ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.20, No.4, April 2009, pp.858−869
doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03351

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

模型检测规划中的状态分层方法*

文中华[1+], 黄　巍[2], 刘任任[1], 姜云飞[3]

[1](湘潭大学　信息工程学院,湖南　湘潭　411105)
[2](华南理工大学　计算机科学与工程学院,广东　广州　510641)
[3](中山大学　软件研究所,广东　广州　510275)

Method of Hierarchical States in Planning Based on Model Checking

WEN Zhong-Hua[1+], HUANG Wei[2], LIU Ren-Ren[1], JIANG Yun-Fei[3]

[1](College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)
[2](School of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)
[3](Institute of Software, SUN YAT-SEN University, Guangzhou 510275, China)
+ Corresponding author: E-mail: zhonghua@xtu.edu.cn

Wen ZH, Huang W, Liu RR, Jiang YF. Method of hierarchical states in planning based on model checking. *Journal of Software*, 2009,20(4):858−869. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3351.htm

Abstract: Planning by model checking is an approach to planning under uncertainty that deals with nondeterminism. Three ways which obtain hierarchical states for searching weak planning, strong planning, and strong cyclic planning are respectively designed. Based on hierarchical states, some important conclusions on a weak solution, a strong solution, and a strong cyclic solution are obtained. What can be eliminated directly are all found when a weak solution, a strong solution, and a strong cyclic solution are in turn searched. Therefore many state-action pairs can be eliminated directly before starting planning. In fact, a way has been given which is based on a search proceeding forwards from the initial states towards the goal states.
Key words: model checking; hierarchical state; planning under uncertainty; forward search; state-action pair

摘　要: 基于模型检测的规划方法是最近发展起来的新方法,它可以处理带有不确定性的规划问题.分别设计了对求弱规划解、强规划解和强循环规划解的问题中的状态进行分层的方法.状态被分层后,求规划解只需要在从上层到其下一层状态之间寻找状态动作序偶就可以了,其他状态动作序偶都可以去掉.分别获得了求弱规划解、强规划解和强循环规划解时状态被分层后的一些重要性质,这些性质是关于一些状态动作序偶是否可以不参与构成弱规划解、强规划解和强循环规划解的结论.通过所获得的性质可以将大量的状态动作序偶直接去掉,从而减少问题规模.以往的对基于模型检测规划的研究都是采用从目标状态开始的反向搜索方法,在状态被分层以后可以采用正向搜索技术展开相应的研究.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60673193, 60773047, 60773201 (国家自然科学基金); the Construct Program of the Key Discipline in Hu'nan Province of China under Grant No.081202 (湖南省重点学科建设项目); the Scientific Research Fund of Hu'nan Provincial Education Department of China under Grant No.08C874 (湖南省教育厅科研项目); the Foundation of Xiangtan University of China under Grant No.kz08009 (湘潭大学校基金)

Received 2007-09-02; Accepted 2008-03-27

关键词: 模型检测;状态分层;不确定规划;正向搜索;状态动作序偶
中图法分类号: TP18 **文献标识码:** A

智能规划是当前人工智能的热点领域,具有突出的理论和应用价值[1−4].基于模型检测的规划方法是最近发展起来的新方法,它可以处理带有不确定性的规划问题[5−9],例如涉及可达性目标的[10,11]、限于部分可观察的[12,13]和扩展目标的[14]规划问题.这种方法的关键思想是利用模型理论来解决规划问题,其代表性的规划器有 MBP,YKA,SIMPLAN,JUSSIPOP 和 UMOP.

由于动作的不确定性,对基于模型检测规划的研究都是采用从目标状态开始的反向搜索方法[5,6,8,10,11,13,15],随着问题规模的扩大,反向搜索层次的加深,重复、无效的工作就越来越多,从而导致求规划解的效率低,能解决的问题规模很小.实际上,有很多状态动作序偶是不可能或可以不参与构成规划解的,如果在搜索规划解之前就将这些不可能或是可以不参与构成规划解的状态动作序偶去掉,就会减少问题规模,提高求规划解的效率.

在基于模型检测规划的研究中,在求弱、强和强循环规划中都涉及到状态转移,都是要求出从初始状态出发到达目标状态的状态动作序偶,只是在到达的强度上有不同的要求[1,6,7,11,12].在从初始状态转移到目标状态的过程中要经过若干中间状态,每个中间状态下可以执行的动作可能有很多.在状态 s 下执行动作 a,按执行动作 a 后所到达的状态与目标状态的关系,可以将状态 s 下可执行的动作分成以下 4 类:(1) 执行有的动作后可能直接导致最终不能到达目标状态;(2) 执行有的动作后可能直接导致朝远离目标的方向转移;(3) 执行有的动作后既没有朝目标方向移动也没有朝远离目标的方向转移;(4) 执行有的动作后直接向目标方向移动.我们总是希望选中第(4)类动作,这样就可以使我们求出的规划解既准确、快速又精炼.将状态按离目标状态的远近关系进行分层,然后选择从上层到下层的状态转移,是让我们总是选中第(4)类动作的思想基础.目前,在基于模型检测的规划的研究中还没有关于对状态进行分层的研究.本文开展对基于模型检测的规划问题中的状态进行分层的研究,设计了相应的状态分层算法,并在状态已经被分层的基础上研究同一层状态之间、上层状态与下层状态之间、下层状态与上层状态之间的状态转移关系,获得了状态被分层后的一些重要性质,找到了那些对构成弱、强和强循环规划解没有影响的状态动作序偶,从而将它们直接去掉,因此减少问题规模,提高求规划解的效率.同时,在用模型检测方法研究不确定状态转移系统中的规划问题时,在状态被分层以后可以采用正向搜索技术展开相应的研究:从初始状态开始,先找到将初始状态转移到它的下一层状态的动作,然后依此进行下去直至到达目标状态为止.

1 相关定义

定义 1. 一个规划领域是一个不确定的状态转移系统 $\Sigma=(S,A,\gamma)$[1],其中,S 是一个有限状态集,A 是一个有限动作集,$\gamma:S\times A\to 2^S$ 是状态转移函数.

在状态 s 下可执行的动作的集合记作 $A(s)=\{a:\exists s'\in\gamma(s,a)\}$,称 (s,a) 为状态动作序偶.

一个不确定的状态转移系统对应一个与或图,这里我们把与或图定义为超图.

定义 2. 称 $D=(N,H)$ 为超图,如果:

(1) N 是一个非空有限集合,称为结点集;

(2) H 是一个有限集合,称为超弧集.超弧是一个有序对,其中的第 1 个元素是 N 中的一个结点,第 2 个元素是 N 的一个子集.

定义 3. 设 $\Sigma=(S,A,\gamma)$ 是一个不确定的有限的状态转移系统,$\Sigma D=(S,E)$ 称为 $\Sigma=(S,A,\gamma)$ 的超图,如果:

(1) S 是一个非空有限集合;

(2) E 是一个有限集合,称为超弧集.如果 $\exists a,\gamma(s,a)=\{s_1\}$,则 $(s,\{s_1\})\in E$;如果 $\exists a,\gamma(s,a)=\{s_1,s_2,\dots,s_x\}(x\ge 2)$,则 $(s,\{s_1,s_2,\dots,s_x\})\in E$.

并把 S 中的元素叫做超图 ΣD 的顶点,E 中的元素叫做超图 ΣD 的超弧.如果 $(s,\{s_1,s_2,\dots,s_x\})\in E$,则称 (s,s_i) 为超图 ΣD 的超弧边(其中,$s_i\in\{s_1,s_2,\dots,s_x\}$),称顶点 s 为超弧边 (s,s_i) 的起点,顶点 s_i 为超弧边 (s,s_i) 的终点.

根据定义 3,一个不确定的状态转移系统唯一确定了一个超图,反之亦然.

定义 4. 设$\Sigma=(S,A,\gamma)$是一个不确定的状态转移系统,$\Sigma D=(S,E)$是Σ的超图,S 含有 n 个状态 $s_1,s_2,\ldots,s_n$,ΣD 的邻接矩阵 $B=(b_{ij})_{n\times n}$ 是一个 $n\times n$ 矩阵,其中,b_{ij} 定义如下:

$$b_{ij}=\begin{cases}1,\ \text{如果}(s_i,\{s_j\})\in E\\ T,\ (s_i,\{s_j\})\notin E;\ x\geq 2,\ s_j\in\{s_{t1},s_{t2},\ldots,s_{tx}\},\ (s_i,\{s_{t1},s_{t2},\ldots,s_{tx}\})\in E\\ 0,\ \text{其他}\end{cases}.$$

规定ΣD 的邻接矩阵中的 3 个值按以下方式进行运算,只定义加法和乘法,加法和乘法都满足交换律.

$\forall x\in\{0,1,T\},0+x=x;\forall x\in\{0,1,T\},1+x=1;T+T=T.$

$\forall x\in\{0,1,T\},0\bullet x=0;\forall x\in\{0,1,T\},1\bullet x=x;T\bullet T=T.$

定义 5. 设$\Sigma D=(S,E)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$的超图,ΣD 中的顶点与超弧边的交替序列$\Gamma=s_{i0}e_{j1}s_{i1}e_{j2}\ldots e_{jk}s_{ik}$称为顶点 s_{i0} 到顶点 s_{ik} 的通路.其中,$e_{jr}=(s_{ir-1},s_{ir})$是ΣD 的超弧边,s_{ir-1},s_{ir} 分别为 e_{jr} 的起点和终点,$r=1,2,\ldots,k$.s_{i0},s_{ik} 分别称为Γ的起点和终点,Γ中的超弧边数 k 称为Γ的长度.

定义 6. 设$\Sigma D=(S,E)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$的超图,若从顶点 s_i 到顶点 s_j 存在通路,则称 s_i 可达 s_j,s_j 是 s_i 可达的,记为 $s_i\rightarrow s_j$;否则称 s_i 不可达 s_j,记为 $s_i\neg\rightarrow s_j$.

定义 7. 设$\Sigma=(S,A,\gamma)$是一个规划领域,一个对于Σ的规划问题 P 是一个三元组(Σ,S_0,S_g),其中,$S_0\subseteq S$ 是初始状态集合,$S_g\subseteq S$ 是目标状态集合[6].

定义 8. 设π是规划领域$\Sigma=(S,A,\gamma)$中的一个状态动作序偶表,$P=(\Sigma,S_0,S_g)$是Σ上的一个规划问题,从初始状态集 S_0 所导出的π的执行结构为 $K=\langle Q,T\rangle$,其中,$Q\subseteq S$ 和 $T\subseteq S\times S$ 是满足以下条件的最小集合[1]:

(1) 若 $s\in S_0$,那么 $s\in Q$,并且,

(2) 若 $s\in Q$ 且存在某个$(s,a)\in\pi,s'\in\gamma(s,a)$,那么 $s'\in Q$ 且$(s,s')\in T$.

状态 $s\in Q$ 是 K 的一个终止状态当且仅当不存在 $s'\in Q$ 使得$(s,s')\in T$.

执行结构 K 就是一个有向图,其中,结点集 Q 是系统在(以 S_0 为初始状态集)执行规划解时所可能到达的所有状态的集合,而 T 表示了所有可能的状态转移,K 的各个终止状态则代表了规划执行的终止,在后面的内容中一律用 $S_{terminal(K)}$来表示执行结构 K 的终止状态集.

定义 9. 设$\Sigma=(S,A,\gamma)$是一个规划领域,$P=(\Sigma,S_0,S_g)$是Σ上的一个规划问题,π是规划领域$\Sigma=(S,A,\gamma)$中的一个状态动作序偶表,$K=\langle Q,T\rangle$是π从 S_0 导出的执行结构[6].

(1) π是 P 的弱规划解当且仅当$(\forall s\in S_0)(\exists s'\in S_g\cap S_{terminal(K)})s'$是 s 可达的;

(2) π是 P 的强循环规划解当且仅当 $S_{terminal(K)}\subseteq S_g$,并且$(\forall s\in Q)(\exists s'\in S_{terminal(K)})s'$是 s 可达的;

(3) π是 P 的强规划解当且仅当 K 是无环的,并且 $S_{terminal(K)}\subseteq S_g$.

2 强规划问题中的状态分层

根据强规划解的定义,一个状态动作序偶表π是一个规划问题 P 的强规划解当且仅当Σ_π没有无限长的路径,即Σ_π无环,并且Σ_π中所有的终止状态都属于 S_g.当π是 P 的强规划解时,对于 S_0 中的任意状态 s 都存在一个目标状态 s',使得 s'是Σ_π的终止状态且 s'是 s 可达的.也就是说,强规划解中涉及的每一个状态都一定能够到达目标状态.

定义 10. 在一个规划问题中,一个状态一定能够到达目标状态,则称这个状态强到达目标状态.

2.1 强规划问题中的状态分层方法

设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题,其中,S_0 是初始状态集合,S_g 是目标状态集合.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强规划解.下面设计算法对状态进行分层,分层原则是将强到达目标状态所需要的最少的状态转移步数相同的状态放在同一层.

对求强规划解的问题的状态按以下 WZHFCQ(Wen Zhong Hua Fen Ceng Qiang)方法进行分层:

(1) 所有的目标状态为第 1 层,$S_1=S_g$;

(2) $S_2=\{s:s\notin S_1,\exists a,\gamma(s,a)\subseteq S_1\}$为第 2 层.如果 $S_2\neq\varnothing$,进一步分第 3 层;

(3) $S_3=\{s:s\notin(S_1\cup S_2),\exists a,\gamma(s,a)\subseteq(S_1\cup S_2)\}$为第 3 层.如果 $S_3\neq\varnothing$,进一步分第 4 层;

(4) $S_i=\{s:s\notin(S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_{i-1}),\exists a,\gamma(s,a)\subseteq(S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_{i-1})\}$为第 i 层($i\geq 2$).如果 $S_i\neq\varnothing$,进一步分第 i+1 层.

如果在分到第 j 层时 $S_j=\varnothing$,则停止进一步分层,即分层结束,此时可得 j–1 层状态.

设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个求强规划解的问题,对 P 中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\ldots,S_k$,称 S_k 是最上层的状态,称 S_1 是最下层的状态,S_{i-1} 是 S_i 的下一层状态($2\leq i\leq k$),S_i 是 S_{i-1} 的上一层状态,称 $S_1,S_2,\ldots,S_{(i-1)}$是 S_i 的下层状态,称 $S_{i+1},S_{i+2},\ldots,S_k$ 是 S_i 的上层状态.

设$\Sigma D=(S,E)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$的超图,C 是ΣD 的邻接矩阵,设 S 中含有 n 个状态,它们是 $s_1,s_2,\ldots,s_n$,x 是所有的非目标状态的个数,设 $s_{x+1},s_{x+2},\ldots,s_n$ 是所有的目标状态,C 是ΣD 的邻接矩阵.对 $s_1,s_2,\ldots,s_n$ 按 WZHFCQ 方法进行分层的算法如下:

function *fencengq*(C,S_0,S_g);
  $S_1:=S_g$;
  $B:=C$;
  for i=1 **to** x
    $z_i:=i$;
  next i;
  $w:=1$;
  $q:=x$;
  $SASA:=\varnothing$;
  repeat
    $w:=w+1$;
    $B:=B\times C$;
    $j:=0$;
    for i=1 **to** q
      if $b_{z_i(x+1)}+b_{z_i(x+2)}+\ldots+b_{z_in}\neq 0$ and $(\exists a,a\in Act(s_{z_i}),\gamma(s_{z_i},a)\subseteq S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_{w-1})$ **then**
        $S_w:=S_w\cup\{s_{z_i}\}$;
        $SASA:=SASA\cup\{(s_{z_i},a)\}$;
      else
        $j:=j+1$;
        $a_j:=z_i$;
      fi;
    next i;
    $q:=j$;
    for i=1 **to** j
      $z_i:=a_j$;
    next j;
  until $S_w=\varnothing$;
  $w:=w-1$;
  $y:=1$;
  if $S_0\not\subseteq S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_w$ **then**
    $y:=0$;

```
    fi;
    return w,y,SASA,S1,S2,…,Sw;
end;
```

例 1:图 1 是一个不确定状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$.$P=(\Sigma,S_0,S_g)$是Σ上的一个规划问题,其中,$S_0=\{s_1\}$是初始状态集合,$S_g=\{s_{13},s_{14}\}$是目标状态集合,求按 WZHFCQ 方法进行分层后得到的各层的状态.

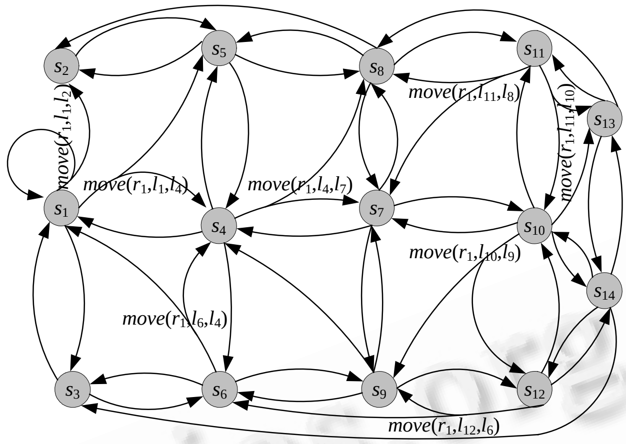

Fig.1 A nondeterministic state-transition system

图 1 一个不确定的状态转移系统

按 WZHFCQ 方法进行分层,将原不确定的状态转移系统中的状态分成了 6 层,它们是:$S_1=S_g=\{s_{13},s_{14}\}$;$S_2=\{s_{10},s_{12}\}$;$S_3=\{s_7,s_9,s_{11}\}$;$S_4=\{s_6,s_8\}$;$S_5=\{s_3,s_4,s_5\}$;$S_6=\{s_1,s_2\}$.

2.2 强规划问题中的状态被分层后的结论

定理 1. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$,如果 $S_0\not\subseteq S_1\cup S_2\cup\dots\cup S_k$,则 P 无强规划解;否则,P 有强规划解.

证明:如果 $S_0\not\subseteq S_1\cup S_2\cup\dots\cup S_k$,根据 WZHFCQ 分层方法可得 S_0 中至少存在一个状态,对这个状态无论通过什么样的状态转移都不能确保一定能够强到达目标状态.根据强规划解的定义,执行强规划解可以保证系统到达目标状态,所以原问题无强规划解.

如果 $S_0\subseteq S_1\cup S_2\cup\dots\cup S_k$,根据 WZHFCQ 分层方法和强规划解的定义可得原规划问题有强规划解. □

定理 2. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$,对 $S_1,S_2,\dots,S_k$ 中的任何一个状态集合 S_i,$\{(s,a):s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq S_i\}$中的任何一个状态动作序偶对是否存在强规划解没有影响,可以直接去掉.

证明:根据 WZHFCQ 分层方法,任何一个状态集合 S_i(第 i 层)中的状态 s 都可以通过一次状态转移,转移到它的下层状态,同一层的状态之间也可能存在状态转移.当状态 s 向下层转移时,通过一次状态转移可能转移到它的下一层状态,也可能转移到其他下层状态,也就是说,第 i 层的状态最多通过 $i-1$ 次状态转移就能确保可以到达目标状态.在求强规划解的过程中,当从某个初始状态已经转移到了第 i 层的某个状态 s 时,只需要再从状态 s 转移到目标状态就可以了.要求出从第 i 层的状态 s 转移到目标状态的动作序列,只需要首先将第 i 层状态 s 转移到它的下一层状态 S_{i-1} 中的状态,选中一个将第 i 层的状态 s 转移到它的下层状态的动作 a,执行动作 a,由于动作的不确定性,执行动作 a 后有可能将状态 s 转移到它的下一层状态,也可能将状态 s 转移到它的下几层状态,但肯定是下层状态.假设状态 s 执行动作 a 后到达它的下层中的某个状态 s_1,我们只需要再将状态 s_1 转移到目

标状态就可以了.所以,可以不使用第 i 层状态之间的状态转移,即原结论成立. □

定理 3. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$,对 $S_1,S_2,\dots,S_k$ 中的任何一个状态集合 $S_i(2\le i\le k)$,$\{(s,a):s\in S_i,\gamma(s,a)\not\subseteq(S_1\cup S_2\cup\dots\cup S_{i-1})\}$中的任何一个状态动作序偶对是否存在强规划解没有影响,可以直接去掉.

证明:根据 WZHFCQ 分层方法,任何一个状态集合 S_i 中的状态 s 都可以通过一次状态转移,转移到它的下层状态,某一层的状态到它的上层状态也可能存在状态转移,同一层的状态之间也可能存在状态转移.当状态 s 向其下层转移时,通过一次状态转移可能转移到它的下一层状态,也可能转移到其他下层状态,第 i 层的状态最多通过 $i-1$ 次状态转移就可以到达目标状态.根据定理 2 的证明过程可得:在求强规划解的过程中,没有必要将第 i 层的状态转移到它的上层状态,根据定理 2,同一层状态之间的状态转移也可以去掉,所以原结论成立. □

定理 4. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$,如果在全部状态动作序偶中存在强规划解,则在全部状态动作序偶的子集$\{(s,a):s\in S_2,\gamma(s,a)\cap S_1\ne\varnothing\}\cup\dots\cup\{(s,a):s\in S_k,\gamma(s,a)\cap S_{k-1}\ne\varnothing\}$中也存在强规划解.

证明:根据 WZHFCQ 分层方法,在 $S_1,S_2,\dots,S_k$ 中,只有以下 4 种状态转移:

① $\{a:s\in S_i,\gamma(s,a)\cap S_{i-1}\ne\varnothing\}$;

② $\{a:s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq S_i\}$;

③ $\{a:s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq\{S_{i+1}\cup S_{i+2}\cup\dots\cup S_k\}\}$;

④ $\{a:s\in S_i,\gamma(s,a)\cap S_i\ne\varnothing,\gamma(s,a)\cap\{S_{i+1}\cup S_{i+2}\cup\dots\cup S_k\}\ne\varnothing,\gamma(s,a)\subseteq\{S_i\cup S_{i+1}\cup\dots\cup S_k\}\}$.

根据定理 2 和定理 3,第②~④种中的任何一个状态动作序偶都可以直接去掉,所以原结论成立. □

设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一求强规划解的问题,对其中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后,得到了层与层之间的状态转移关系,可以去掉大量的不必要的状态转移关系.根据定理 1 就可以快速给出是否有强规划解;如果有强规划解,则可以根据定理 2~定理 4 直接去掉很多状态动作序偶,从而减少问题规模,提高求强规划解的效率.

例 2:求例 1 中规划问题的强规划.

由例 1 可得:按 WZHFCQ 方法进行分层,将原不确定的状态转移系统中的状态分成了 6 层,它们是:$S_1=S_g=\{s_{13},s_{14}\}$,$S_2=\{s_{10},s_{12}\}$,$S_3=\{s_7,s_9,s_{11}\}$,$S_4=\{s_6,s_8\}$,$S_5=\{s_3,s_4,s_5\}$,$S_6=\{s_1,s_2\}$.根据定理 1,$S_0=\{s_1\}\subseteq S_6$,所以原问题有强规划解.根据定理 2~定理 4 可以将同层之间的状态动作序偶去掉,下层向上层转移的状态动作序偶去掉,这样原图 1 的不确定状态转移系统变为了下面图 2 所示的不确定状态转移系统.

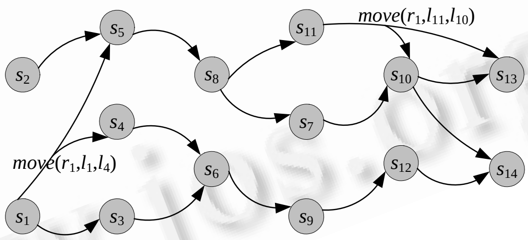

Fig.2 A nondeterministic state-transition system, it is a variation of the example in Fig.1

图 2 一个不确定的状态转移系统,它由图 1 变化而来

根据图 2 得到原规划问题的强规划解为

$$\pi=\{(s_1,move(r_1,l_1,l_3)),(s_3,move(r_1,l_3,l_6)),(s_6,move(r_1,l_6,l_9)),(s_9,move(r_1,l_9,l_{12})),(s_{12},move(r_1,l_{12},l_{14}))\}.$$

3 弱规划问题中的状态分层

根据弱规划解的定义,执行弱规划解仅仅可以让系统有可能到达目标状态.一个状态动作序偶表π是规划

问题 P 的弱规划解,当且仅当对于初始状态集 S_0 中的任意状态 s 都存在一个目标状态 s',使得 s' 是 $\Sigma_\pi(\Sigma_\pi=(Q,T)$ 是 π 从 S_0 导出的执行结构)的终止状态且 s' 是 s 可达的.

定义 11. 在一个规划问题中,一个状态有可能到达目标状态,称这个状态弱到达目标状态.

3.1 弱规划问题中的状态分层方法

设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$ 是一个不确定的状态转移系统 $\Sigma=(S,A,\gamma)$ 上的一个规划问题,其中,S_0 是初始状态集,S_g 是目标状态集.在这个不确定的状态转移系统中,一个状态能否弱到达目标状态或最少要通过多少次状态转移才能弱到达目标状态,可以通过不确定状态转移系统的超图的邻接矩阵方便地求出来.我们首先设计算法对状态进行分层,分层原则是将弱到达目标状态所需要的最少的状态转移次数相同的状态放在同一层.

对求弱规划解的问题的状态按以下 WZHFCR 方法进行分层:

(1) 所有的目标状态为第 1 层,$S_1=S_g$;$S=S-S_1$;

(2) $S_2=\{s:s\in S,\exists a,\gamma(s,a)\cap S_1\neq\varnothing\}$ 为第 2 层;

(3) $S_i=\{s:s\in S,\exists a,\gamma(s,a)\cap S_{i-1}\neq\varnothing\}$ 为第 i 层($i\geq 2$);

(4) 如果 $S_i\neq\varnothing$,令 $S=S-S_i$,进一步分第 i+1 层.

如果在分到第 j 层时 $S_j=\varnothing$,则停止进一步分层,即分层结束,此时可得 $j-1$ 层状态.

通过利用不确定的状态转移系统的邻接矩阵,可以快速找到按 WZHFCR 方法进行分层的各层所拥有的状态.设 $\Sigma D=(S,E)$ 是一个不确定的状态转移系统 $\Sigma=(S,A,\gamma)$ 的超图,ΣD 含有 n 个顶点 $v_1,v_2,\ldots,v_n$,设目标状态 S_g 在 ΣD 中对应的顶点是 $v_k,v_{k+1},\ldots,v_n$,设 M 为 n 个顶点的超图 ΣD 的邻接矩阵,则 WZHFCR 分层算法如下:

(1) $S_1=S_g$

(2) 先根据邻接矩阵 M 计算出矩阵 $C,c_{ij}=m_{ij}(1\leq i\leq k-1,1\leq j\leq n),c_{ij}=0(k\leq i\leq n,1\leq j\leq n),B=C$

(3) **for** i=2 **to** n

  $S_i=\varnothing$

  $B=B\cdot C$

  for j=1 **to** $k-1$

    for $x=k$ **to** n

      if $b_{jx}=0$ **then next** x

      else $S_i=S_i\cup\{s_j\}$ **then next** j

  $S_i=S_i-(S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_{i-1})$

 next i

3.2 弱规划问题中的状态被分层后的结论

定理 5. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$ 是一个不确定的状态转移系统 $\Sigma=(S,A,\gamma)$ 上的一个规划问题.规划问题 P 是在 Σ 上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的弱规划解.对 P 中的状态按 WZHFCR 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\ldots,S_k$,如果 $S_0\not\subseteq S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_k$,则 P 无弱规划解;否则,P 有弱规划解.

证明:如果 $S_0\not\subseteq S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_k$,根据 WZHFCR 分层方法可得 S_0 中至少存在一个状态,对这个状态无论通过什么样的状态转移都不能弱到达目标状态.根据弱规划解的定义,原问题无弱规划解.

如果 $S_0\subseteq S_1\cup S_2\cup\ldots\cup S_k$,根据 WZHFCR 分层方法,对于 S_0 中的每一个状态,都可能在最多通过 k 次状态转移后弱到达目标状态.根据弱规划解的定义,原问题有弱规划解. □

定理 6. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$ 是一个不确定的状态转移系统 $\Sigma=(S,A,\gamma)$ 上的一个规划问题.规划问题 P 是在 Σ 上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的弱规划解.对 P 中的状态按 WZHFCR 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\ldots,S_k$,对 $S_1,S_2,\ldots,S_k$ 中的任何一个状态集合 S_i,$\{(s,a):s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq S_i\}$ 中的任何一个状态动作序偶对是否存在弱规划解没有影响,可以直接去掉.

证明:根据 WZHFCR 分层方法,任何一个状态集合 S_i 中的状态 s 都可以通过一次状态转移,转移到它的下一

层状态,同一层的状态之间也可能存在状态转移.当状态 s 向下层转移时,通过一次状态转移也仅仅能够转移到它的下一层状态,不能转移到其他下层状态,也就是说,第 i 层的状态最少需要 $i-1$ 次状态转移就可以弱到达目标状态,也能够通过 $i-1$ 次状态转移弱到达目标状态.在求弱规划解的过程中,当从初始状态已经转移到了第 i 层的状态时,只需要再将第 i 层的状态转移到目标状态就可以了.要求出从第 i 层的状态转移到目标状态的状态转移,只需要首先将第 i 层的状态转移到其下一层状态 S_{i-1} 中的状态,再将 S_{i-1} 中的相应的状态转移到目标状态就可以了.所以,可以不使用第 i 层的状态之间的状态转移,即原结论成立. □

定理 7. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的弱规划解.对 P 中的状态按 WZHFCR 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\ldots,S_k$,对 $S_1,S_2,\ldots,S_k$ 中的任何两个状态集合 $S_i,S_j(1\le i<j\le k)$,$\{(s,a):s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq S_j\}$中的任何一个状态动作序偶对是否存在弱规划解没有影响,可以直接去掉.

证明:根据 WZHFCR 分层方法,任何一个状态集合 S_i 中的状态 s 都可以通过一次状态转移,转移到它的下一层状态,某一层的状态到它的上层状态也可能存在状态转移.第 i 层的状态最少需要 $i-1$ 次状态转移就可以弱到达目标状态,也能够通过 $i-1$ 次状态转移弱到达目标状态.在求弱规划解的过程中,当从初始状态已经转移到了第 i 层状态时,只需要再找出从第 i 层状态转移到目标状态的转移方法就可以了.要求出从第 i 层状态转移到目标状态的状态转移,由定理 6 的证明过程可得:没有必要将第 i 层状态转移到它的上层状态,所以原结论成立. □

定理 8. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的弱规划解.对 P 中的状态按 WZHFCR 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\ldots,S_k$,如果在全部状态动作序偶中存在弱规划解,则在全部状态动作序偶的子集$\{(s,a):s\in S_2,\gamma(s,a)\cap S_1\ne\varnothing\}\cup\{(s,a):s\in S_3,\gamma(s,a)\cap S_2\ne\varnothing\}\cup\ldots\cup\{(s,a):s\in S_k,\gamma(s,a)\cap S_{k-1}\ne\varnothing\}$中也存在弱规划解.

证明:根据 WZHFCR 分层方法,任何一个状态集合 S_i 中的状态 s 都可以通过一次状态转移,转移到它的下一层状态.根据定理 6,第 i 层的状态最少需要 $i-1$ 次状态转移就可以弱到达目标状态,也能够通过 $i-1$ 次状态转移弱到达目标状态.在求弱规划解的过程中,当从初始状态已经转移到了第 i 层状态时,只需要再找出从第 i 层状态转移到目标状态的转移方法就可以了.根据定理 6 和定理 7,没有必要将第 i 层状态转移到它的上层状态或同层状态.所以原结论成立. □

4 用分层方法求强循环规划

设π是规划问题 P 的一个强循环规划解,$\Sigma_\pi=(Q,T)$是π从 S_0 所导出的执行结构.根据强循环规划解的定义,一个状态动作序偶表π是一个规划问题 P 的强循环规划解,当且仅当Σ_π中所有的终止状态都属于 S_g,并且对于 Q 中的任一状态 s 都存在Σ_π中的一个终止状态 s',使得 s' 是 s 可达的.执行强循环规划解可以保证系统在“公平”假设的条件下到达目标状态,所谓“公平”假设是指规划的执行过程最终会跳出(如果可能的话)循环的假设.

4.1 强循环规划问题中的状态被分层前的处理

设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题,其中,S_0 是初始状态集合,S_g 是目标状态集合.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强循环规划解.执行强循环规划解中的状态动作序偶在“公平”的假设下都是可以到达目标状态的,所以先去掉那些在“公平”的假设下执行后不能保证到达目标状态的状态动作序偶,QUDIAO 算法如下:

1. **function** *QUDIAO*(*UnivSA*,S_g);
2. *OldSA*:=∅;
3. *SA*:=*UnivSA*;
4. **while** (*OldSA*≠*SA*) **do**
5. *OldSA*:=*SA*;
6. *SA*:=*PRUNEUNCONNECTED*(*PRUNEOUTGOING*(*SA*,S_g),S_g);
7. **done**;

```
    return SA;
end;
```

```
function PRUNEUNCONNECTED(SA,Sg);
    NewSA:=∅;
    repeat
        OldSA:=NewSA;
        NewSA:=SA∩WEAKPREIMAGE(Sg∪STATESOF(NewSA));
    until (OldSA=NewSA);
    return NewSA;
end;
```

```
function PRUNEOUTGOING(SA,Sg);
    NewSA:=SA\COMPUTEOUTGOING(SA,Sg∪STATESOF(SA));
    return NewSA;
end;
```

其中,$UnivSA=\{(s,a):a\in A(s)\}$,它是由所有的状态动作序偶组成的集合;

$$WEAKPREIMAGE(S)=\{(s,a):\gamma(s,a)\cap S\neq\varnothing\};$$

$$COMPUTEOUTGOING(SA,S)=\{(s,a):(s,a)\in SA,\gamma(s,a)\not\subseteq S\}.$$

4.2 强循环规划问题中的状态分层的方法

在经过按第 4.1 节的方法处理后,对 P 中的状态按以下的 WZHFCQXH 方法进行分层:

(1) 按第 4.1 节的方法进行分层前的处理,$S=S_g\cup StateOf(SA)$;

(2) 如果 $S_0\not\subseteq S$,输出无强循环规划解,结束;否则,执行(3);

(3) 所有的目标状态为第 1 层,$S_1=S_g$;$S=S-S_1$;

(4) $S_2=\{s:s\in S,\exists a,\gamma(s,a)\cap S_1\neq\varnothing\}$为第 2 层;

(5) $S_i=\{s:s\in S,\exists a,\gamma(s,a)\cap S_{i-1}\neq\varnothing\}$为第 i 层($i\geq 2$);

(6) 如果 $S_i\neq\varnothing$,令 $S=S-S_i$,进一步分第 i+1 层.

如果在分到第 j 层时 $S_j=\varnothing$,则停止进一步分层,即分层结束,此时可得 j–1 层状态.

通过利用超图的邻接矩阵,可以快速找到按 WZHFCQXH 方法进行分层的各层所拥有的状态.

设$\Sigma D=(S,E)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$的超图,ΣD 含有 n 个顶点 $v_1,v_2,\ldots,v_n$,f 是初始状态中的状态的个数,x 是所有的非目标状态的个数.设初始状态 S_0 在ΣD 中对应的顶点是 $v_1,v_2,\ldots,v_f$,设目标状态 S_g 在ΣD 中对应的顶点是 $v_{x+1},v_{x+2},\ldots,v_n$,则 WZHFCQXH 分层方法的算法如下:

```
function fenceng(S0,Sg);
    QUDIAO(UnivSA,Sg);
    UnivSA:=SA;
    if (S0⊆(Sg∪STATESOF(SA))) then
        calculatejuzhen(SA,C);
        return jisuanceng(C,S0,Sg);
    else
        return Fail;
    fi;
end;
```

```
function jisuanceng(C,S0,Sg);
```

```
    S_1:=S_g;
    B:=C;
    for i=1 to x
      z_i:=i;
    next i;
    w:=1;
    q:=x;
    repeat
      w:=w+1;
      B:=B×C;
      j:=0;
      for i=1 to q
        if b_{z_i(x+1)} + b_{z_i(x+2)} + ... + b_{z_i n} ≠ 0  then
          S_w:=S_w∪{ s_{z_i} };
        else
          j:=j+1;
          a_j:=z_i;
        fi;
      next i;
      q:=j;
      for i=1 to j
        z_i:=a_j;
      next j;
    until S_w=∅;
    w:=w−1;
    return S_1,S_2,…,S_w;
end;
```

4.3 强循环规划问题中的状态被分层后的结论

定理 9. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强循环规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQXH 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\ldots,S_k$,对 $S_1,S_2,\ldots,S_k$ 中的任何一个状态集合 S_i,$\{(s,a):s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq\{S_i\cup S_{i+1}\cup\ldots\cup S_k\}$中的任何一个状态动作序偶对是否存在强循环规划解没有影响,可以直接去掉.

证明:根据 WZHFCQXH 分层方法,任何一个状态集合 S_i 中的状态 s 都可能通过一次状态转移,转移到它的下一层状态,同一层的状态之间也可能存在状态转移,下一层的状态到它的上层状态之间也可能存在状态转移.当状态 s 向其下层状态转移时,通过一次状态转移能够转移到它的下一层状态,不能转移到其他下层状态,也就是说,第 i 层的状态最少需要 $i-1$ 次状态转移就可以到达目标状态.在求强循环规划解的过程中,当从初始状态已经转移到了第 i 层的状态时,只需要再找出从第 i 层的状态转移到目标状态的转移方法就可以了,要求出从第 i 层的状态转移到目标状态的状态转移,只需要首先将第 i 层的状态转移到它的下一层状态 S_{i-1} 中的状态,再将 S_{i-1} 中的相应的状态转移到目标状态就可以了.由于动作的不确定性,在执行向下转移的动作时,有可能到达上层的状态,这样一来就可能形成循环.所以,可以不使用完全在第 i 层状态之间进行转移的状态转移,也可以不使用在第 i 层状态与其上层状态之间的状态转移,即原结论成立. □

定理 10. 设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题.规划问题 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强循环规划解.对这个求强循环规划解的问题的状态按照 WZHFCQXH 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$,对 $S_1,S_2,\dots,S_k$ 中的任何一个状态集合 $S_i(2\le i\le k)$,只有集合$\{(s,a):s\in S_i,\gamma(s,a)\cap S_{i-1}\ne\varnothing\}$中的状态动作序偶对是否存在强循环规划解有影响,要保留;其他状态动作序偶对是否存在强循环规划解没有影响,可以直接去掉.

证明:根据 WZHFCQXH 分层方法,在 $S_1,S_2,\dots,S_k$ 中,只有以下两种状态动作序偶:① $\{a:s\in S_i,\gamma(s,a)\cap S_{i-1}\ne\varnothing\}$; ② $\{a:s\in S_i,\gamma(s,a)\subseteq\{S_i\cup S_{i+1}\cup\dots\cup S_k\}$.根据定理 9,第②种情况中的任何一个状态动作序偶都可以直接去掉,所以原结论成立. □

5 扩展讨论

设 $P=(\Sigma,S_0,S_g)$是一个不确定的状态转移系统$\Sigma=(S,A,\gamma)$上的一个规划问题,其中,S_0 是初始状态集合,S_g 是目标状态集合.

(1) 如果 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的弱规划解,对 P 中的状态按 WZHFCR 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$,那么对每一个初始状态 s_{0x},选取一个向下一层转移的状态动作序偶(s_{0x},a),在 s_{0x} 的下一层选取一个状态 $s,s\in\gamma(s_{0x},a)$,在初始状态集中去掉 s_{0x},如果 s 是目标状态,从初始状态集中选择下一个状态;否则,将 s 加入初始状态集,从初始状态集中选择下一个状态,直到初始状态集为空集.此时,所有选出的状态动作序偶就是规划问题 P 的弱规划解.与之相应的算法和实验对比已经完成.

(2) 如果 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQ 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$.$S=S_2\cup S_3\cup\dots\cup S_k$,对每一个初始状态 s_{0x},在初始状态集中去掉 s_{0x},选取一个向下层转移的状态动作序偶(s_{0x},a),$S=S-\{s_{0x}\}$,对任意的状态 $s\in\gamma(s_{0x},a)\cap S$,将 s 加入初始状态集,从初始状态集中选择下一个状态,直到初始状态集为空集.此时,所有选出的状态动作序偶就是规划问题 P 的强规划解.与之相应的算法和实验对比已经完成.

(3) 如果 P 是在Σ上求从初始状态集合 S_0 出发到目标状态集合 S_g 的强循环规划解.对 P 中的状态按 WZHFCQXH 方法进行分层后得到 k 层状态,它们是 $S_1,S_2,\dots,S_k$.$S=S_2\cup S_3\cup\dots\cup S_k$,对每一个初始状态 s_{0x},在初始状态集中去掉 s_{0x},选取一个向下一层转移的状态动作序偶(s_{0x},a),$S=S-\{s_{0x}\}$,对任意的状态 $s\in\gamma(s_{0x},a)\cap S$,将 s 加入初始状态集,从初始状态集中选择下一个状态,直到初始状态集为空集.此时,所有选出的状态动作序偶就是规划问题 P 的强循环规划解.与之相应的算法和实验对比已经完成.

通过上面的分析,当规划问题 P 中的状态被分层以后,可以采用正向搜索技术求出规划解,所以,本文的将状态进行分层的方法,提供了对基于模型检测规划问题采用正向搜索技术求解的基础.

6 结束语

在基于模型检测的规划方法中定义了弱、强和强循环规划 3 种规划解,在找这 3 种规划解时,候选的动作越多,求解复杂度越高.按本文设计的方法对规划问题中的状态进行分层以后,可以将大量的状态动作序偶直接去掉,从而减少了问题规模,大幅度提高求规划解的效率.以往的对基于模型检测规划的研究都是采用从目标状态开始的反向搜索方法,在状态被分层以后可以采用正向搜索技术展开相应的研究.后续工作是将状态进行分层的方法用于规划器的设计中.本文的进一步工作主要有以下几个方面:

(1) 利用本文给出的状态被分层后的性质与其他知识相结合建立启发式函数,设计在不确定状态转移系统中求弱、强和强循环规划解的启发式算法.目前还没有关于弱、强和强循环规划解的启发式算法的成果.

(2) 将这一思想方法与 MBP 规划器相结合,设计出效益更好的规划器.

(3) 研究部分可观察下的状态的分层算法及分层以后的性质和结论.

References:

[1] Ghallab M, Nau D, Traverso P. Automated Planning Theory and Practice. Morgan Kaufmann Publishers, 2004.

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

[3] Yang Q, Wu KH, Jiang YF. Learning action models from plan examples using weighted Max-SAT. Artificial Intelligence, 2007, 171(2-3):107−143.

[4] Gil Y. Description logics and planning. AI Magazine, 2005,26(2):73−84.

[5] Cimatti A, Roveri M. Conformant planning via symbolic model checking. Journal of Artificial Intelligence Research, 2000,13: 305−338.

[6] Cimatti A, Pistore M, Rovveri M, Traverso P. Weak, strong, and strong cyclic planning via symbolic model checking. Artificial Intelligence, 2003,147(1-2):35−84.

[7] Huang W, Wen ZH, Jiang YF, Wu LH. Observation reduction for strong plans. In: Veloso MM, ed. Proc. of the 20th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2007). AAAI Press, 2007. 1930−1935.

[8] Cimatti A, Roveri M. Conformant planning via model checking and heuristic search. Artificial Intelligence, 2004,159(1-2): 127−206.

[9] Huang W, Wen ZH, Jiang YF, Chen AX. Comparison between two languages used to express planning goals: CTL and E_AG_{LE}. In: Yang Q, Webb G, eds. Proc. of the 9th Pacific Rim Int'l Conf. on Artificial Intelligence (PRICAI 2006). Berlin: Springer-Verlag, 2006. 180−189.

[10] Cimatti A, Roveri M, Traverso P. Automatic OBDD-based generation of universal plans in non-deterministic domains. In: Mostow J, Rich C, eds. Proc. of the 15th National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI'98). AAAI Press, 1998. 875−881.

[11] Daniele M, Traverso P, Vardi MY. Strong cyclic planning revisited. In: Biundo S, ed. Proc. of the 5th European Conf. on Planning (ECP'99). London: Springer-Verlag, 1999. 35−48.

[12] Bertoli P, Cimatti A, Roveri M, Traverso P. Strong planning under partial observability. Artificial Intelligence, 2006,170(4-5): 337−384.

[13] Bertoli P, Cimatti A, Roveri M, Traverso P. Planning in nondeterministic domains under partial observability via symbolic model checking. In: Nebel B, ed. Proc. of the 17th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2001). Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 473−478.

[14] Pistore M, Traverso P. Planning as model checking for extended goals in nondeterministic domains. In: Nebel B, ed. Proc. of the 17th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2001). Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 479−486.

[15] Rintanen J. Backward plan construction under partial observability. In: Ghallab M, Hertzberg J, Traverso P, eds. Proc. of the 6th Int'l Conf. on Artificial Intelligence Planning Systems (ICAPS 2002). AAAI Press, 2002. 173−182.

文中华(1966－),男,湖南安乡人,博士,副教授,主要研究领域为智能规划,图论及算法.

刘任任(1959－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为算法设计与分析,多值逻辑.

黄巍(1979－),男,博士,主要研究领域为智能规划.

姜云飞(1945－),男,教授,博士生导师,主要研究领域为智能规划,自动推理,模型诊断.