ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.17, No.3, March 2006, pp.349−355
DOI: 10.1360/jos170349

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

目标间顺序关系的提取及其抽象方法*

李 颖[1,2], 金 芝[3]

[1](中国科学院 计算技术研究所,北京 100080)
[2](中国科学院 研究生院,北京 100049)
[3](中国科学院 数学与系统科学研究院 数学研究所,北京 100080)

Goal Ordering Extraction and Abstract Method

LI Ying[1,2], JIN Zhi[3]

[1](Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
[2](Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
[3](Institute of Mathematics, Academy of Mathematics and System Sciences, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
+ Corresponding author: Phn: +86-10-62565533 ext 5668, E-mail: Ly_Formal@yahoo.com.cn

Li Y, Jin Z. Goal ordering extraction and abstract method. *Journal of Software*, 2006,17(3):349−355. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/349.htm

Abstract: Planning is a class of complex problem. It is a way to improve the efficiency of planning algorithm in extracting and using goal orderings. Because deciding goal orderings is also PSPACE-complete, it is necessary to extract goal orderings efficiently when using goal orderings. The paper presents a method, called GOWN (goal ordering with invariants) and uses state invariants to extract goal orderings. During the process of ordering, abstraction and unification are utilized to control the increase of problem size that improves the efficiency of ordering.
Key words: planning; state invariants; goal ordering; abstract; unification

摘 要: 规划问题是一类复杂的问题.由于规划问题中各个目标之间往往存在着实现上的顺序关系,发掘这种顺序关系并加以利用是提高规划算法效率的一种途径.由于判定目标间的顺序关系同样是 PSPACE 完全的,因而为利用目标间的顺序关系首先需要有效地提取目标间的顺序关系.给出了一种利用状态不变式来提取目标间顺序关系的 GOWN(goal ordering with invariants)方法,并在比较目标间的顺序关系时,通过抽象和合一的手段,有效地控制了问题的增长规模,提高了处理效率.
关键词: 规划;状态不变式;目标间顺序关系;抽象;合一
中图法分类号: TP181 文献标识码: A

规划问题是人工智能中的一个重要研究领域.给定初始状态、目标状态和一组可以引起状态变化的动作

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60233010, 60496324 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312004 (国家重点基础研究发展规划(973)); the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院知识创新工程)

Received 2004-11-23; Accepted 2005-02-03

的形式化描述,规划的任务在于自动找到一组动作序列,该组动作序列在初始状态下可以执行,并且最终能够实现目标状态[1−5].经典的规划问题一般利用 STRIPS 方法[6]来描述问题,但这种形式的规划问题,其难度是PSPACE 完全的[7].

当一个问题难以解决时,除却问题本身固有的复杂性以外,往往还可能是因为尚未充分发掘和利用与解决问题相关的某些信息或知识.在一个规划问题中,各个目标之间往往存在着某种顺序关系,找到这种顺序关系并加以利用就有可能提高规划效率[8−13].以积木世界为例,对于$\{ontable(a),on(b,a),on(c,b),on(d,c)\}$这样一个目标集,目标 $ontable(a)$的实现就不应迟于 $on(b,a)$的实现.同样,$on(b,a)$应在 $on(c,b)$前实现,$on(c,b)$应在 $on(d,c)$之前实现.已有的方法或者只是比较规划问题中的谓词公式,从而导致无法比较对同一谓词进行不同的实例化所获得的目标间的顺序关系;或者是针对具体的目标公式,但其计算量又随问题规模增长而激增,因而所能处理的问题规模较小.

本文给出了一种能够更有效地提取出目标间(实现上的)顺序关系的方法 GOWN(goal ordering with invariants),该方法利用规划问题中所蕴含的状态不变式来快速提取目标间的顺序关系,并且在提取过程中利用抽象与合一的手段有效地控制问题规模的增长.

本文第 1 节介绍相关背景.第 2 节阐述如何利用状态不变式来提取目标间的顺序关系以及如何进行抽象.实验结果在第 3 节给出.第 4 节将本文工作与相关工作进行比较.最后是总结.

1 规划问题与目标间的顺序关系

1.1 规划问题与STRIPS方法

STRIPS 方法是规划问题中一种常用的问题描述方法,其相关定义如下.

定义 **1**(**STRIPS** 状态). 在基于封闭世界假设的前提下,STRIPS 方法中对状态的描述为一组闭原子的集合,代表这些原子的合取.

定义 **2**(**STRIPS** 动作模式). 一个利用 STRIPS 方法描述的动作模式可记为一个四元组$(Para,Pre,Add,Del)$,其中(Pre,Add,Del)这 3 部分都通过正的谓词公式来表示,$Para$ 则为(Pre,Add,Del)公式中所涉及到的参数.

定义 **3**(**STRIPS** 动作). 动作是对动作模式中所含的变量参数进行实例化以后得到的.其语义为:对于一个状态 s 和一个动作 o,如果 $Pre(o)\subseteq s$,则动作 o 在状态 s 可执行，并且 $do(s,o)=s\cup Add(o)/Del(o)$,其中 $Del(o)\subseteq Pre(o)$,$do(s,o)$表示在状态 s 下执行动作 o 所得到的后续状态.

而规划问题则是给定初始状态、目标状态和动作集,找到一个在初始状态下可执行的动作序列(即规划),通过执行该动作序列可以实现目标状态.其形式化定义如下:

定义 **4**(规划问题).规划问题可描述为一个三元组(O,I,G),其中

1) O 为动作集;

2) I 为初始状态;

3) G 为目标状态.

如果存在一个动作序列$\langle o_1,\ldots,o_n\rangle$(若 $n=0$,则为一个空的动作序列),$o_i\in O$,该动作序列在初始状态下可以执行,并且 $G\subseteq do(s,\langle o_1,\ldots,o_n\rangle)$,则该动作序列为一个合适的规划,记为 P^O.

1.2 目标间的顺序关系

对一个规划问题而言,目标集中各个目标之间往往不是相互独立、毫无关联的,彼此之间可能存在实现上的顺序关系,提取这种顺序关系并加以利用是提高规划效率的一种途径.

文献[8]给出了目标间顺序关系的一种定义.

定义 **5**(**Reasonable Ordering**$\le_r$). (O,I,G)为一个规划问题,若$\forall s(B,\neg A):\neg\exists P^{OB}:A\in do(s(B,\neg A),P^{OB})$,则称 A,B 之间存在$\le_r$ 顺序关系,记为 $A\le_r B$.其中 $O_B=\{o\in O|B\notin Del(o)\}$;$P^{OB}$ 则代表由动作集 O_B 中的动作构成的动作序列.

定义 5 的直观解释是:在一个规划问题中,对于任意状态 $s(B,\neg A)$,即在状态 s 中,B 成立,A 不成立.由该状态

出发,若要实现 A 必将删除 B,那么则认为 $A\le_r B$.在文献[8]中已证明判定目标间的顺序关系的难度与规划问题一样,即难度为 PSPACE 难的.

2 目标间顺序关系的提取及抽象方法

2.1 目标间顺序关系的提取

本文所给出的提取目标间顺序关系的方法将利用规划问题中所蕴含的状态不变式[14−16].

定义 **6**(状态不变式). 对于规划问题(O,I,G),若 P 为该问题所蕴含的状态不变式,则 $I\vdash P$,且 $do(I,\langle o_1,\ldots,o_{n-1}\rangle)\vdash P$.即状态不变式是指在初始状态以及任何由初始状态可达的状态中都满足的状态约束.

例如,利用 TIM[15]在积木世界问题中可提取出这样的状态不变式:

$$\forall x{:}T0.\neg((clear(x)\wedge ontable(x))\wedge holding(x)).$$

利用不变式提取目标间顺序关系的主要思想见定理 1.

定理 **1**. 给定一个规划问题(O,I,G),$A,B\in G$,$O_B=\{o|B\notin Del(o)\}$,P 为该问题所蕴含的状态不变式,如果$\forall o\in O_B$,其中 $O_B=\{o\in O|B\notin Del(o)\}$,若 $A\in Add(o)$,有 $Pre(o),B\vdash\neg P$,则 $A\le_r B$.

证明:假设$\neg(A\le_r B)$.

根据定义 5,$\exists s(B,\neg A)$,$\exists P=\langle o_1,\ldots,o_n\rangle$,$o_i\in O_B$,$A\in do(s(B,\neg A),P)$.

不妨设$\forall i\le n-1$,$A\notin do(s(B,\neg A),\langle o_1,\ldots,o_i\rangle)$,则有 $A\in Add(o_n)$,所以 $Pre(o_n)\subseteq do(s(B,\neg A),\langle o_1,\ldots,o_{n-1}\rangle)$.

又因为 $B\in do(s(B,\neg A),\langle o_1,\ldots,o_{n-1}\rangle)$,且根据定义 6 有 $do(s(B,\neg A),\langle o_1,\ldots,o_{n-1}\rangle)\vdash P$.这与 $Pre(o),B\vdash\neg P$ 矛盾.

所以命题得证. □

定理 1 说明,对于两个目标 A,B,如果从状态 $s(B,\neg A)$出发,除非破坏 B,否则不可能实现一个状态 s',在状态 s'下能够执行一个可实现 A 且不会破坏 B 的动作,那么就有顺序关系 $A\le_r B$.

2.2 抽象方法

在提取目标间的顺序关系时,并非每一次比较都必须借助于定理 1 所示的过程,因为新目标对的比较可以借助已比较的结果.例如,对目标集$\{ontable(a),on(b,a),on(c,b),on(d,c)\}$,无论是 $on(b,a)$与 $on(c,b)$之间的比较,还是 $on(c,b)$与 $on(d,c)$之间的比较,都可以抽象为 $on(y,x)$与 $on(z,y)$之间的比较.本文正是通过对目标对进行抽象与合一,利用已比较的结果来获取新的目标对之间的顺序关系.

定义 **7**(抽象). $\langle A,B\rangle$为一个公式对,将公式对中的相同常量以相同的、未在公式对中出现的新变量替换,不同的常量以不同的新变量替换,所得到的公式对称为$\langle A,B\rangle$的抽象.

定义 **8**(合一). $\langle A_1,B_1\rangle$与$\langle A_2,B_2\rangle$为两个谓词公式的有序对,如果存在替换 s,使得$\langle A_1,B_1\rangle/s=\langle A_2,B_2\rangle$,即 $A_1/s=A_2$,且 $B_1/s=B_2$,则称$\langle A_1,B_1\rangle$可与$\langle A_2,B_2\rangle$合一.

$\langle A_1,B_1\rangle$可与$\langle A_2,B_2\rangle$合一意味着$\langle A_2,B_2\rangle$所有可能的实例化都将被$\langle A_1,B_1\rangle$的实例化所包含.

定理 **2**. 给定一个规划问题(O,I,G),$A,B,C,D\in G$,P 为该问题所蕴含的状态不变式,其中 A,B,C,D 中没有在 P 中出现的常量.$\langle A',B'\rangle$为$\langle A,B\rangle$的抽象,且$\langle A',B'\rangle/s=\langle C,D\rangle$.如果$\forall o\in O_B{:}A\in Add(o)$,有 $Pre(o),B\vdash\neg P$,则 $C\le_r D$.

证明:已知$\langle A',B'\rangle/s=\langle C,D\rangle$,从而有 $A'/s=C$, $B'/s=D$.

对于$\forall o\in O_D{:}C\in Add(o)$,其中 $O_D=\{o\in O|D\notin Del(o)\}$.$\exists o'\in O_B{:}A\in Add(o')$,$Pre(o')/s'=Pre(o)$,$Add(o')/s'=Add(o)$,并且 $A'/s'=C$,$B'/s'=D$.

又因为根据已知有$\forall o\in O_B{:}A\in Add(o)$,$Pre(o),B\vdash\neg P$,且 A,B 中不包含 P 中的常量.

所以$\forall X.(Pre(o'),B')\vdash\neg P$,其中 X 为 $Pre(o')$和 B'中所含变量.

所以 $Pre(o')/s',B'/s'\vdash\neg P$,即 $Pre(o),D\vdash\neg P$.

所以 $C\le_r D$. □

定理 2 说明,在比较两个目标之间的顺序关系时,无须每次都重复定理 1 所示的过程.如果已比较的目标对的抽象可与待比较的目标对合一,则意味着在前二者之间存在的顺序关系,在后二者之间同样存在.当已知两个

目标间不存在顺序关系的比较结果时,同样也可以利用,见定理 3.

定理 **3**. 给定一个规划问题(O,I,G),$A,B,C,D\in G$,P 为该问题所蕴含的状态不变式,其中 A,B,C,D 中没有在 P 中出现的常量.$\langle C',D'\rangle$为$\langle C,D\rangle$的抽象,且$\langle C',D'\rangle/s=\langle A,B\rangle$.如果$\exists o\in O_B:A\in Add(o)$,有 $Pre(o),B\vdash P$,则$\exists o\in O_D:C\in Add(o)$,有 $Pre(o),D\vdash P$.

证明:与定理 2 类似. □

定理 3 则说明,如果新的待比较目标对的抽象可与已知不存在顺序关系的目标对合一,那么利用定理 1 也将无法判断新的目标对之间的顺序关系.

在提取目标间的顺序关系时,目标数的增长只是问题规模增长的一部分,因规划问题所涉及到的个体数的增加而引起动作数的增加也是导致问题规模增长的重要原因.从定理 1 可以看出,在利用该定理提取目标间的顺序关系时,需要对动作集进行考察,而通过对动作进行抽象,则可以有效地控制动作集的规模.在此,不妨将一个动作模式 o 看成一个谓词公式,该谓词公式的参数即为动作模式中所包含的变量参数,于是,动作则可以看作是对变量实例化以后的原子公式.

定理 **4**. 给定一个规划问题(O,I,G),$A(C1),B(C2)\in G$,$\langle A(X1),B(X2)\rangle$为$\langle A(C1),B(C2)\rangle$的抽象.其中,$C1,C2$ 和 $X1,X2$ 分别表示谓词公式中所包含的常量和变量,O 为动作模式集,P 为状态不变式.$\forall o\in O,A$ 在 $Add(o)$中出现,对 o 中的变量参数进行部分实例化得到 o',使得 $A(C1)\in Add(o')$:

1) 如果 B 在 $Del(o')$中出现,$\forall Z.(Pre(o')\wedge\neg\forall X(X=C2)),B(C2)\vdash\neg P$,其中 Z 为 $Pre(o')$中所含变量,$\neg\forall X(X=C2)$表示有 $x_i\in X,c_i\in C2,x_i\neq c_i$,其中 i 表示变量或常量在公式中所处的位置;

2) 如果 B 不在 $Del(o')$中出现,有$\forall Z.Pre(o'),B(C2)\vdash\neg P$.

则 $A(C1)\leq_r B(C2)$.

证明:由已知可得对 o'中的任何一个抽象动作进行完全的实例化所得到的动作都能实现 $A(C1)$.所以,定理中的 1),2)都只是为了限制对 o'进行实例化后所得到的任何动作 o,都应有 $B(C2)\notin Del(o)$. □

根据定理 4,在比较两个目标间的顺序关系时,就无须针对具体的动作集(由完全实例化后的动作组成),而只需对部分参数进行实例化后的动作模式集进行考察即可,而该集合不会像动作集那样随着规划问题所涉及的个体数的增加而激增.

2.3 算 法

对所有的目标进行比较的整体流程如下所示,过程 GOWN 将对目标集中的所有可能的目标对进行比较:

Procedure GOWN

输入:*Goals* 目标集,*GoalNum* 目标数

输出:*GoalOrder* 用以保存目标对之间的顺序关系

```
1)    for(i=0;i<GoalNum–1;i++)
2)        for(j=1;j<GoalNum;j++)
3)            OrderTwo(Goals[i],Goals[j],GoalOrder);
4)            if ⟨Goals[i],Goal[j]⟩不可与⟨Goals[j],Goal[i]⟩合一
5)                OrderTwo(Goals[j],Goal[i],GoalOrder);
6)    return GoalOrder.
```

在过程 GOWN 中,对选定的两个目标将从两个方向进行比较,以分别判断 $Goals[i]\leq_r Goal[j]$和 $Goals[j]\leq_r Goal[i]$是否成立.当比较完$\langle Goals[i],Goal[j]\rangle$后,如果$\langle Goals[i],Goal[j]\rangle$不可与$\langle Goals[j],Goal[i]\rangle$合一,则再比较$\langle Goals[j],Goal[i]\rangle$,如 4),5)所示.在 3)和 5)中的 $OrderTwo(A,B,GoalOrder)$则是对选定的两个目标进行比较,其算法过程如下所示:

Procedure OrderTwo($A,B,GoalOrder$)

输入:A 待比较的目标,B 待比较的目标

输出:*GoalOrder* 用以存储目标对之间的顺序关系

1) if *GoalOrder* 中有⟨*C*,*D*⟩可与⟨*A*,*B*⟩合一,且 $C\leq_r D$

2) 保存 $A\leq_r B$ 到 *GoalOrder* 中;

3) else if ⟨*A*,*B*⟩可与 *GoalOrder* 中的⟨*C*,*D*⟩合一,且$\neg(C\leq_r D)$

4) 保存$\neg(A\leq_r B)$至 *GoalOrder* 中;

5) else *Order*(*A*,*B*,*P*,*GoalOrder*);

在过程 *OrderTwo*(*A*,*B*,*GoalOrder*)中,将首先借助目标对之间的合一关系来判断新的两个目标之间的顺序关系,过程中的 1),2)和 3),4)分别对应定理 2 和定理 3;而当不存在合一关系时,则利用状态不变式来比较两个目标间的顺序关系,即过程 *Order*(*A*,*B*,*P*,*GoalOrder*),该过程与定理 4 对应,在此省略其具体过程.

3 实验结果

文献[8]给出了两种提取目标间顺序关系的方法.由于第 2 种方法比第 1 种方法更有效,并且该方法在文献[9,10]中都得到了很好的应用,所以在进行实验时,本文只与第 2 种方法进行比较,在下文中以 HO(heuristic ordering)简称.

在实验时,本文所给出的 GOWN 方法借助于工具 TIM[15]自动地提取状态不变式.测试数据来源于 AIPS[17]所提供的 Benchmarks 问题中所有 STRIPS 形式的规划问题.运行环境为 64M 内存,CPU 为 600MHZ.

表 1 显示的是对 Hanoi 塔问题的测试结果.

Table 1 Hanoi

表 1 Hanoi 塔问题

Objects	Goals	Orderings	Time (millisec.) HO	Time (millisec.) GOWN
10	10	9	50	10
20	20	19	250	30
30	30	29	781	60
40	40	39	1862	130
50	50	49	11 787	230
60	60	59	62 670	370

表 2 显示的是对积木世界问题的测试结果.

Table 2 Blocksworld

表 2 积木世界问题

Objects	Goals	Orderings	Time (millisec.) HO	Time (millisec.) GOWN
20	21	20	50	20
40	41	40	180	30
60	61	60	420	60
80	81	80	711	90
100	101	100	1 071	160

相对于 Hanoi 塔问题,积木世界问题中 HO 方法的计算量随问题规模增长的增幅不太迅猛,这主要是因为在积木世界问题中,对动作模式的 *Add* 部分中的公式而言,动作模式往往不包含冗余的变量,即对于一个动作模式 *o*,若有 $A(X)\in Add(o)$,则在动作模式 *o* 的参数中不会包含比 *X* 更多的变量,这意味着为实现一个具体的目标,只需利用该目标所涉及的常量对动作模式进行实例化,从而缩小了动作集的规模随问题中个体数增长而增长的幅度.而一旦将积木世界中的动作模式转换为如图 1 所示的描述形式(这种转换并未改变积木世界问题的本质,从而也不影响目标间所存在的顺序关系),则 HO 方法的计算量也将迅猛增长.而 GOWN 方法则由于采取了对动作的抽象策略,从而很好地控制了动作集的增长速度,具体测试结果见表 3(表中"…"表示内存不足,无法计算).

```
(:action move:
parameters (?ob ?from ?to)
:precondition (and (on ?ob ?from) (clear ?ob) (clear ?to))
:effect(and (on ?ob ?to) (clear ?from) (not (on ?ob ?from)) (not (clear ?to))))

(:action movefromtab
 :parameters (?ob ?to)
 :precondition (and (on-table ?ob) (clear ?ob) (clear ?to) )
  :effect(and (on ?ob ?to) (not (clear ?to)) (not (on-table ?ob))))

 (:action movetotab
 :parameters (?ob ?from)
 :precondition (and (on ?ob ?from) (clear ?ob))
 :effect(and (on-table ?ob)(clear ?from)(not(on ?ob ?from)))))
```

Fig.1 Operators of the new blocksworld

图 1 新积木世界的动作模式集

Table 3 New blocksworld

表 **3** 新积木世界问题

Objects	Goals	Orderings	Time (millisec.) HO	Time (millisec.) GOWN
20	21	20	420	20
40	41	40	26 257	30
60	61	60	266 493	60
80	81	80	…	90
100	101	100	…	160

4 相关工作比较

提取目标间顺序关系的研究,可以说与规划问题的研究一样悠久,也提出了大量的方法.

ALPINE 方法[11]针对 Prodigy 系统[12]来提取抽象公式间的顺序关系.在该方法中,A,B 之间的顺序定义为如果为实现公式 B 必须首先实现公式 A,那么 A 应排在 B 之前.但由于该方法完全只针对动作模式和谓词公式,所以它无法区分对同一个谓词公式不同的实例化之间的顺序关系.以积木世界为例,$on(b,c)$和 $on(c,d)$之间的顺序关系在该方法中就无法区分.

文献[8]对目标间两种实现上的顺序关系给出了严格的定义,并给出两种方法来提取$\leq_r$ 关系:第 1 种方法是通过构造一个具体的规划问题的规划图(PlanGraph)[18]来提取目标间的顺序关系.相对现有的提取状态不变式的方法[14−16],构造 PlanGraph 的方法过于繁琐,并且在该方法中是利用 PlanGraph 获得的二元互斥关系(即两个原子不能在同一个状态中共存)来提取目标间的顺序关系.而在状态不变式中可以发掘出规划问题中蕴含的多元互斥关系(即多个原子不能共存在同一个状态中),从而可能更加充分地提取出目标间的顺序关系.但在现有的Benchmark问题中尚未体现出这一优势;第2种方法中所假设的前提条件在很多Benchmark问题中都不成立,并且这一前提条件破坏了顺序关系的传递性,从而也不满足文献[8]中所给出的顺序关系使用方法的要求.此外,文献[8]中的方法针对的都是具体的目标集和动作集,所以计算量会随问题规模的增长而激增,所能处理的问题规模较小.本文所提出的 GOWN 方法的不足之处在于,由于受制于目前的提取状态不变式的方法,所以 GOWN 尚只能处理 STRIPS 形式的规划问题.

文献[13]利用与文献[8]中类似的方法提取所有的原子公式间的顺序关系,所以相对于本文中所提出的方法,存在着与文献[8]类似的不足之处.

5 总结及下一步工作

发掘和利用目标间实现上的顺序关系有可能提高规划的效率,而如何有效地提取出顺序关系则成为关键.本文给出了一种利用状态不变式提取目标间顺序关系的方法,并且通过抽象与合一的策略,使得在提取顺序关系时,可以充分利用已比较的结果,用一个更为容易的判断合一的过程来获得新的目标对间的顺序关系.而通过对动作的抽象,有效地控制了待考察的动作集的规模.

由于受目前已有的提取状态不变式方法的限制,本文工作尚只能处理 STRIPS 形式的规划问题,下一步工作将把本文所给出的方法推广到 ADL 形式的规划问题.

References:

[1] Russell S, Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Beijing: Posts & Telecommunications Press,

[2] Weld DS. Recent advances in AI planning. AI Magazine, 1999,20(2):93−123.

[3] Lu RQ. Artificial Intelligence. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese).

[4] Ding DL, Jiang YF. Research on intelligent planning and application. Computer Science, 2002,29(3):100−103 (in Chinese with English abstract).

[5] 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

[6] Fikes RE, Nilsson NJ. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. Artificial Intelligence, 1971,2(3−4):189−208.

[7] Erol K, Nau DS, Subrahmanian VS. On the complexity of domain-independent planning. In: Swartout WR, ed. Proc. of the 10th AAAI National Conf. San Jose: AAAI Press/The MIT Press, 1992. 381−386.

[8] KoehlerJ, Hoffmann J. On reasonable and forced goal orderings and their use in an agenda-driven planning algorithm. Journal of Artificial Intelligence Research, 2000,12:338−386.

[9] Hoffmann J. Utilizing problem structure in planning: A local search approach. LNAI 2854, Springer-Verlag, 2003.

[10] Chen YX, Hsu CW, Wah BW. SGPlan: Subgoal partitioning and resolution in planning. In: Proc. of the 4th Int'l Planning Competition, Int'l Conf. on Automated Planning and Scheduling. 2004. 30−32.

[11] Knoblock CA. Automatically generating abstractions for planning. Artificial Intelligence, 1994,68(2):243−302.

[12] Fink E, Veloso M. Prodigy planning algorithm. Technical Report, CMU-94-123, Carnegie Mellon University, 1994.

[13] Porteous J, Sebastia L, Hoffmann J. On the extraction, ordering, and usage of landmarks in planning. In: Proc. of the 6th European Conf. on Planning (ECP 01). 2001. 37−48.

[14] Gerevini A, Schubert L. Inferring state constraints for domain-independent planning. In: Proc. of the 15th National Conf. on AI and the 10th Conf. on Innovative Applications of AI. AAAI Press/The MIT Press, 1998. 905−912.

[15] Fox M, Long D. The automatic inference of state invariants in TIM. Journal of Artificial Intelligence, 1998,9:367−421.

[16] Rintanen J. An iterative algorithm for synthesizing invariants. In: Proc. of the 17th National Conf. on AI and the 12th Innovative Application of AI. AAAI Press/The MIT Press, 2000. 806−811.

[17] The Int'l Conf. on Automated Planning and Scheduling. http://www.icaps.org/

[18] Blum A, Langford JC. Fast planning through planning graph analysis. Journal of Artificial Intelligence, 1997,90(1−2):281−300.

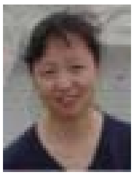
附中文参考文献:

[3] 陆汝钤.人工智能.北京:科学出版社,2000.

[4] 丁德路,姜云飞.智能规划及其应用的研究.计算机科学,2002,29(3):100−103.

[5] 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

李颖(1972−),男,博士生,主要研究领域为人工智能.



金芝(1962−),女,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为需求工程,基于知识的软件工程,知识工程,人工智能.