

基于条件效果的对象动态可变图规划

谷文祥, 杨永娟, 闫书亚

(东北师范大学 计算机学院, 吉林 长春 130117)

摘 要:主要研究了基于条件效果的对象动态可变的规划问题. 提出了相关元件、无关元件、创建/删除对象元件和普通元件等概念, 把带有条件效果的动作和不带有条件效果的动作都元件化, 并采用了对象命题化的思想. 给出了新的基于目标驱动的规划图扩展算法和前向搜索有效规划算法, 并给出了相应的后向传播互斥的定义, 使得规划图的规模比较小, 减少了搜索空间, 大大提高了求解有效规划的效率. 由于算法中的动作创建的效果是依赖于上下文的描述, 这更加符合现实需要, 使处理的问题更接近于真实的世界状态, 因而此算法比以往的算法应用性更强, 更具有现实意义.

关键词:图规划; 相关元件; 无关元件; 创建/删除对象元件; 条件效果

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785 (2007) 03-0012-07

Creating or deleting objects graphplan based on conditional effects

GU Wen-xiang, YANG Yong-juan, YAN Shu-ya

(School of Computer, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

Abstract: Mainly research was done on the creating or deleting objects Graphplan that based on conditional effects. Firstly, several new concepts were proposed, such as correlative component, irrelative component, creating or deleting objects component, common component and so on. Secondly, both actions with conditional effects and that without conditional effects were considered as components and the conception of transforming object into proposition was introduced. Thirdly, a novel intelligent planning algorithm which expanded the planning graph backwards from the goal set and searched a valid plan forward was proposed and also a new definition of mutex inference backwards was given correspondingly. The method reduced the scale of the planning graph and the search space, improved the efficiency of searching the valid plan greatly. Because the effects created by actions were context-dependent, it was more suitable for the practical needs compared with previous methods, and made the planning problems to be handled much closer to the real word. Therefore, the method has its advantage over previous ones in application and has more practical significance.

Key words: graphplan; correlative component; irrelative component; creating or deleting objects component; conditional effects

近年来,有关智能规划的研究在问题描述和问题求解2方面得到了新的突破,使得智能规划已成为一个非常热门的研究领域.由于智能规划的研究对象和研究方法的转变,极大地扩展了智能规划的应用领域,使智能规划的理论和应用研究有了长足的进展.近几年来,随着客观条件的改善,世界上一

些发达国家在此领域获得了很大的发展,规划技术已成功应用于国防和空间技术领域,并取得了巨大的经济效益. NASA 于 1999 年在航天器“Deep Space One”中运用规划技术,使得规划研究从实验室向实际应用迈出了重要的一步,标志规划的研究步入了实用阶段.越来越多的学者致力于这方面的研究,并取得了很多重大成果.

自 1995 年 Blum 和 Furst 提出图规划算法^[1-2]

收稿日期:2006-10-25.

以来,与领域无关(domain-independent)的智能规划算法的效率得到了较大的提高,这是一个很好的算法,它的高效性主要体现在2个方面:一是有效利用节点间的互斥关系进行解搜索,减少了搜索空间,从而提高搜索效率;二是在同一时间步尽可能地并行执行多个非互斥动作,以保证找到的有效规划是时间步数最短的规划.图规划的提出使得人工智能规划领域取得了革命性的进展,受到了研究者的广泛关注,并在其基础上做了大量研究,已取得了大量成果.如Weld等人提出了基于条件效果的图规划^[3],Weld和Anderson等人提出了不确定性规划^[4],Blum等人提出了规划图框架下的概率规划^[5],Eric Parker提出了基于目标驱动的图规划^[6],Hong Jun提出了基于图分析的目标识别^[7],以及谷文祥和蔡增玉等人提出了规划图框架下可创建/删除对象的规划^[8]等.鉴于图规划良好的性能,目前国内外仍有许多著名的学者在做图规划框架下的研究.

图规划有其独特的优越性,但也有一些局限,主要的局限是它只能应用于STRIPS领域,规划问题中的动作不能消灭对象也不能创造对象,对对象实施某一动作的结果必须是能被静态确定的人或事.图规划不能处理对象动态可变的规划问题,但是现实生活中有很多规划问题都不满足这个条件,例如网络安全、机器人控制、智能游戏、智能接口等方面,随着智能规划的发展,这个问题变得越来越严峻,已经成为智能规划发展的一个瓶颈.这个问题1995年就被提出,直到2005年谷文祥和蔡增玉等人提出了规划图框架下可创建/删除对象的规划^[8],对象动态可变的规划问题才部分得以解决.但是文献[8]中处理的动作创建的新对象是可静态确定的,不能处理动作创建的对象不能确定的规划问题,而且采用的是前向图扩展与逆向搜索有效规划方法,这使得规划图规模庞大,无用节点过多,当初始状态中有大量无关事实时,问题会更加严重,求解效率更低.文中在文献[8]的基础上进行了扩展,提出了基于条件效果的对象动态可变的图规划,引入了描述能力更强的动作表示形式.与文献[8]不同,文中创建/删除的新对象依赖于上下文的描述,前提不同就会生成不同的新对象,即要处理的问题是基于一条件效果的.在现实世界中,这样的问题大量存在,如在产品配置方面,用户的需求不同,生产的产品也不同;货物运输方面,货物不同,组装生成的运输工具也不同等,以

往的算法没有处理这类问题的能力.又由于在现实中,初始条件中会有很多与求解目标无关的事实,而文献[8]不能区分这些事实,它会从初始条件出发,实例化许多与实现目标无关的动作,这严重增加了规划图结构的宽度,同时大量时间会浪费在向规划图中添加无用动作,无用效果,以及推导这些不相关动作及命题的互斥关系上.因此,文中采用了目标驱动方法^[6,9-10],提出了基于条件效果的对象动态可变的规划图的扩展算法,并提出了新的前向搜索有效规划算法.这一方面的研究更加符合复杂真实的世界状态,并在很大程度上提高了求得有效规划的效率,具有很高的应用价值.这一研究可广泛应用在机器配置、商品生产、运输货物等方面,这进一步丰富了规划理论并扩大了规划的应用范围.

1 研究基础

为了方便读者,这里对文中涉及到的几个基本概念简要地加以介绍.

规划:一个动作的序列称为一个规划.

一个规划问题涉及以下4个集合:

- 1) 一个操作的集合;
- 2) 一个对象的集合;
- 3) 一个初始条件的集合,其中每个元素都是命题;
- 4) 一个目标的集合,其中每个元素都是命题,且要求规划结束时这些命题都为真.

有效规划:设有一个动作的集合,其中的每个动作都被指明执行的时间步,在同一时间步内执行的任何2个动作都是不相冲突的,所有的问题目标在最后的时间步均为真,那么,就称这个动作的集合为一个有效规划.

NO-OP 动作:对命题不做任何改变的动作.

规划图:规划图是一个有向图,由2种结点,3种边组成.2种结点是命题结点和动作结点,3种边是前提条件边,添加效果边,删除效果边.边把命题层的命题结点和动作层的动作结点连接起来.

条件效果:动作描述中与上下文相依赖的效果,通常用when子句表示,when子句由前提和结论组成,动作的前提是主前提,when子句的前提是次要前提.

要素扩展法处理条件效果的基本思想:把动作所有的效果都条件化,每个效果产生一个动作元件.

引致: i 层元件 C_m 引致元件 C_n 指 C_m 在 i 层

的执行必然导致 C_n 的执行,如不执行 C_n ,则 C_m 也无法执行.

对元件的抵制:通过否定元件的前提条件来阻止元件的执行.

2 基于条件效果的对象动态可变的规划问题

2.1 CECDOP 问题描述

在文献[8]中已经介绍了创建/删除的对象是可静态确定的情况,文中研究的基于条件效果的对象动态可变的规划问题,简记为 CECDOP(conditional effects in creating or deleting object plan)问题,CECDOP 中创建/删除的对象是不可静态确定的,动作的前提不同时创建/删除的对象也是不同的,即效果是依赖于上下文的描述.因为现实世界是一个动态复杂的世界,很多规划问题都会涉及到动作创建的对象是动态可变的情况,而且创建的新对象由前提而定,如运输问题,不同的货物对卡车的要求不同,轻的货物用单排轮的卡车运输,重的货物则要用双排轮的卡车运输,这样运输货物的不同要求组装生成的卡车也不同.由于文中规划问题的动作所产生的效果是依赖于上下文的描述,在文献[3]的基础上引入了表达能力更强的动作描述形式.

2.2 CECDOP 中操作的表达方式

文中讨论了基于条件效果的对象动态可变的规划问题,对于所有动作都采用元件化思想,即动作产生的所有效果都对应一个动作元件,非条件效果的动作产生唯一一个元件.在文献[3]中所有的元件用“ $C + i$ ”表示元件 i ,这不能表明元件来自哪个动作,也不能表明哪些元件是来自同一动作的,在处理互斥时比较复杂,与文献[3]不同,文中的元件用 $Action + i$ 表示来自动作 $Action$ 的元件 i ,这样上面提出的问题就会得到解决,这种描述方法即能表明元件来自哪个动作,也能表明哪些元件是来自同一动作的,这样在处理互斥时就可以减少许多不必要的循环.

为了表述问题更清楚,把元件进行了分类.文中的元件根据来源可分成 2 类:

定义 1 来自同一动作实例的元件称为相关元件.

定义 2 来自不同动作实例的元件称为无关元件.

例 1:动作 A 有前提 p ,3 个效果 e , $(when\ q\ f)$,

$(when\ (r\ s)\ \neg q)$.动作 B 有前提 q ,2 个效果 h , $(when\ s\ t)$.这 2 个动作分别元件化:

动作 A 分解成的元件是:

A_1 有前提 p ,效果 e ;

A_2 有前提 $p\ q$,效果 f ;

A_3 有前提 $p\ r\ s$,效果 $\neg q$;

动作 B 分解成的元件是:

B_1 有前提 q ,效果 h ;

B_2 有前提 $q\ s$,效果 t .

其中元件 A_1, A_2, A_3 都来自动作 A ,它们是相关元件,同样元件 B_1, B_2 都来自动作 B ,它们也是相关元件.但是 A_1, A_2, A_3 与 B_1, B_2 之间是无关元件.动作 A 中, p 是主要前提, q 和 $(r\ s)$ 是次要前提,动作 B 中, q 是主要前提, s 是次要前提.

与文献[3]中的定义有所不同,文中对引致和元件抵制进行了改进:

引致: i 层元件 C_m 引致元件 C_n 指 C_m 在 i 层的执行必然导致 C_n 的执行,如不执行 C_n ,则 C_m 也无法执行.

具体要求:

C_m 和 C_n 是相关元件,有相同的变量约束;

C_m 和 C_n 不互斥;

C_n 的否定前提在 $i - 1$ 层不能被满足.

对元件的抵制:通过否定元件的次要前提条件来阻止元件的执行,这比文献[3]中的方法好,因为这样可以减少很多不必要的循环.

文中的元件根据是否可以创建/删除对象分成 2 类:普通元件,可创建/删除对象的元件(CDO 元件,creat or delete object).

定义 3 一个元件可以创建/删除对象,称为创建/删除对象元件,对它们的实例化称为 CDO 元件实例.

定义 4 除了 CDO 元件都是普通元件,对它们的实例化称为普通元件实例.

表示方式如下:

CDO component:

```
Component + number{
:the set of parameter{
    {the set of common parameter}
    {the set of optional parameter}
}
:the set of precondition{ ...}
:the set of effect {
```

```

{the set of object added}
{the set of object deleted}
{the effect propositions}
    }
}

```

Common component :

```

Component + number{
:the set of parameter{ ...}
:the set of precondition{ ...}
:the set of effect{the effect proposition}
}

```

2.3 CECDOP 中对象的表达方式

在 CDUOP 中,一些动作能够创建新的对象或删除已经存在的对象,对象在规划图中可动态地变化,在图规划中命题也有这样的性质,因此文中将延用对象命题化^[8]思想,即用命题表示对象在某些规划层的存在形式,采用 alive + “对象名”表示方式.命题被分成了普通命题和对象命题.

3 CECDOP 规划

3.1 CECDOP 问题的组成

元件集 包括普通元件和创建/删除对象元件
对象集

初始条件集 由命题组成

目标集 由命题组成,经过一系列操作,在规划结束时这些命题为真

3.2 CECDOP 规划图

文中研究的 CECDOP 的规划图与图规划的规划图不同,它是由 2 种边和 2 种结点组成. CECDOP 的规划图的边由前提条件边、添加效果边组成,因为是基于目标驱动构建规划图,所以图中没有删除效果边.命题结点是由普通命题结点和对象命题结点组成,元件结点是由普通元件结点和创建/删除对象的元件结点组成.边把命题结点和元件结点相连,表示了它们之间的关系.添加效果边把元件在前一层命题列的效果和元件相连,前提条件边把元件和下一层的命题列的前提相连.

3.3 逆向传播互斥

以目标驱动方法扩展规划图时,规划图逆向产生,这就要求逆向推理和传播互斥关系.在文献[11]中给出了逆向传播互斥关系的定义.

1) 2 个动作逆向互斥,如果一个动作:

静态互斥:如果一个动作的结果删除另一个

动作的前提或“有效结果”(在规划图中动作的结果被用来支持命题);它们的有效结果集合完全相同;一个动作支持的命题与另一个动作支持的命题两两互斥.

2) 两个命题逆向互斥,如果一个命题支持的所有动作与另一个命题支持的所有动作两两互斥.

由于文中采用目标驱动图扩展方法,规划图由目标开始逆向产生,因此也要进行逆向推理和传播互斥.但是与文献[11]不同,文中将处理 3 种互斥关系:动作元件互斥,对象互斥,命题互斥.

1) 动作元件逆向互斥

2 个动作元件 C_m 与 C_n 互斥:

静态互斥:2 个元件 C_m 与 C_n 是无关元件,且元件 C_m/C_n 的结果删除另一个元件 C_n/C_m 的前提或“有效结果”(在规划图中元件的结果被用来支持命题)或它们有效结果集合完全相同,或 C_m 与 C_n 支持的命题两两互斥,或引致互斥:如果 C_n 引致 C_k , C_k 与 C_m 互斥,则 C_n 与 C_m 也互斥.

2) 与对象命题有关的逆向互斥

因为对象命题不支持元件,所以它们的互斥关系不能通过后向传播得到,因此可以退前一步,当产生 i 层动作元件时再判定 i 层的对象命题的互斥关系(目标出现的层是第 1 命题层,从目标往前扩展,接着是第 1 元件层,以此类推), i 层与对象命题 A 和 B 有关的逆向互斥,如果:

i 层创建对象命题 A 的元件与创建对象命题 B 的元件通过逆向传播标记为互斥,则 i 层对象命题 A 与 B 互斥

如果 i 层中 2 对象命题 A 与 B 标记为互斥,且名字分别出现在 i 层的普通命题 P 和 Q 中,则普通命题 P 与 Q 互斥.

3) 普通命题逆向互斥

如果 i 层命题 P 支持的所有动作元件与命题 Q 支持的所有动作元件两两互斥,则普通命题 P 与 Q 互斥.互斥关系如图 1 所示.

3.4 图扩展算法

CECDOP 算法包括扩展规划图和搜索有效规划,这两部分交替进行.文中的规划图是从目标开始的,逐步向前扩展.这种扩展方法可以去除许多与目标无关的命题与动作,规划图比较简单.

3.4.1 图扩展

文中是以目标为导向进行规划图扩展的,算法

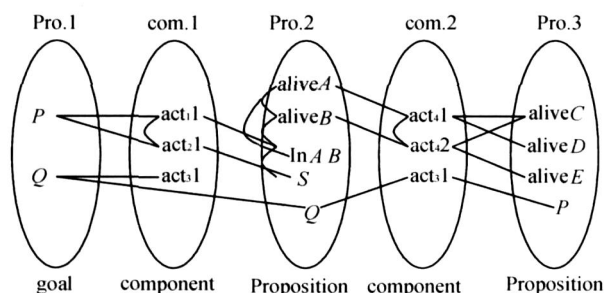


图1 逆向传播互斥

Fig. 1 Mutex inference backward

描述如下:

1) 所有目标命题构成第1层命题层

2) 构建第1层元件层

对于元件集中每一个元件,如果它的效果在目标集中出现,则把该元件实例化,并用上面判定互斥的方法检查互斥,然后用效果边把元件和其对应的效果相连。

3) 构建第*i*层命题层

向第*i*层中添加普通命题

首先通过持续边把*i*-1层的普通命题加入到*i*命题层,然后考察*i*-1层动作元件的前提,如果不在*i*命题层则加入,用上面判定互斥的方法检查互斥,并用前提条件边把元件和其对应的前提相连。

往第*i*层添加对象命题

首先通过持续边把*i*-1层的对象命题加入到*i*命题层,然后考察,当*i*层已添加的普通命题涉及到新对象*A*时,如果对象命题*A*不在*i*命题层则在*i*命题层中添加对象命题 alive *A*。

如果在*i*命题层初始目标出现且不互斥,则开始搜索有效规划,否则继续扩展规划图。

4) 构建第*i*层元件层

对于元件集中每一个可行元件,如果它的效果在*i*层命题层出现,则实例化该元件,并用上面判定互斥的方法检查互斥,并根据本层的互斥确定*i*层命题层中与对象命题有关的互斥,然后用效果边把元件和其对应的效果相连。

3.4.2 搜索有效规划

与以前的后向搜索有效规划不同,文中采用的是前向搜索有效规划,算法如下:

1) *i*层为初始命题层, $SP_i = \{ \}$, 其中 SP_i 是*i*层可用前提集,初始时,把初始命题加入 SP_i 中。

2) $SC_{i-1} = \{ \}$, 其中 SC_{i-1} 是*i*-1层可执行元件集,对于*i*-1层可实例化(元件的前提在*i*层的

可用前提集中)的元件 C_s ,如果它不与 SC_{i-1} 中已选元件互斥,且不在 SC_{i-1} 中,则把 C_s 加入 SC_{i-1} ,并把 C_s 的效果加入 *i*-1层可用前提集 SP_{i-1} 中。

3) 对于 SC_{i-1} 中的每一个元件 C_s 和 C_t ,考察 C_s 的引致元件 C_m 和 C_t 的引致元件 C_n ,如果 C_m 与 C_n 互斥,则要选 C_m 和 C_n 之一进行抵制。

4) 如果 $i = 1$,则 $SC_{i-1}, SC_{i-2}, \dots, SC_1$ 构成规划解,否则 *i*-1 重复上面的步骤。

3.5 例子

在*A*地有2个卡车车身(body),一组单排轮胎(single tire,ST),一组双排轮胎(double tires,DT),一批木材(wood)和一批钢材(steel)还有一批石板(flagstone),木材只需单排轮卡车就能运输,而钢材和石板则需双排轮的卡车才能运输,目标是把木材和钢材运到*C*地。

给出一些操作: move, truck (创建一辆卡车), load, unload

对应的元件:

move1:表示移动单排轮的卡车

move2:表示移动双排轮的卡车

truck1:表示组装单排轮的卡车

truck2:表示组装双排轮的卡车

load1:表示装木材

load2:表示装钢材

load3:表示装石板

unload1:表示卸木材

unload2:表示卸钢材

unload3:表示卸石板

initial condition: {alive body1, alive body2,

alive ST, alive DT, alive wood, alive steel, alive flagstone, at body1 *A*, at body2 *A*, at ST *A*, at DT *A*, at wood *A*, at steel *A*, at flagstone *A*}

components: { move1, move2, truck1, truck2, load1, load2, load3, unload1, unload2, unload3 }

goals: { at wood *C*, at steel *C* }

规划图如图2。

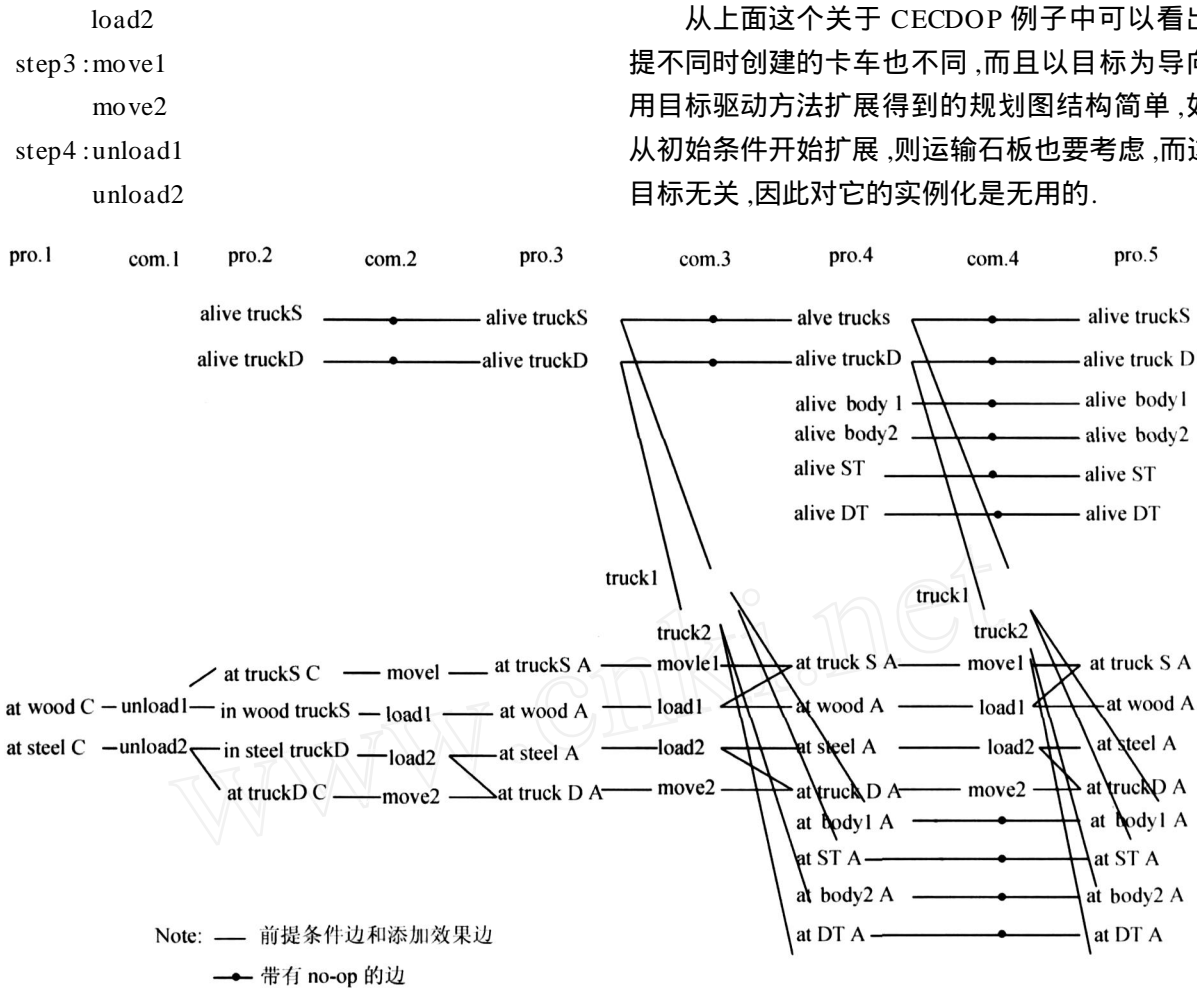
其中 truckS 表示单排轮卡车, truckD 表示双排轮卡车。

到第5层时,初始目标出现且不互斥,开始前向搜索有效规划,最后的规划解是:

step1: truck1

truck2

step2: load1



从上面这个关于 CECDOP 例子中可以看出前提不同时创建的卡车也不同,而且以目标为导向采用目标驱动方法扩展得到的规划图结构简单,如果从初始条件开始扩展,则运输石板也要考虑,而这和目标无关,因此对它的实例化是无用的.

图 2 卡车运输货物的 CECDOP 规划图

Fig. 2 A planning graph created by CECDOP for the transportation problem using trucks

4 结束语

文中在可创建/删除对象的图规划的基础上做了扩展,研究了基于条件效果的对象动态可变的规划问题,提出了把所有动作元件化的方法,给出了可创建/删除对象的动作元件的定义,提出了新的基于目标驱动的扩展规划图算法及前向求解有效规划的算法,并举例进行了说明.由于算法中的动作创建的效果是依赖于上下文的描述,这更加符合现实需要,使处理的问题更接近于真实的世界状态,因而此算法比以往的算法应用性更强,更具有现实意义.

对于能创建/删除对象的规划问题,一般分成两类,一种是创建的新对象的性质不可预知,即在规划搜索前不知道可能创造出何种对象,也不知道创建的新对象有何性质,这就要求在创造新对象的同时把涉及到新对象的动作也加进来.另一种是创建的新对象的性质可预知,即在规划搜索前知道可能创

造出何种对象或可能是哪几个对象中的一个.由于现实中的绝大多数规划都是某一具体领域的规划,可能涉及到何种对象或可能是哪几个对象可预知,目前主要讨论了第 2 类问题,其实第 1 类问题也是值得研究的,因为此类问题在化学领域有着广泛的应用.此外,由于现实世界具有动态多变性,也可以考虑把 Flexible graphplan^[12]和 DCSP^[13]的方法引入文中.对对象动态可变问题的研究很有价值,这一方向的研究工作才刚刚开始,许多方面还有待于完善.

参考文献:

[1]BLUM A, FURST M. Fast planning through planning graph analysis[A]. In Proc 14th Int Joint Conf AI[C]. Montreal, Canada, 1995.

[2]BLUM A, FURST M. Fast planning through planning graph analysis [J]. J Artificial Intelligence, 1997, 90 (1 - 2):281 - 300.

- [3] ANDERSON C R, SMITH D E, WELD D S. Conditional effects in graphplan[A]. In Proc AI Planning Systems Conference[C]. AAAI Press. Melo Park, 1998.
- [4] WELD D S, ANDERSON C R, SMITH D E. Extending graphplan to handle uncertain and sensing actions[A]. In AAAI98[C]. Madison, Wisconsin, U S A, 1998.
- [5] BLUM A L, LANGFORD J C. Probabilistic planning in the graphplan framework[A]. AIPS98 Workshop on Planning as Combinatorial Search[C]. Pittsburgh, 1998.
- [6] PARKER E. Making graphplan goal-Directed[A]. In ECP99[C]. Durham, United Kingdom, 1999.
- [7] HONG J. Graph construction and analysis as a paradigm for plan recognition[A]. In Proc of AAAI2000: Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence[C]. Austin, Texas, USA, 2000.
- [8] GU Wenxiang, CAI Zengyu, ZHANG Xinmei, et al. Extending graphplan to handle the creating or destroying objects panning[A]. ICMLC2005[C]. Guangzhou, China, 2005.
- [9] NEBEL B, DIMOPOULOS Y, KOEHLER J. Ignoring irrelevant facts and operators in plan generation[A]. In Proc 4th European Conference on Planning[C]. Toulouse, France, 1997.
- [10] XU Li, GU Wenxiang, ZHANG Xinmei, et al. Goal-directed flexible graphplan[A]. In Proceeding of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. Guangzhou, China, 2005.
- [11] KAMBHAMPATI S, PARKER E, LAMBRECHT E. Understanding and extending graphplan[A]. In proceedings of the 4th European Conference on Planning Toulouse[C]. France, 1997.
- [12] MIGUEL I, JARVIS P, SHEN Q. Flexible graphplan[A]. In Proceedings of the Fourteenth European Conference on Artificial Intelligence[C]. Berlin, Humboldt University, 2000.
- [13] MITTAL S, FALKENHAINER B. Dynamic constraint satisfaction problems[A]. In Proc. of the 8th National Conference on Artificial Intelligence[C]. Boston, Massachusetts, 1990.

作者简介:



谷文祥,男,1947年生,教授,博士生导师,主要研究方向为智能规划与规划识别、形式语言与自动机、模糊数学及其应用。主持国家自然科学基金项目2项,参与国家自然科学基金项目1项,教育部重点项目2项,省科委项目1项,发表论文百篇以上。

Email: gwx@nenu.edu.cn.



杨永娟,女,1982年生,硕士研究生,主要研究方向为智能规划与规划识别。



闫书亚,女,1982年生,硕士研究生,主要研究方向为智能规划与规划识别。