的,分别加入了对模态、时间和模糊性等的刻画.许多研究者利用可满足性判定技术、一阶谓词的提升技术、模糊描述逻辑对规划满意度的表示方法和基于模态逻辑表示和析取推理技术等处理各种复杂的规划问题,取得了公认的杰出成果,也推动了智能规划与自动推理技术的相互促进和融合.

基于自动推理技术的规划方法至少从如下方面考虑进一步研究:1) 对现实世界问题设计符合非经典逻辑语法表示的规划问题表示方法,而不仅仅局限于 PDDL;2) 根据非经典逻辑语义,设计(可能不实际的)抽象的规划问题表示,使得规划问题的刻画将更接近人的自然理解;3) 研究规划问题的逻辑特性,设计符合该逻辑特性(如互补因子等)的专用的规划系统的推理模块,充分发挥不同类型推理模块的性能优势,设计高效的规划系统.

除此之外,时态逻辑与认知逻辑分别与 时态规划问题和 Contingent 规划问题有着密切的联系,利用相关的推理技术,必将设计出新的规划框架,进一步推动自动推理技术在智能规划方法中的应用.

致谢 感谢孙吉贵教授在其有生之年在模态逻辑与描述逻辑推理方法的研究过程中给予的悉心指导。

References:

- [1] Fikes RE, Nilsson N. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 1971,2(3-4):189–208.
- [2] Blum AL, Furst ML. Fast planning through planning graph analysis. *Artificial Intelligence*, 1997,90(1-2):281–300.
- [3] Laborie P. Algorithms for propagating resource constraints in AI planning and scheduling: Existing approaches and new results. *Artificial Intelligence*, 2003,143(2):151–188.
- [4] Cross SE, Walker E. DART: Applying knowledge-based planning and scheduling to crisis action planning. In: Zweben M, Fox M, eds. *Intelligent Scheduling*. San Mateo: Morgan-Kaufmann Publishers, 1994.
- [5] Muscettola N, Nayak P, Pell B, Williams B. Remote agent: To boldly go where no AI system has gone before. *Artificial Intelligence*, 1998,103(1-2):5–47.
- [6] Int'l planning competition. 2006. <http://zeus.ing.unibs.it/ipc-5/>
- [7] Bonet B, Geffner H. Planning as heuristic search. *Artificial Intelligence*, 2001,129(1):5–33.
- [8] Ghallab M, Nau D, Traverso P, Wrote; Jiang YF, Yang Q, Ling YB, *et al.*, Trans. *Automated planning: Theory and practice*. Beijing: Tsinghua University Press, 2008 (in Chinese).
- [9] Fox M, Long D. PDDL2.1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2003,20:61–124.
- [10] Kautz H, Selman B. Planning as satisfiability. In: Neumann B, ed. *Proc. of the 10th European Conf. on Artificial Intelligence*. Vienna: John Wiley&Sons, 1992. 359–363.
- [11] Kautz H, Selman B, Hoffmann J. SatPlan: Planning as satisfiability. In: *Fifth International Planning Competition Booklet*. 2006. <http://www.cs.rochester.edu/u/kautz/papers/kautz-satplan06.pdf>
- [12] Nguyen X, Kambhampati S, Nigenda RS. Planning graph as the basis for deriving heuristics for plan synthesis by state space and CSP search. *Artificial Intelligence*, 2002,135(1-2):73–123.
- [13] Edelkamp S. Mixed propositional and numerical planning in the model checking integrated planning system. In: Fox M, Coddington AM, eds. *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Artificial Intelligence Planning Systems, Workshop on Planning in Temporal Domains*. Toulous, 2002. 47–55.
- [14] Wah BW, Chen YX. Constraint partitioning in penalty formulations for solving temporal planning problems. *Artificial Intelligence*, 2006,170(3):187–231.
- [15] Wu KH, Jiang YF. Planning with domain constraints based on model-checking. *Journal of Software*, 2004,15(11):1629–1640 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1629.htm>
- [16] Wu XJ, Jiang YF, Ling YB. Strategy of extracting domain knowledge for STRIPS world. *Journal of Software*, 2007,18(3):490–504 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/490.htm>
- [17] Wu XJ, Jiang YF, Ling YB. Research on relations of effect of action for STRIPS domain. *Journal of Software*, 2007,18(6): 1328–1349 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1328.htm>
- [18] Chen AX, Jiang YF, Zhang XN, Liu GY. GP: Genetic planning algorithm based on planning graph. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(1):153–160 (in Chinese with English abstract).
- [19] Ling YB, Wu XJ, Jiang YF. Genetic algorithm for solving SAT problems based on learning clause weights. *Chinese Journal of Computers*, 2005,28(9):1476–1482 (in Chinese with English abstract).
- [20] Jiang ZH, Jiang YF. An improved method for calculating activation sets of action derived preconditions. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(12):2061–2073 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zhou JP, Yin MH, Gu WX, Sun JG. Research on decreasing observation variables for strong planning under partial observation. *Journal of Software*, 2009,20(2):290–304 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3152.htm>
- [22] Lai Y, Ouyang DT, Cai DB, Lü S. Model counting and planning using extension rule. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(3):459–469 (in Chinese with English abstract).
- [23] Kautz H, Selman B. Pushing the envelope: Planning, propositional logic, and stochastic search. In: *Proc. of the 13th National Conf. on Artificial Intelligence*. Portland: AAAI Press, 1996. 1194–1201.
- [24] Kautz H, McAllester D, Selman B. Encoding plans in propositional logic. In: Aiello LC, Doyle J, Shapiro, eds. *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*. Cambridge: Morgan Kaufmann Publishers, 1996. 374–384.

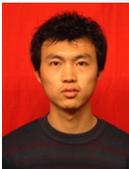
- [25] Kautz H, Selman B. Unifying SAT-based and graph-based planning. In: Dean T, ed. Proc. of the 16th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence. Stockholm: Morgan Kaufmann Publishers, 1999. 318–325.
- [26] Baiocchi M, Marcugini S, Milani A. Encoding planning constraints into partial order planning. In: Cohn AG, Schubert LK, Shapiro SC, eds. Proc. of the 6th Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Trento: Morgan Kaufmann Publishers, 1998. 608–616.
- [27] Rintanen J. A planning algorithm not based on directional search. In: Cohn AG, Schubert LK, Shapiro SC, eds. Proc. of the 6th Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Trento: Morgan Kaufmann Publishers, 1998. 617–624.
- [28] Castellini C, Giunchiglia E, Tacchella A. Sat-Based planning in complex domains: Concurrency, constraints and nondeterminism. *Artificial Intelligence*, 2003,147(1-2):85–117.
- [29] Castellini C, Giunchiglia E, Tacchella A. C-Plan: A conformant planner based on satisfiability. In: Cimatti A, Geffner H, Giunchiglia E, Rintanen J, eds. Proc. of the 17th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence, Workshop on Planning under Uncertainty and Incomplete Information. Seattle: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [30] Kautz H. Deconstructing planning as satisfiability. In: Proc. of the 21st National Conf. on Artificial Intelligence. Boston: AAAI Press, 2006.
- [31] Rintanen J, Heljanko K, Niemelä I. Planning as satisfiability: Parallel plans and algorithms for plan search. *Artificial Intelligence*, 2006,170(12–13):1031–1080.
- [32] Rintanen J. Phase transitions in classical planning: An experimental study. In: Dubois D, Welty CA, Williams MA, eds. Proc. of the 9th Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Whistler: AAAI Press, 2004. 710–719.
- [33] Benedetti M, Aiello LC. SAT-Based cooperative planning: A proposal. In: Hutter D, Stephan W, eds. *Mechanizing Mathematical Reasoning*. LNCS 2605, Springer-Verlag, 2005. 494–513.
- [34] Xing Z, Chen YX, Zhang WX. An efficient hybrid strategy for temporal planning. In: Beck JC, Smith BM, eds. Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems. LNCS 3990, Springer-Verlag, 2006. 273–287.
- [35] Lin H, Sun JG, Zhang YM. Theorem proving based on extension rule. *Journal of Automated Reasoning*, 2003,31(1):11–21.
- [36] Sun JG, Li Y, Zhu XJ, Lü S. A novel theorem proving algorithm based on extension rule. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(1):9–14. (in Chinese with English abstract).
- [37] Li Y, Sun JG, Lü S, Zhu XJ. Two novel algorithms based on extensive rule methods using IMOM and IBOHM heuristic strategies. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information Technology and Environmental System Sciences. Jiaozuo: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 1065–1069.
- [38] Wu X, Sun JG, Lu S, Li Y, Meng W, Yin MH. Improved propositional extension rule. In: Wang GY, Peters JF, Skowron A, Yao YY, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Rough Sets and Knowledge Technology. LNCS 4062, Chongqing: Springer-Verlag, 2006. 592–597.
- [39] Wu X, Sun JG, Lu S, Yin MH. Propositional extension rule with reduction. *Int'l Journal of Computer Science and Network Security*, 2006,6(1):190–195.
- [40] Lin H, Sun JG. Knowledge compilation using extension rule. *Journal of Automated Reasoning*, 2004,32(2):93–102.
- [41] Smith DE, Weld DS. Conformant Graphplan. In: Proc. of the 15th National Conf. on Artificial Intelligence. Madison: AAAI Press, 1998. 889–896.
- [42] Bonet B, Geffner H. Planning with incomplete information as heuristic search in belief space. In: Chien S, Kambhampati S, Knoblock CA, eds. Proc. of the 5th Int'l Conf. on Artificial Intelligence Planning Systems. Breckenridge: AAAI Press, 2000. 52–61.
- [43] Palacios H, Geffner H. From conformant into classical planning: Efficient translations that may be complete too. In: Boddy MS, Fox M, Thiebaux S, eds. Proc. of the 17th Int'l Conf. on Automated Planning and Scheduling. Providence: AAAI Press, 2007. 264–271.
- [44] Palacios H, Geffner H. Compiling uncertainty away: Solving conformant planning problems using a classical planner (sometimes). In: Proc. of the 21st National Conf. on Artificial Intelligence. Boston: AAAI Press, 2006.
- [45] Palacios H. cf2sat and cf2cs+cf2sat: Two conformant planners. In: Fifth International Planning Competition Booklet. 2006. <http://zeus.ing.unibs.it/ipc-5/booklet/probabilistic04.pdf>
- [46] Cushing W, Bryce D. State agnostic planning graphs and their application to belief space planning. In: Veloso MM, Kambhampati S, eds. Proc. of the 20th National Conf. on Artificial Intelligence. Pittsburgh: AAAI Press, 2005. 1131–1138.
- [47] Hoffmann J, Brafman RI. Conformant planning via heuristic forward search: A new approach. *Artificial Intelligence*, 2006,170(6):

507–541.

- [48] Cimatti A, Roveri M. Conformant planning via symbolic model checking. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2000,13: 305–338.
- [49] Bryce D, Kambhampati S. Heuristic guidance measures for conformant planning. In: Zilberstein S, Koehler J, Koenig S, eds. *Proc. of the 14th Int'l Conf. on Automated Planning and Scheduling*. Whistler: AAAI Press, 2004. 365–375.
- [50] Bonet B, Geffner H. GPT: A tool for planning with uncertainty and partial information. In: Cimatti A, Geffner H, Giunchiglia E, Rintanen J, eds. *Proc. of the 17th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence, Workshop on Planning under Uncertainty and Incomplete Information*. Seattle: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 82–87.
- [51] Dimopoulos Y, Nebel B, Koehler J. Encoding planning problems in nonmonotonic logic programs. In: Steel S, Alami R, eds. *Proc. of the 4th European Conf. on Planning: Recent Advances in AI Planning*. LNCS 1348, Toulouse: Springer-Verlag, 1997. 169–181.
- [52] Niemela I, Simons P. Efficient implementation of the well-founded and stable model semantics. In: Maher MJ, ed. *Proc. of the Int'l Joint Conf. and Symp. on Logic Programming*. Bonn: MIT Press, 1996. 289–303.
- [53] Miguel I, Jarvis P, Shen Q. Flexible Graphplan. In: Horn W, ed. *Proc. of the 14th European Conf. on Artificial Intelligence*. Berlin: IOS Press, 2000. 506–510.
- [54] Shi L, Sun JG, Lu S, Yin MH. Flexible planning using fuzzy description logics. In: Arabnia HR, Yang MQ, Yang JY, eds. *Proc. of the Int'l Conf. on Artificial Intelligence*. Las Vegas: CSREA Press, 2007. 306–312.
- [55] Shi L, Sun JG, Lü S, Yin MH. Flexible planning using fuzzy description logics: Theory and application. *Journal of Applied Soft Computing*, 2009,9(1):142–148.
- [56] Badea L. Planning in description logics: Deduction versus satisfiability testing. In: Prade H, ed. *Proc. of the European Conf. on Artificial Intelligence*. Brighton: John Wiley&Sons, 1998. 479–483.

附中文参考文献:

- [8] 姜云飞,杨强,凌应标等译.自动规划:理论和实践.北京:清华大学出版社,2008.
- [15] 吴康恒,姜云飞.基于模型检测的领域约束规划.软件学报,2004,15(11):1629–1640. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1629.htm>
- [16] 吴向军,姜云飞,凌应标.基于 STRIPS 的领域知识提取策略.软件学报,2007,18(3):490–504. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/490.htm>
- [17] 吴向军,姜云飞,凌应标.STRIPS 规划领域中动作效果关系的研究.软件学报,2007,18(6):1328–1349. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1328.htm>
- [18] 陈蔼祥,姜云飞,张学农,刘国英.GP——基于规划图的遗传规划算法.计算机学报,2007,30(1):153–160.
- [19] 凌应标,吴向军,姜云飞.基于子句权重学习的求解 SAT 问题的遗传算法.计算机学报,2005,28(9):1476–1482.
- [20] 蒋志华,姜云飞.一种计算动作派生前提的激活集的改进方法.计算机学报,2007,30(12):2061–2073.
- [21] 周俊萍,殷明浩,谷文祥,孙吉贵.部分可观察强规划中约减观察变量的研究.软件学报,2009,20(2):290–304. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3152.htm>
- [22] 赖永,欧阳丹彤,蔡敦波,吕帅.基于扩展规则的模型计数与智能规划方法.计算机研究与发展,2009,46(3):459–469.
- [36] 孙吉贵,李莹,朱兴军,吕帅.一种新的基于扩展规则的定理证明算法.计算机研究与发展,2009,46(1):9–14.



吕帅(1981—),男,吉林公主岭人,博士生,主要研究领域为智能规划与自动推理.



石莲(1981—),女,博士生,主要研究领域为智能规划与自动推理.



刘磊(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为软件形式化,语义网与本体工程.



李莹(1985—),女,硕士生,主要研究领域为智能规划与自动推理.