

# 一种利用 workflow 模型的 分层任务网络规划领域建模方法

张万鹏, 王楠, 陈璟

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为了有效地获取和利用领域知识, 提高规划效率, 分析了 workflow 模型和分层任务网络 (HTN) 规划领域模型的相似性, 提出了一种采用 workflow 模型进行规划领域建模, 对领域知识进行获取和表达的方法. workflow 模型中的行动和 workflow 模式, 转换为 HTN 规划中的行动和任务分解; 另外, 引入了循环 (Loop) workflow 模式, 转换为 HTN 规划中的递归调用, 扩展了 workflow 模式对规划领域知识的表达能力. 在典型的几个规划领域中, 引入领域知识后大大提高了规划器的求解效率, 从而验证了应用 workflow 模型进行规划领域建模的有效性.

**关键词:** workflow; 分层任务网络; 规划领域建模

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)03-0239-09

## An HTN planning domain modeling method using a workflow model

ZHANG Wanpeng, WANG Nan, CHEN Jing

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to improve planning efficiency by acquiring and utilizing domain knowledge, workflow process models were compared along with hierarchical task network (HTN) planning domain models, and a new method was presented based on the workflow to model planning domain. Activities and workflow patterns were respectively translated into actions and composed tasks in the HTN domain. Loop pattern was introduced to represent recursion in the HTN domain in order to extend the knowledge acquisition and representation abilities of workflow patterns. In experiments on several classical planning domains, such knowledge acquired in workflow models was shown to speed up the classical planner by several orders of magnitude. The experiments validate the HTN planning domain modeling method using a workflow model.

**Keywords:** workflow; hierarchical task network; planning domain modeling

领域知识的表达与应用, 一直是规划技术应用于实际的一个主要难题<sup>[1]</sup>, 因为很多规划问题的描述往往依赖于规划系统内部运行的相关知识, 还需要专业人员 (往往是规划系统的开发人员) 进行领域建模, 而一般的用户要将实际的规划问题描述为规划系统能够识别的领域模型和问题模型还是一个相当繁琐且复杂的过程.

在工作流管理系统 (workflow management system, WFMS) 中, 已经具备了允许非专业人员按照预

定义的语言输入领域知识的能力, 并且提供了图形化的界面使用户能够方便地输入领域知识. 过去几年中的研究表明, 智能规划 (AI planning) 与 workflow 管理的结合是一个值得研究的方向. 一方面, 研究人员在利用规划技术进行流程自动生成方面取得了较大的进展, 欧洲规划调度研究网络 (European network of excellence in AI planning, PLANET) 在 2003 年的研究计划<sup>[2]</sup> 对此有详细的描述. 另一方面, 一些研究人员也对利用 workflow 进行规划的领域建模进行了探索<sup>[3,4]</sup>. 文献[3] 对 workflow 管理系统和 AI 规划系统的相似性进行分析, 首次提出了使用业务流程管理工具对规划领域进行建模, 并转换为规划领

域描述语言 PDDL 进行求解的方法. 在对于层次化领域知识(hierarchical task network knowledge)的获取方面,G-Ferrer 等在文献[4]中,利用工作流模式(workflow pattern)对 HTN 知识进行表达,并转换为 HTN-PDDL 描述语言,利用 HTN 规划器进行求解. 在 2009 年第 3 届国际规划调度知识工程大赛(ICK-EPS)中,G-Ferrer 等开发的 JABBH 系统<sup>[5]</sup>,将用于表达 HTN 知识的工作流模式进一步精炼为 3 种:顺序(serial)、并行(parallel)和选择(exclusive-OR).

工作流过程(process)可以定义为一组偏序的步骤,它可以由更低级的过程或行动组成,按照顺序、并行、分支、选择、合并、循环等关系进行组织,以达成某个既定的目标. 这与分层任务网络(hierarchical task network, HTN)规划中任务的表达非常类似,在 HTN 规划中,规划的目标不是达成某个目标(集)而是完成一组任务,高层的任务可以被分解为

更细的任务或操作的组合.

本文在分析工作流模型和 HTN 规划领域模型的基础上,给出利用工作模型进行 HTN 规划领域建模的方法,并利用经典规划器在引入和未引入领域知识时的求解效率的实验对比,验证所给出的建模方法的有效性.

## 1 工作流与 HTN 规划

工作流是针对工作中具有固定程序的常规活动而提出的一个概念,最初源于文件的处理,主要管理文件在各个部门之间的传递和审阅. 通过将工作活动分解成定义良好的任务、角色、规则和过程来进行执行和监控,达到提高生产组织水平和工作效率的目的. 工作流管理联盟(workflow management coalition, WfMC)提供了一种工作流的过程元模型<sup>[6]</sup>,如图 1.

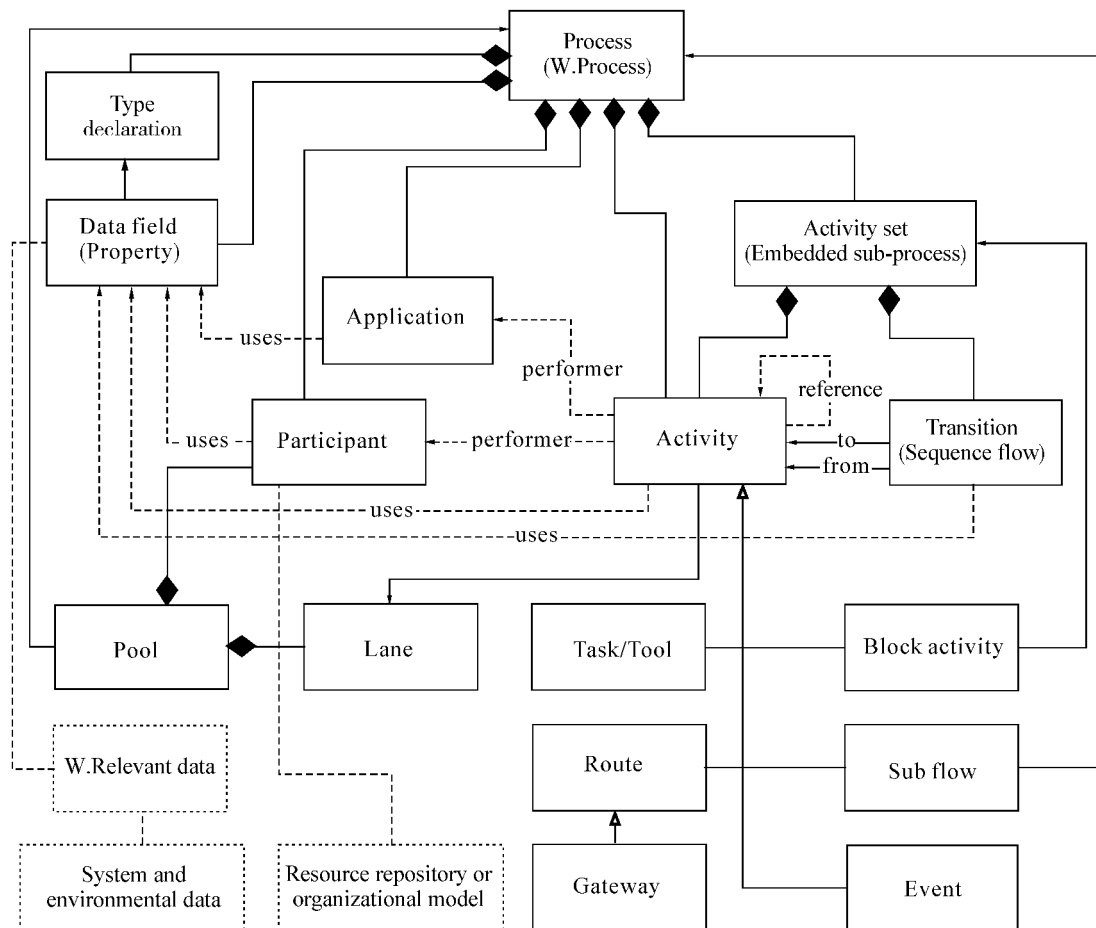


图1 WfMC 给出的工作流元模型

Fig.1 Workflow meta-model presented by WfMC

在该元模型描述中,一个工作流过程(workflow process)由一个或多个行动(activities),也称为执行行动(implementation activities)组成,每个行动包含了一个合乎逻辑的、独立的工作单元,该行动由参与

者(participant)和(或)应用程序(application)所执行. 行动与行动之间通过“转移”(transitions)相关联,“转移”可以是有条件的(包含了允许或禁止执行该转移的评估表达式),也可以是无条件的,在流

程内部形成串联或并联的行动序列. 在图形化的表达中,“转移”即是 2 个表达行动的节点之间的连接. 此外,在过程元模型中,还有一种称为路由行动(route activities)的特殊行动,这类行动被用于确定过程中行动流程的路径. 一个行动也可以是一个子流程(subflow),也称为行动集(activityset),它可以作为一个子过程(单独定义的)执行的容器. 通道(lanes)在过程元模型中对行动进行组织和分类,常常被用于指定执行行动的角色、部门等. 过程元模型采取了标准的数据类型(字符、整型、实型、日期型等),并允许用户自定义数据字段(data field)和扩展属性(extended attributes).

工作流模式作为一种通用的结构,用于表达流程中常用的任务/行动间的关系,它们常常被嵌套于流程中以形成完整的流程模型<sup>[7]</sup>. 文献[7]中共给出了 15 类工作流模式,对规划的领域建模而言,并不需要所有的工作流模式. G-Ferrer 等人<sup>[4]</sup>的研究中给出了顺序(sequence)、并行(parallel split)、选择(exclusive choice)和合并(simple merge)4 种用于规划领域建模的工作流模式.

在众多 AI 规划技术的分支中,分层任务网络规划由于其推理能力和对经验知识的有效表达,在实际中得到了广泛的应用. HTN 规划的领域建模本质上是对过程的建模,可以指定参数化的过程描述,这些过程通过规划器的作用组合并实例化,以生成满足给定目标的计划.

为了描述的方便和不失一般性,采用 Ghallab 等人给出的一种简化版本的 HTN 规划,即简单任务网络(simple task network, STN)规划<sup>[1]</sup>说明 HTN 规划领域建模所需的要素.

1) 任务(task): 一个任务是形如  $t(r_1, r_2, \dots, r_k)$  的表达式,其中  $t$  为一任务符号,  $r_1, r_2, \dots, r_k$  为项. 如果  $t$  是一操作符号,则任务  $t$  为原子任务;否则任务  $t$  为非原子任务.

2) 任务网络(task network): 一个简单任务网络(或者简称任务网络)为一环图  $\omega = (U, E)$ ,其中  $U$  为节点集合,  $E$  为边的集合. 对每一节点  $u \in U$ , 均包含一任务  $t_u$ , 图  $\omega$  中的边定义了  $U$  中节点的部分序关系,即  $u < v$  当且仅当存在一条从节点  $u$  到节点  $v$  的路径.

3) 方法(method): 一个 STN 方法是一个 4 元组:  $m = (\text{name}(m), \text{task}(m), \text{precond}(m), \text{network}(m))$ . 式中:  $\text{name}(m)$  为方法的名字,是形如  $n(x_1, x_2, \dots, x_k)$  的语法表达式,这里  $n$  为惟一的方法符号,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  是所有能在方法  $m$  中任意地方出现的变量符

号;  $\text{task}(m)$  为非原子任务;文字集合  $\text{precond}(m)$  为方法  $m$  的前提条件;  $\text{network}(m)$  为一任务网络,该任务网络中的任务是方法  $m$  的子任务.

4) STN 规划领域: STN 的规划领域是一序对:  $D = (O, M)$ , 其中  $O$  为动作集合,  $M$  为方法集合.

5) STN 规划问题: STN 的规划问题是一个 4 元组:  $P = (s_0, \omega, O, M)$ , 其中:  $s_0$  为初始状态,  $\omega$  是任务网络,通常称为初始任务网络,  $D = (O, M)$  为 STN 规划领域.

此外,在 HTN 规划领域建模中,类型(types)、常量(constants)、谓词(predicates)、函数(functions)、行动(actions)的定义与经典规划相同. 同时在描述规划问题时,还需要定义规划问题所涉及的对象(objects).

通过上述对工作流过程元模型和 HTN 规划领域模型的分析,可以看出二者具有很强的相似性(表 1). 其中,HTN 规划领域模型中的任务对应于工作流模型中的过程,用于表征规划的任务列表;二者的行动模型均可用于表征完成任务所需要的底层行动;HTN 规划中的对象对应于工作流模型中的参与者/通道,用于对行动的执行者进行组织;子任务和子流程相对应,用于表征组成上层任务/流程的任务/流程;方法和工作流模式对应,用于表征流程和任务的分解方式.

表 1 工作流模型与 HTN 规划领域模型比较  
Table 1 Workflow model and HTN domain model

工作流模型	HTN 规划领域模型
工作流程(process)	任务(task)
行动(activity)	行动(action)
参与者/通道(participant/lane)	对象(objects)
子流程(subflow)	子任务(subtask)
工作流模式(workflow patterns)	方法(methods)

## 2 模型转换

工作流模型向 HTN 规划领域模型的转换主要包括 2 个方面,一是将工作流行动转换为规划行动;二是将工作流模式转换为组合任务(composed tasks)的分解方法.

### 2.1 行动的转换

规划领域的行动一般由 3 部分组成:行动名和参数表、行动的前提与行动的结果. 在工作流模型中,行动名和参数可以直接表达,而行动的前提和结果一般通过行动的规则来描述. 规则由 2 部分组成:1) 前提(if rules):行动执行的条件,也就是说行动在什么情况下能够执行;2) 结果(then rules):行动执行后对状

态的影响.

下面给出的伪代码描述了一个办公室机器人移动行动的规则.

```
<Rule name = "moveActivity" >
  <Rule. Condition >
    moveActivity. loc1. rloc
    && moveActivity. d. closed
    && moveActivity. door. realvalue
  </Rule. Condition >
  <Rule. ThenAction >
    moveActivity. loc2. rloc = true
    &&moveActivity. loc1. rloc = false
  < Rule. ThenAction >
</Rule >
```

上述例子转换为 HTN 规划的行动表达如下.

```
(:action move
  :parameters (?loc1-ROOM ?loc2-ROOM ?d-ROOMDOOR)
  :precondition (and (rloc ?loc1) (door ?loc1 ?loc2 ?d) (not (closed ?d)))
  :effect (and (rloc ?loc2) (not (rloc ?loc1)))
)
```

其中,二者对于状态的表达有所不同.在规划的领域模型中,状态由一组基础谓词的合取来表达;而在工作流模型中,状态一般由对象、对象实例(instances)、属性(attributes)以及属性的值(variable)来表达.在工作流模型中,用 bool 型变量来表达命题,如“bool armempty”表达机器手臂是否为空;用对象的 bool 型属性来表达一元谓词,如“bool door. closed”表达门是否关闭;用谓词对象来表达多元谓词,其中谓词的项由对象的属性来表达,而谓词的断言(assertion)可以由对象中的一个 bool 型属性来表达.

## 2.2 工作流模式的转换

G-Ferrer 等人在其开发的 JABBH 系统(将业务流程模型转换为 HTN 规划模型的一个 JAVA 应用程序框架)<sup>[5]</sup>应用了 3 种典型的工作流模式来表达 HTN 规划的任务分解方法.以下是这 3 种模式的工作流编码和转换为 HTN 方法后的 HTN 编码.

1) 顺序模式工作流表示及对应的 HTN 编码:

```
<SequenceActivity x; Name = "SB1" >
  <ns0; MoveActivity x; Name = "A1" / >
  <ns0; MoveActivity x; Name = "A2" / >
</SequenceActivity >
```

对应的 HTN 编码如下:

```
(:task SB1
```

```
:Parameters()
(:method msb1
:preconditon()
:tasks( (A1) (A2) ) ) )
```

2) 并行模式工作流表示及对应的 HTN 编码:

```
<ParallelActivity x; Name = "PB1" >
  <SequenceActivity
    x; Name = "sequenceActivity1" >
    <ns0; MoveActivity x; Name = "A1" / >
  </SequenceActivity >
  <SequenceActivity
    x; Name = "sequenceActivity2" >
    <ns0; MoveActivity x; Name = "A2" / >
  </SequenceActivity >
</ParallelActivity >
```

对应的 HTN 编码如下:

```
(:task PB1
  :Parameters()
  (:method mpb1
  :preconditon()
  :tasks( [ (A1) (A2) ] ) ) )
```

3) 选择模式工作流表示及对应的 HTN 编码:

```
<IfElseActivity x; Name = "XORB1" >
  <IfElseBranchActivity
    x; Name = "ifBranch" >
    <IfElseBranchActivity. Condition >
    <RuleConditionReference
      ConditionName = "ifConditon" / >
    </IfElseBranchActivity. Condition >
    <ns0; MoveActivity x; Name = "A1" / >
  </IfElseBranchActivity >
  <IfElseBranchActivity
    x; Name = "elseBranch" >
    <ns0; MoveActivity x; Name = "A2" / >
  </IfElseBranchActivity >
</IfElseActivity >
```

ifConditon:

```
this. x = = true
```

对应的 HTN 编码如下:

```
(:task XORB1
  :Parameters(?x -parameter)
  (:method ifBranch
  :preconditon(value ?x true)
  :tasks( (A1) ) )
  (:method elseBranch
```

```
:preconditon( value ?x false)
```

```
:tasks( ( A2 ) ) )
```

图2所示为顺序、并行、选择的工作流模式.

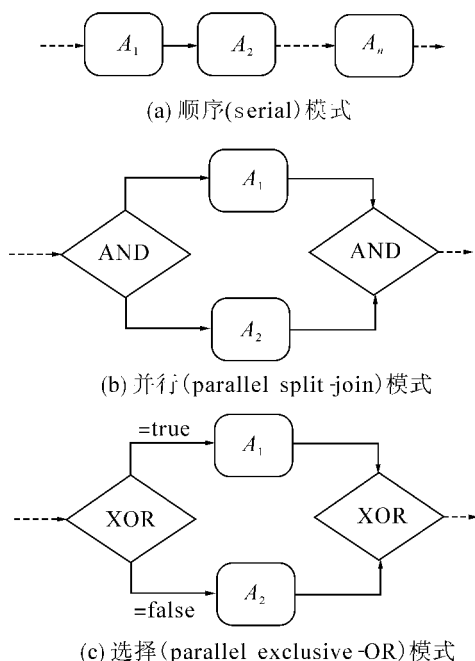


图2 3种典型的工作流模式

Fig. 2 Three classical workflow patterns

此外,在 HTN 规划中,递归(recursive)调用是一种重要的方法,它可以方便地描述需要重复执行的行动.不过,递归的引入给 HTN 规划带来了不可判定的问题,即使基础状态空间是有限的<sup>[8]</sup>.此困难的出现是因为如果分解是可以递归的,那么 HTN 规划解可以是任意长的,不能在固定的时间内终止搜索.为了解决不可判定性的问题,一些 HTN 规划器采取了限定规划解长度的方式,因为状态空间是有限的,一个步骤比状态空间的状态还多的规划一定包含了访问同一个状态 2 次或 2 次以上的回路.在工作流模型中,可以采用循环(loop)模式(图 3)来表达方法的递归调用,为了解决不可判定的问题,可以在循环的条件中增加调用次数的限制.

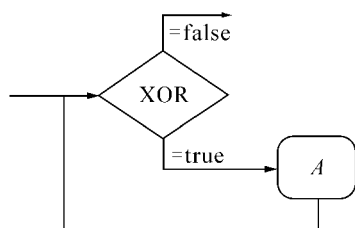


图3 工作流循环(loop)模式

Fig. 3 Loop workflow pattern

例如,为了完成将一堆集装箱从位置  $p$  移动到位置  $q$  的任务,可按照下列方式进行处理:重复移动位置  $p$  最上面的集装箱到位置  $q$ ,直到位置  $p$  上不再

有集装箱为止.以下是该方法循环模式的工作流表示及对应的 HTN 编码.

```
< WhileActivity x ; Name = "move-stack" >
  < WhileActivity. Condition >
    < RuleConditionReference
      ConditionName = "precond" / >
    < /WhileActivity. Condition >
    < SequenceActivity x ; Name = "sequenceActivity1" >
      < ns1 : MoveActivity x ; Name = "mov-top-most-container" / >
      < ns1 : CountActivity x ; Name = "count-recursive-times" / >
    < /SequenceActivity >
  < /WhileActivity >
  precondition: this. p . empty == false && this. r_times > 0
```

对应的 HTN 编码如下:

```
( :task move-stack
  :parameters( ?p -place ?q -place ?r_times-times)
  (:method recursive-move
    :preconditon( and( ( not( empty ?p ) )
      ( GreaterThan ?r_times 0 ) ) )
    :tasks( ( mov-topmost-container)
      ( count-recursive-times)
      ( move-stack ) ) )
```

本文在循环的条件中增加了对调用次数的限制,如果超过了最大调用次数则递归终止.一般情况下,如果状态空间是有限的,任务的分解基本上都会在有限步骤内达到原子行动.如上例所描述的情况,如果  $p$  上的集装箱个数是有限的(如有  $K$  个),则 move-stack 行动将在被递归调用  $K$  次之后完成.当基础的状态的空间是有限的,而组合的状态空间可能是无限的,例如在上例中,如果将  $p$  上的集装箱移动到  $q$  后,还有另外的行动又将其移动到  $p$  上,这样对 move-stack 的调用将会无休止地进行下去.在这种情况下,限定规划解的长度,即限定递归调用的次数是解决不可判定性的一个有效方法,虽然可能会损失规划解的完备性(可能会出现这样的情况,有的任务就是要求将集装箱从  $p$  搬到  $q$ ,然后再搬回来).

### 3 实例分析

为了验证 workflow 模型在规划领域建模中应用的有效性,采用 MSWF ( Microsoft workflow founda-

tion)<sup>[9]</sup>的工作流设计器(workflow designer)对典型的规划问题进行建模,对该建模方式和经典建模方式下规划器的执行效率进行对比.为了最大限度地减少因规划算法不同带来的影响,对这2种建模方式采用相同的规划器进行求解.实验选择了经典的前向快速规划器(fast forward, FF)<sup>[10]</sup>,并以3个典型的规划领域作为研究实例:积木世界(blocks world)问题、汉诺伊塔(towers of Hanoi)问题以及办公室运送(office delivery)问题.

另外,FF规划器的输入是标准规划领域描述语言(PDDL)描述的领域模型和问题模型,利用工作流建模工具构建的规划领域模型还需要进行一定的转换才能生成FF能够识别的输入.我们将工作流模型转换为HTN规划模型,并采用Alford等人<sup>[11]</sup>开发的转换工具(HTN2PDDL)将其转换为PDDL描述方式(此时的领域模型中已经包含了由工作流模型获取的领域知识).实验系统的结构和运行过程如图4所示.

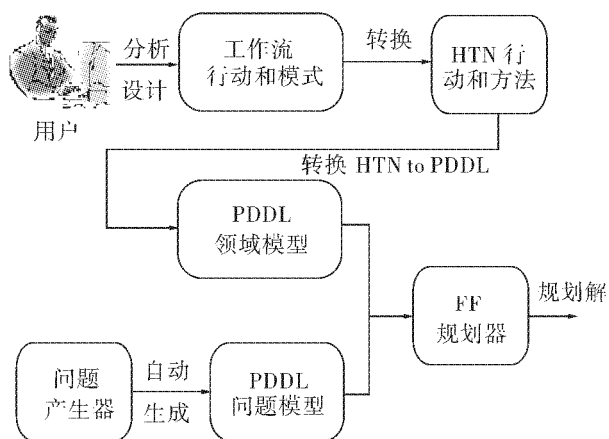


图4 实验系统结构与运行流程

Fig. 4 System structure and process

### 3.1 积木世界

对于积木世界问题,采用WF workflow designer定义了4类基础行动:pickup、putdown、stack、unstack.经典规划器FF对积木世界直接求解是比较困难的,利用工作流建模工具构建如下方法.

- 1) 方法:移动积木.
- 2) 前提:积木未处于目标位置.
- 3) 子任务1:拿起积木,将积木放于目标位置.
- 4) 子任务2:拿起积木,将积木放置于桌面.

该方法可以表达为图5所示的流程结构,其中拿起(acquire)积木和放下(release)积木的过程采用工作流选择模式表达,拿起一放下采用工作流顺序模式表达,达到目标的过程采用工作流循环模式表达.

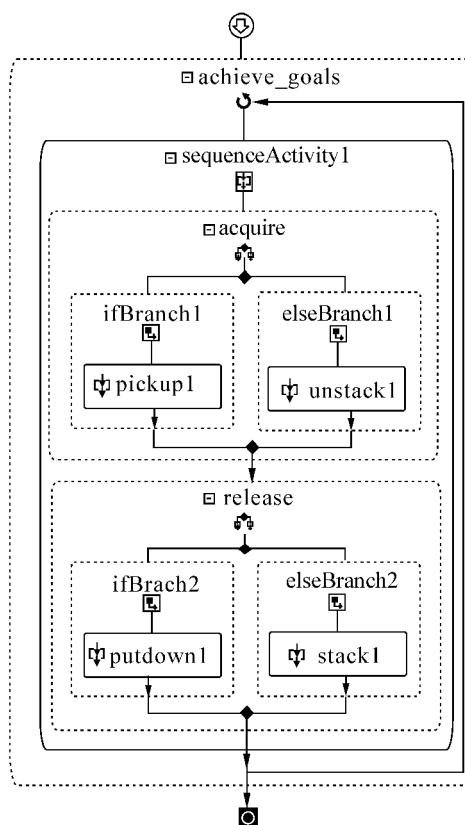


图5 移动积木过程的工作流表达

Fig. 5 Workflow of moving blocks

采用Alford等人<sup>[11]</sup>给出的问题生成工具,生成 $n=5,10,\dots,90$ 的 $n$ -block问题,进行了50次实验,对每个 $n$ 值的求解时间取50次实验的平均值. FF-WF表示采用workflow模型引入领域知识后,利用FF规划器进行求解的计算时间变化曲线;FF-Plain表示采用一般的经典规划表达,利用FF规划器进行求解的计算时间变化曲线,实验结果如图6所示.

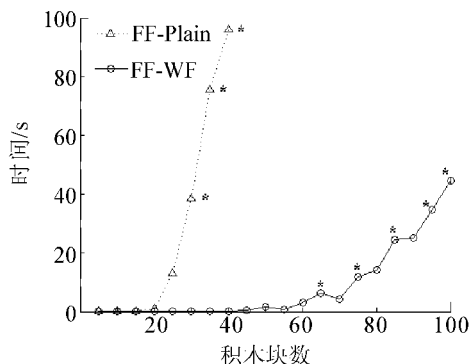


图6 积木世界问题的FF求解时间

Fig. 6 FF solving time of blocks world

对每个问题的求解,实验设置了求解的最大时间为100s,“\*”表示有部分实验的执行时间超过

了最大时间.由实验结果可以看出,在随着问题规模的增加,利用 workflow 模型进行领域建模,引入领域知识后对规划器求解效率的提高越大.在  $n = 40$  时,效率提高了近 100 倍.

### 3.2 汉诺伊塔

汉诺伊塔问题是一个经典的规划问题,它要求将一组从大到小叠放的圆盘从一个立柱通过一个中间立柱的中转移动到另外一个立柱,移动时要求圆盘只能放置在比它大的圆盘上.当圆盘数较多时,由于其状态的组合爆炸,使得很多经典规划器对其求解比较困难.可以引入如下的领域知识,避免规划器在搜索过程中进行不必要的回溯.

- 1) 方法:移动圆盘.
- 2) 前提 1:上次移动的不是最小的圆盘.
- 3) 子任务 1:将最小的圆盘按顺时针方向 ( $t_1 \rightarrow$

$t_2 \rightarrow t_3 \rightarrow t_1 \rightarrow \dots$ ) 移动.

- 4) 前提 2:上次移动的是最小的圆盘.

- 5) 子任务 2:移动其他的圆盘.

该方法进一步细化可以表示为如图 7 所示的流程结构.该流程包含了 1 个基础的行动 move 和 2 层递归结构,第 1 层的 selectDirection 递归用于确定圆盘初始的移动方向,当圆盘个数为奇数时,最小的圆盘从立柱  $t_1$  移动到  $t_3$ ,当圆盘个数为偶数时,最小的圆盘从立柱  $t_1$  移动到  $t_2$ ;第 2 层 rotateTower 递归用于表达上述方法,move1 为移动最小圆盘的行动,move2 为移动其他圆盘的行动,exchange 的作用是保证最小的圆盘按顺时针方向移动,exchangeClear 是对目标状态的判断,当  $t_1$  和  $t_2$  上都没有圆盘时,表明所有圆盘已经移动到  $t_3$  上,递归终止.

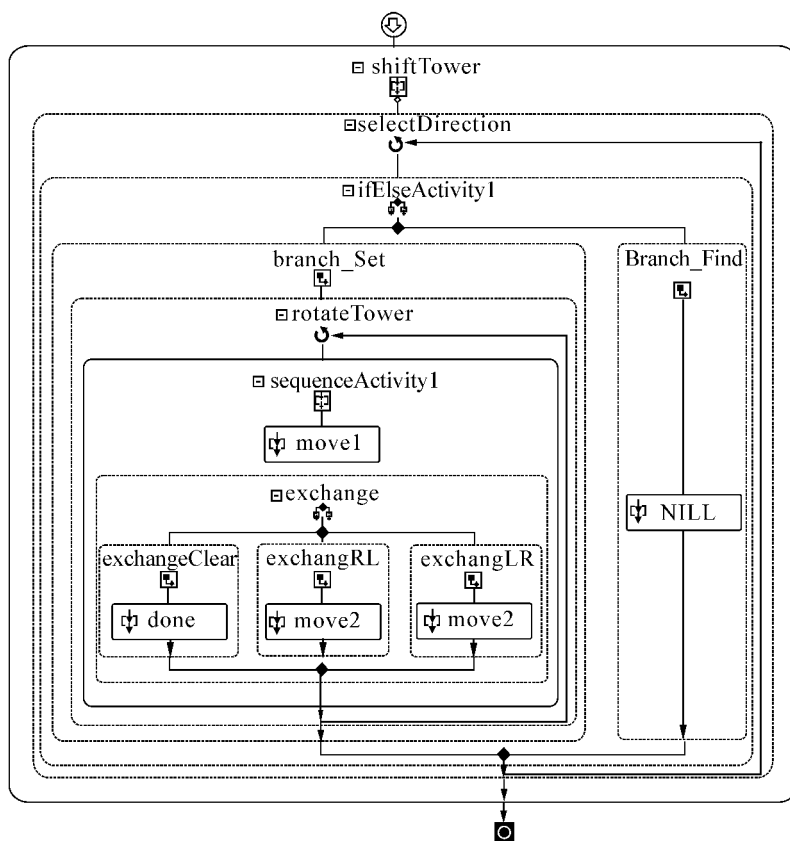


图7 移动圆盘过程的工作流表达

Fig.7 Workflow of moving towers

实验生成  $n = 3, 4, \dots, 14$  的  $n$ -ring 问题,进行了 50 次实验,对每个  $n$  值的求解时间取 50 次实验的平均值,实验结果如图 8 所示.由实验结果可以看

出,当问题规模较大时 ( $n = 12, 13, 14$ ),FF-WF 的效率明显高于 FF-Plain.

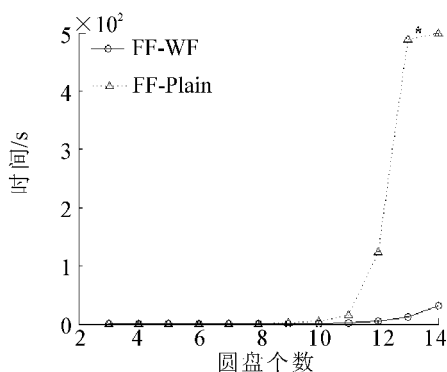


图8 汉诺伊塔问题的FF求解时间

Fig. 8 FF solving time of Hanoi tower problem

### 3.3 办公室运送

办公室运送问题是一个典型的运输领域规划问题,要求一个机器人在办公楼的各个房间内将多个包裹运送到指定的位置.对于该规划问题,同样可以引入简单的领域知识(不必要是完备的)以引导规划器搜索.

1) 方法:移动所有剩余的包裹.

2) 前提:存在未处于目标位置的包裹.

3) 子任务:拿起包裹,将包裹放置于目标位置,移动剩余的包裹.

该方法可以表示为如图9所示的流程结构,该结构包含 workflow 顺序模式和循环模式,其中循环模式的结束条件为所有包裹放置于目标位置.这个方法其实是很不完备的,因为忽略了下列行动:1) 忽略了机器人如何到达包裹的初始位置,这样它才可以将包裹拿起;2) 忽略了机器人将包裹搬运到目标位置的过程.下面通过实验验证,即使是如此简单且不完备的领域知识,也会对规划器的效率有很大的提高.

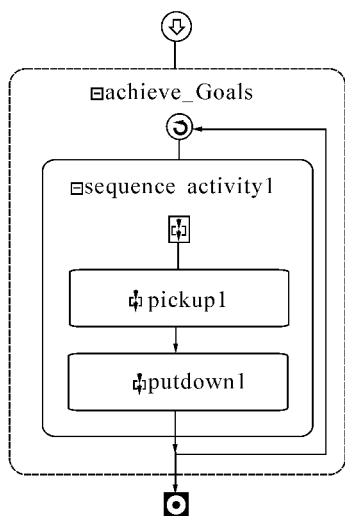


图9 运送包裹过程的工作流表达

Fig. 9 Workflow of delivering packages

实验生成了2组实验测试集:固定房间数  $n = 50$ , 生成包裹数  $k = 10, 20, \dots, 90$  的  $50-k$ -robot 问题;固定包裹数  $k = 50$ , 生成房间数  $n = 10, 20, \dots, 90$  的  $n-50$ -robot 问题.对2组测试集分别进行了100次实验,对每个  $n$  值和  $k$  值的求解时间分别取100次实验的平均值.实验结果如图10所示.

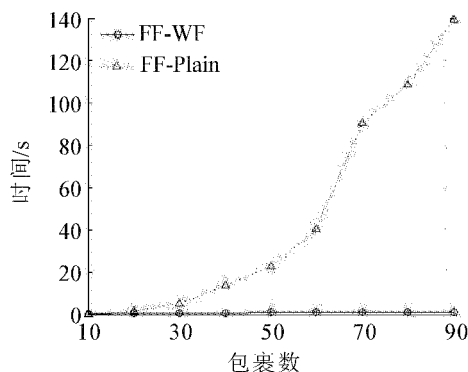
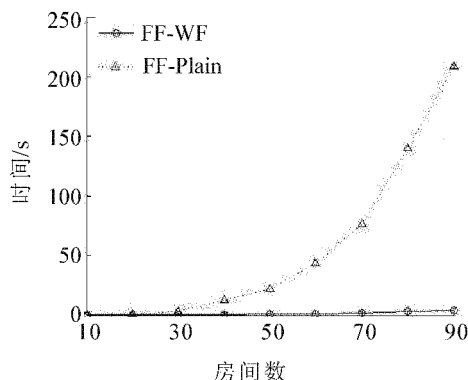
(a) 固定房间数  $n = 50$ (b) 固定包裹数  $k = 50$ 

图10 办公室运送问题的FF求解时间

Fig. 10 FF solving time of office delivery problem

由实验结果可以看出,随着问题规模的增大,FF-WF 求解时间的增量要远远小于 FF-Plain.

## 4 结论

workflow 管理系统自20世纪90年代初兴起以来,在诸多领域得到了广泛的应用,也出现了多种成熟的建模和管理工具. AI 规划技术在工作流管理领域中的应用,从业务流程的自动生成到业务流程重组,都为 workflow 管理系统带来了新的活力. 笔者研究的思路与此相反,利用 workflow 管理系统中的建模工具,作为规划领域的建模工具,利用 workflow 模型的结构化和层次性等特点以及 workflow 建模工具良好易用的人机界面,降低规划领域建模的难度,使得普通用户也能方便地输入规划领域知识.

本文首先从模型相似性的角度,对 workflow 流程元模型和 HTN 规划领域模型进行了对比,分析了采用 workflow 模型进行 HTN 规划领域建模的可行性. 在



此基础上,扩展了用于获取 HTN 知识的工作流模式,对引入循环模式后带来的不可判定性以及不完备性作了初步分析.最后,通过在几个典型规划问题上的对比实验,验证了采用 workflow 模型进行规划领域建模的有效性.

另外此类方法还有以下几个值得改进和进一步研究的问题.

1)虽然笔者分析了 workflow 元模型和 HTN 规划领域模型的相似性,进而用实验验证了采用 workflow 模型进行 HTN 规划领域建模的有效性,但是没有对 workflow 元模型和 HTN 规划领域模型的语义一致性进行分析和证明.语义一致性的证明涉及到二者的模型语义(model-theoretic semantics)和操作语义(operational semantics),这是笔者进一步研究的一个重要方向.

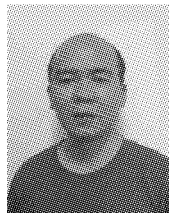
2)在实验中,由于采用的经典规划器不能求解并行行动规划问题,所以在实例中没有完全涵盖所列出的 workflow 模式,不包含并行模式,这是在进一步的研究中需要改进的一个问题.

3)本文采用了 WF-Designer 流程设计器作为领域建模工具,主要目的是为了验证方法的可行性和有效性,还未能实现从流程模型到 HTN 领域模型的全自动化转换.目前笔者正在设计实现自定义的 HTN 规划领域建模工具,以生成规划器能够直接应用的领域模型.

## 参考文献:

- [1] GHALLAB M, NAU D, TRAVERSO P. Automated planning: theory and practice[M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2004: 229-259.
- [2] KEARNEY P, BORRAJO D, CESTA A, et al. PLANET workflow management R&D roadmap [EB/OL]. (2003-09-30) [2010-11-15]. <http://scalab.uc3m.es/~dborrajo/planet/wm-tcu/WM-TCU-Roadmap-v4-Complete-Document.pdf>.
- [3] R-MORENO M D, BORRAJO D, CESTA A, et al. Integrating planning and scheduling in workflow domains[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 33(2): 389-406.
- [4] GONZALEZ-FERRER A, FDEZ-OLIVARES J, CASTILLO L, et al. Towards the use of XPDL as planning and scheduling modeling tool: the workflow patterns approach[C]//Proceedings of the 11th Ibero-American Conference on AI: Advances in Artificial Intelligence. Berlin, Germany: Springer, 2008: 52-61.
- [5] GONZALEZ-FERRER A, FERNANDEZ-OLIVARES J, CASTILLO L. JABBAH: a Java application framework for the translation between business process models and HTN [C]//The 3rd International Competition on Knowledge Engineering for Planning and Scheduling (ICKEPS 2009). Thessaloniki, Greece, 2009: 28-37.
- [6] Workflow Management Coalition. Process definition interface—XML process definition language[EB/OL]. [2010-11-15]. <http://www.wfmc.org/xpdl.html>.
- [7] Van DER AALST W M P, TER HOFSTEDE A H M, KIEPUSZEWSKI B, et al. Workflow patterns[J]. Distributed and Parallel Databases, 2003, 14(1): 5-51.
- [8] RUSSELL S, NORVING P. Artificial intelligence: a modern approach[M]. Upper Saddle River, USA: Pearson Education, 2003: 427-428.
- [9] SHUKLA D, SCHMIDT B. Essential Windows workflow foundation[M]. Boston, USA: Pearson Education, 2006: 261-292.
- [10] HOFFMANN J, NEBEL B. The FF planning system: fast plan generation through heuristic search[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2001, 14: 253-302.
- [11] ALFORD R, KUTER U, NAU D. Translating HTNs to PDDL: a small amount of domain knowledge can go a long way[C]//International Joint Conferences on Artificial Intelligence (IJCAI). Pasadena, USA, 2009: 1629-1634.

## 作者简介:



张万鹏,男,1981年生,博士研究生,主要研究方向为智能规划.发表学术论文近10篇.



王楠,男,1981年生,博士研究生,主要研究方向为智能优化.发表学术论文10余篇.



陈璟,男,1972年生,副教授,博士,主要研究方向为人工智能与飞行器规划.发表学术论文20余篇.