

利用规划命题关系图构建目标议程和宏动作^{*}

蒋志华¹, 饶东宁²⁺, 姜云飞³, 朱慧泉⁴

¹(暨南大学 计算机系, 广东 广州 510632)

²(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

³(中山大学 信息科学与技术学院 软件研究所, 广东 广州 510275)

⁴(School of Computing, National University of Singapore, Singapore 670527, Singapore)

Constructing Goal Agenda and Macro Actions Using Proposition Relation Graphs in Planning

JIANG Zhi-Hua¹, RAO Dong-Ning²⁺, JIANG Yun-Fei³, ZHU Hui-Quan⁴

¹(Department of Computer Science, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China)

²(Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

³(Software Research Institute, School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

⁴(School of Computing, National University of Singapore, Singapore 670527, Singapore)

+ Corresponding author: E-mail: raodn@gdut.edu.cn

Jiang ZH, Rao DN, Jiang YF, Zhu HQ. Constructing goal agenda and macro actions using proposition relation graphs in planning. Journal of Software, 2011, 22(1): 44-56. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3861.htm>

Abstract: This paper focuses on graph properties of relaxed planning graph (RPG), a widely-used tool in automated planning. When proposition levels are extracted from RPG, and thus, used to build a proposition relation graph (PRG), it is found that PRG keeps primary planning properties in RPG. Preliminary research results include the following four aspects: The close p th out-neighborhoods (CON) of initial proposition set (IPS) is the relaxed reachable proposition set (R-RPS) in planning; the maximum distance from any proposition in initial state to any proposition in goal states is a reasonable estimation of the plan length; acyclic order in graph indicates that some orders that held corresponding propositions are necessary; contraction of in/out cut-vertex means construction of macro-action is currently being planned. The first and second results show PRG keeps planning properties in RPG, and the third and fourth results can be used in goal agenda building and macro-action construction. Three related algorithms are proposed: PRG in RPG finding algorithm, an $O(mn^2/4)$ (n is the number of propositions in RPG, m is the number of actions in RPG) algorithm; acyclic order reduction algorithm, an $O(n+m)$ (n is the number of nodes in PRG, m is the number of edges in PRG) algorithm; macro action suggestion algorithm, an $O(n^2)$ (n is the number of nodes in PRG) algorithm.

Key words: AI planning; relaxed planning graph; proposition relation graph; goal agenda; macro action

摘 要: 对智能规划中的常用工具——放松式规划图(relaxed planning graph, 简称 RPG)的图论性质进行了深入研

* 基金项目: 国家自然科学基金(61003179, 60903178); 广东工业大学博士科研启动基金(093032); 中央高校基本科研业务费专项资金(21610305)

收稿时间: 2009-10-19; 定稿时间: 2010-04-27

究.将RPG中的命题层抽取出来,得到一个不包含任何动作的命题关系图(proposition relation graph,简称PRG),发现PRG仍具有RPG的主要规划性质.初步研究结果包括以下4个方面:初始命题集(initial proposition set,简称IPS)的闭出邻集(close out-neighborhoods,简称CON)是放松式规划可达命题集(relaxed reachable proposition set,简称R-RPS);初始状态命题到目标状态命题的最大距离是规划解长度的合理估计;无圈序指出了对应命题被实现的顺序要求;出度或入度为1的结点收缩对应规划中构造的宏动作.上述结果中,前两者说明PRG保留RPG的主要规划性质,后者可用于建立目标议程或宏动作提取等领域.还提出与上述结论相关的3种算法:从RPG中得到PRG的算法(复杂性为 $O(mn^2)$,其中, n 为RPG的命题数, m 为RPG的动作数);约简无圈序算法(复杂性为 $O(n+m)$,其中, n 为PRG的结点数, m 为PRG的边数);宏动作建议算法(复杂性为 $O(n^2)$, n 为PRG的结点数).

关键词: 智能规划;放松式规划图;命题关系图;目标议程;宏动作

中图法分类号: TP181 文献标识码: A

智能规划是人工智能的一个分支,也是近年来的研究热点^[1-4].图是规划常用工具,图规划^[5,6]是智能规划的基本方法之一,其中,规划图的扩展是多项式时间的,但规划图的搜索是PSPACE-complete的.放松式规划图(relaxed planning graph,简称RPG)^[7]是在规划图中忽略动作删除效果,以研究目标在哪个命题层可达,并估计最小规划长度.RPG分为偶数层的命题层和奇数层的动作层,是一个有向 N 部图,其复杂性阻碍了对其图论性质的进一步研究.在规划中被使用过的图还包括动作图^[8]、因果链图^[9]、控制集^[2]、超图^[10]等,但至今尚无对RPG中的命题关系图(proposition relation graph,简称PRG)的研究.从图论角度看,在RPG中进行目标可达性分析,实质是检测初始命题集(initial proposition set,简称IPS)的闭出邻集(close out-neighborhoods,简称CON)是否包括目标命题集(goal proposition set,简称GPS);最短放松规划解的长度是IPS到GPS的1/2距离(动作层数).因此,可在RPG中收缩动作层结点得到一个PRG,它能在不削弱上述规划意义的前提下简化RPG.

有鉴于此,本文初步研究RPG中的PRG,得到了4个方面的结果:一是PRG中IPS的CON是放松式规划可达命题集;二是PRG中IPS到GPS的距离是规划解长度的可采纳估计;三是PRG的无圈序指出了对应命题被实现的顺序要求,该要求可以被引入目标议程帮助规划求解;四是PRG中出度或入度为1的结点收缩对应规划中构造的宏动作,它们可以加速规划求解.其中,前两点说明PRG没有削弱RPG的规划意义,后两点是PRG带来的新结果.为从RPG中得到PRG,本文提出了复杂性为 $O(mn^2)$ (n 为RPG中命题数, m 为RPG中动作数)的算法;为约简无圈序以得到目标议程,提出了复杂性为 $O(n+m)$ (n 为PRG的结点数, m 为PRG的边数)的算法;为宏动作建议,提出了复杂性为 $O(n^2)$ (n 为PRG的结点数)的算法.

本文第1节介绍研究背景,包括智能规划的放松式规划图以及有向图的基本概念.第2节介绍如何找出RPG中的PRG.第3节介绍PRG保留了RPG的规划性质.第4节介绍PRG的无圈序指出对应命题被实现的顺序要求及其应用.第5节介绍RPG中PRG的出度或入度为1的结点收缩对应规划中的宏动作及其应用.第6节是本文的总结.此外,本文的缩写名称较多,在附录给出缩写及全名的对照表.

1 研究背景

1.1 智能规划中的放松式规划图

智能规划^[11]是人工智能规划的一个分支.下面先简单介绍一下经典规划领域、问题和解的形式化定义.

定义1(规划领域). 设 $L=\{p_1, \dots, p_n\}$ 是有限的谓词符号集合.经典规划领域是一个三元组 $\Sigma=(S, A, X)$:

- S 是状态集合, $S \subseteq 2^L$;
- A 是动作集合, $A = \{a | a = \langle pre(a), add(a), del(a) \rangle\}$. $pre(a)$ 是动作 a 的前提集合, $add(a)$ 是动作 a 的增加效果集合, $del(a)$ 是动作 a 的删除效果集合;
- X 是转换函数, $X(s, a) = (s - del(a)) \cup add(a)$, 当 a 在 s 中是可应用的.

规划是对动作进行推理的过程.在这个过程中,人们需要首先预期各种动作的效果,然后制定一个可以满足

某个规划目标的动作执行策略.给定一个状态 s ,如果某个动作 a 的前提集合在 s 中全部成立,则称动作 a 在状态 s 中是可应用的.将动作 a 应用到 s 中将产生后继状态 $s'=X(s,a)$.

定义 2(规划问题). 一个经典规划问题是一个三元组 $\Pi=(\Sigma,I,G)$:

- $\Sigma=(S,A,X)$ 是规划领域描述;
- I 是初始状态;
- G 是目标状态.

一个规划领域可以对应多个具体的规划问题,这些规划问题的区别在于初始状态和目标状态的不同.

定义 3(规划解). 规划问题 $\Pi=(\Sigma,I,G)$ 的解是一个动作序列 $\langle a_1,a_2,\dots,a_n \rangle$,该动作序列通过一系列的状态变换 $\langle s_0,s_1,s_2,\dots,s_n \rangle$ 将初始状态 I 转化为目标状态 G :

- $s_0=I$;
- $pre(a_i) \subseteq s_{i-1}, s_i=X(s_{i-1},a_i), 1 \leq i \leq n$;
- $G \subseteq s_n$.

图规划是在规划图上实现的.规划图是一个具有两类结点和 3 类边的有向分层图.规划图各层是命题层和动作层交替出现的,命题层包含命题结点,动作层包含动作结点.规划图的第 1 层是命题层,包括规划问题初始条件下的所有命题.图规划在两个阶段交替进行:图扩展(graph expansion)和解提取(solution extraction).图扩展阶段将所有可用于当前命题层的动作组合成当前动作层,将动作的效果加入命题层形成下一命题层,如此正方向地扩展规划图,直到目标状态的所有命题都出现为止.解提取阶段则反向搜索规划图,逐层寻找能够实现目标命题的动作,直至最后到达初始状态以求出规划解.规划图包括前提边(precondition edges)、增加效果边(add-effect edges)和删除效果边(del-effect edges)这三类边.在如图 1 所示的规划图中,黑圆点代表命题结点,空白方框代表动作结点,命题结点与动作结点之间的连线表示相应的边.

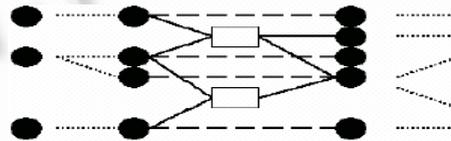


Fig.1 Nodes and edges in a planning graph
图 1 规划图中的结点和边

图规划解提取效率低,因此,更高效的 FF(fast forward)规划器^[7]仅用 RPG 作为基础启发式.可以证明,规划图的扩展是多项式时间的,但规划图搜索是 PSPACE-complete 的.为了提高求解效率,FF 规划器用在 RPG 上得到的放松式规划解作为候选状态的估值,用爬山法结合目标议程(goal agenda)求解.目标议程是用静态分析等手段对可能的目标序进行分析,以将多个目标分组并要求规划器按照这些分组进行增量规划(incremental planning,即已实现目标必被保持为真).FF 中的 RPG 是在规划图中忽略删除效果.RPG 中命题层包含命题结点,动作层包含动作结点,但边集只包括前提边和增加效果边,不包含删除效果边.规划图中,仅与删除效果边关联的结点不在 RPG 中.FF 规划器在 IPC-2(Int'l Planning Competition 2000,2000 年国际规划大赛)和 IPC-3(2002)上都取得了最好的成绩,证明了 RPG 作为启发信息的巨大作用.

1.2 有向图基本概念

以下定义均取自有向图的专著^[12].

定义 4(图). 图 G 是有序三元组 $(V(G),E(G),\Psi_G)$,其中, $V(G)$ 是非空顶点集合, $E(G)$ 是和 $V(G)$ 不相交的边集合, Ψ_G 则是联系 G 中的边和一对顶点之间的关联函数.若 e 是 G 中的一条边,而 u 和 v 是 G 中的顶点,满足 $\Psi_G(e)=uv$,则称 e 是连接 u 和 v 的边; u 及 v 和 e 相关联,顶点 u 和 v 称为 e 的端点.在有向图中,一般用 V 表示顶点集合,用 A 表示边集.

与无序顶点 (v,u) 相关联的边称为无向边,与有序顶点 (v,u) 相关联的边称为有向边.每条边都是无向边的图,

称为无向图;每条边都是有向边的图,称为有向图.关联于同一个顶点的边称为自回路(环).联结相同两个顶点的多于 1 条的无向边称为无向平行边;联结两个顶点之间的多于 1 条且方向相同的有向边称为有向平行边.不包含平行边和自回路的图称为简单图.具有平行弧和自环的图称为有向伪图.无自环的有向伪图称为有向多重图.

定义 5(邻集). 设 $D=(V,A)$ 是有向伪图,对 D 的一个顶点 v ,定义集合: $N_D^+(v)=\{u \in V-v:vu \in A\}$, $N_D^-(v)=\{w \in V-v:vw \in A\}$,分别称集合 $N_D^+(v)$, $N_D^-(v)$ 以及集合 $N_D(v)=N_D^+(v) \cup N_D^-(v)$ 为顶点 v 的出邻集、入邻集和邻集.

设 W 是顶点集合,令 $N_D^0(W)=W$, $N_D^{+1}(W)=N_D^+(W)=\bigcup_{w \in W} N_D^+(w)-W$ 和 $N_D^{-1}(W)=N_D^-(W)=\bigcup_{w \in W} N_D^-(w)-W$. 对于每一个正整数 p ,定义 W 的第 p 个出邻集为 $N_D^{+p}(W)=N_D^+(N_D^{+(p-1)}(W))-\bigcup_{i=0}^{p-1} N_D^{+i}(W)$. 类似地, W 的第 p 个入邻集为 $N_D^{-p}(W)=N_D^-(N_D^{-(p-1)}(W))-\bigcup_{i=0}^{p-1} N_D^{-i}(W)$. 有时也称 $N_D^{+p}(W)$ 和 $N_D^{-p}(W)$ 为开出邻集和开入邻集,并定义 D 的顶点集合 W 的第 p 个闭入邻集和闭出邻集为 $N_D^0[W]=W$, $N_D^{+p}[W]=\bigcup_{i=0}^p N_D^{+i}(W)$ 和 $N_D^{-p}[W]=\bigcup_{i=0}^p N_D^{-i}(W)$.

例如,在如图 2 所示的有向图 D 中,集合 $W=\{a,b\}$ 的出邻集为 $N^+(\{a,b\})=\{f,g\}$, $N^{+2}(\{a,b\})=\{e\}$, 闭出邻集为 $N^+[\{a,b\}]=\{a,b,f,g\}$, $N^{+2}[\{a,b\}]=\{a,b,e,f,g\}$.

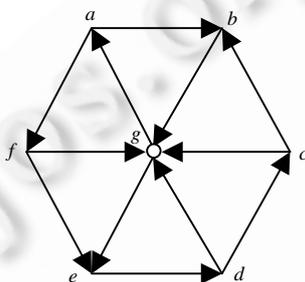


Fig.2 Example for neighbourhood set

图 2 邻集的例子

有向图中任意一对顶点间至少有一个顶点可达另一顶点是单侧连通;任何一对顶点都相互可达是强连通. 有向伪图中的一条途径(walk)是一个由顶点 x_i 和弧 a_j 交错排列的序列 W ,其中, $W=x_1a_1x_2a_2...x_{k-1}a_{k-1}x_k$, 使对 $i=1,2,...,k-1$, W 中弧 a_i 的尾是顶点 x_i ,头是顶点 x_{i+1} . W 的长度是其所含弧的数目 $k-1$. 如果一条途径 W 中的任何两条弧是不相同的,则称 W 为迹(trail);如果一条迹 W 中的任意两个顶点是互不相同的,则称 W 为路(path).

定义 6(距离). 对于有向图 D 的顶点 x 和 y ,若顶点 y 从顶点 x 是可达的,则从 x 到 y 的距离 $dist(x,y)$ 是从 x 到 y 的最短路径,否则记 $dist(x,y)=\infty$. 从顶点集 X 到另一个顶点集 Y 之间的距离定义为 $dist(X,Y)=\max\{dist(x,y): x \in X, y \in Y\}$.

起点和终点重合的通路称为回路(圈),即如果在一条路 $W=x_1a_1x_2a_2...x_{k-1}a_{k-1}x_k$ 中有 $x_1=x_k$,则称 W 是一个圈.

定义 7(无圈图). 如果有向图不含任何圈,则说它是无圈的.

引理 1(无圈图性质 1). 任何一个无圈有向图有一个零入度的顶点和一个零出度的顶点.

引理 2(无圈图性质 2). 任何一个无圈有向图含有顶点的一个无圈序.

上述两个性质可以在有向图的专著^[12]中找到证明.

在无向图 $G=(V(G),E(G),\psi(G))$ 中,与顶点 $v \in V(G)$ 关联的边数即为顶点度数 $deg(v)$ 或 $d(v)$;在有向图中,以 $v \in V$ 为起点的边的条数作为 v 的出度, $deg_-(v)$ 表示入度, $deg_+(v)$ 表示出度;以 $v \in V$ 为终点的边的条数作为 v 的入度,顶点 v 的出度和入度之和为度数.

定义 8(点集出入度). 子集合 $W \subseteq V$ 的出度(out-degree)(记为 $d_D^+(W)$)是全体尾在 W 中、头在集合 $V-W$ 中的弧的数目,即 $d_D^+(W)=|(W, V-W)_D|$;子集合 $W \subseteq V$ 的入度(in-degree)是 $d_D^-(W)=|(V-W, W)_D|$.

若有向图 H 是另一个有向图 D 的有向子图(subdigraph),则有 $V(H) \subseteq V(D)$ 和 $A(H) \subseteq A(D)$,且 $A(H)$ 的每一条弧的两个端点均在 $V(H)$ 中.若图 G 的顶点集可划分为两个非空子集 X 和 Y ,使得 X 中任何两顶点之间无边相连且 Y 中任何两顶点之间也无边相连,则称该图为二部图(偶图), (X, Y) 称为二部划分.可以据此进一步定义 N 部图.

定义 9(剖分与反剖分). 在有向多重图 D 中,一条弧 $\langle u, v \rangle$ 上的剖分(subdivision)运算用两条新弧 $\langle u, w \rangle$ 和 $\langle w, v \rangle$ 来取代旧弧 $\langle u, v \rangle$,其中, w 为新添加的顶点;反之,如果用新弧 $\langle u, v \rangle$ 取代两条旧弧 $\langle u, w \rangle$ 和 $\langle w, v \rangle$,则称为反剖分(rev-subdivision).

定义 10(孤立点删除). 有向多重图 D 中的孤立点删除是指用 D 的有向子图 H 替换 D ,其中, $V(H) = V(D) - W$ 且 $d_D^+(W) = d_D^-(W) = 0$.

2 RPG 中的 PRG

求 RPG 中的 PRG 是应用 PRG 研究规划性质的基础.下面分别讨论 RPG 中 PRG 的定义和意义、求解算法以及应用例子.

2.1 RPG 中的 PRG 的定义和意义

定义 11(RPG 中命题间的支持关系). 对于 RPG 中的两个命题 $p_1 \in L, p_2 \in L$,如果存在一个 RPG 中的动作 $a \in A$ 使得 $p_1 \in pre(a), p_2 \in add(a)$,则称 p_1 支持 p_2 .

定义 12(RPG 中的 PRG). 放松式规划图 RPG 中的命题关系图 PRG 是以 RPG 中出现的命题为结点、以命题之间的支持关系为边的有向图.

PRG 与 RPG 最大的不同是 PRG 中没有动作结点,而目前使用 RPG 进行的规划研究中恰恰没有使用到动作结点.因此,使用 RPG 中的 PRG 来代替 RPG 本身进行规划性质研究理论是可行的.具体来说,目前对 RPG 的性质研究主要集中在目标可达性分析和最小规划长度估值上.由于目标是命题集,它只能出现在命题层,而可达层数一定是奇数.实际上,目标在命题层 S_i 是否可达,可以通过向量组 $\langle (i-1)/2, S_i \rangle$ 来进行分析(i 是奇数且 $1 \leq i \leq n, n$ 是 RPG 最终扩展的总层数,也是奇数).如果 $GPS \subseteq S_i$ 即表示目标集可达,且 $(i-1)/2$ 是到达此目标集的最小规划长度,因此,仅保留 RPG 中的命题层就可以满足目前的研究需求. S_i 实质上是初始命题集 IPS 的第 $(i-1)/2$ 个闭出邻集,因此,去除动作层而得到的 PRG 是满足研究需要的最简图.

2.2 求 RPG 中的 PRG 算法

为了简化描述,这里定义的收缩概念与一般图论中的略有区别,本文以下部分所说的收缩均指定义 13.

定义 13(收缩). 对有向图 D 的一个顶点子集 W 首先进行反剖分,然后进行孤立点删除,称为有向图的收缩.

求 RPG 中 PRG 的过程是:首先,对不包含空动作的 RPG 收缩动作层结点;然后,合并不同命题层中相同命题(结点);最后,去掉自环.整体算法见算法 1(如图 3 所示),收缩动作层结点见算法 2(如图 4 所示),合并命题结点见算法 3(如图 5 所示).

Algorithm 1. PRG finding.

Input: RPG $D(V_D, A_D); n$, the total layer number of D ;

Output: PRG $G(V_G, A_G); \langle k, S_i \rangle$ (i is an odd number and $1 \leq i \leq n; k = (i-1)/2$).

Begin

1. Remove all empty actions and their related edges from D ;

2. Get $\langle k, S_i \rangle$ from D ;

3. If $n \geq 3$ then

4. Call algorithm 2 (action layer contraction algorithm) for the last three layers of D , and get D' ;

5. Call algorithm 3 (proposition node reduction algorithm), and get D'' ;

6. return D'' as G ;

End

Fig.3 Overall algorithm for finding PRG

图 3 求 RPG 中 PRG 的整体算法

在算法 1 中,如果 RPG 的总层数 $n=1$,则表示目标集在初始状态全部成立,没有动作层可以收缩,此时的 PRG

是全部由孤立点组成的图.如果 $n \geq 3$,则只需对 RPG 的最后 3 层调用动作层收缩算法.这是由于 RPG 中没有删除效果,因此最后的动作层包含了前面出现的所有动作,也即最后两层命题层之间包括了前面出现的所有支持关系以及只在最后才出现的支持关系.所以,RPG 中的所有支持关系都可以在最后 3 层找到,仅需这些层就可以构建 PRG.另外,在 Step 2 中保留了向量组 $\langle k, S_i \rangle$,它是 IPS 的 CON,具体作用将会在后面两节加以介绍.

Algorithm 2. Action layer contraction algorithm.

Input: RPG $D(V_D, A_D)$;

Output: PRG $D(V_D, A_D)$.

Begin

1. For every node v in the action layer in D
 2. {For every precondition edge $\langle v', v \rangle$
 3. For every add-effect edge $\langle v, v'' \rangle$
 4. add $\langle v', v'' \rangle$ (if not exist) into D ;
 5. Remove v and all of its precondition edges and add-effect edges from D ;}
 6. return D ;
- End

Fig.4 Algorithm for action layer contraction

图 4 动作层收缩算法

Algorithm 3. Proposition node reduction algorithm.

Input: PRG $D(V_D, A_D)$;

Output: PRG $D(V_D, A_D)$.

Begin

1. Put V_D with an increment layer order into a node list NL ;
 2. For every node v in NL
 3. For every node v' in NL
 4. If v and v' are corresponding to the same proposition then
 5. {For every edge $\langle v', v'' \rangle$, first add an edge $\langle v, v'' \rangle$ (if not exist and $v \neq v''$) into D , then remove $\langle v', v'' \rangle$ from D ;
 6. For every edge $\langle v'', v' \rangle$, first add an edge $\langle v'', v \rangle$ (if not exist and $v \neq v''$) into D , then remove $\langle v'', v' \rangle$ from D ;
 7. Remove v' from D and NL ;}
 8. return D ;
- End

Fig.5 Algorithm for proposition node reduction

图 5 命题结点约简算法

动作层收缩算法的过程是,对每个动作结点的入边和出边组合形成一条新边,然后删除该动作结点及与之关联的边.

在收缩了动作层之后,同一个命题还可能在 RPG 中不同层对应着不同的结点,将对应相同命题的结点合并使得 RPG 图最简化.具体做法是,将重复出现的结点的所有边关联到第 1 次出现的结点,然后删除重复结点.

定理 1(算法 1 的正确性). 算法 1 能够从 RPG 生成 PRG.

证明:根据 RPG 中 PRG 的定义,需要证明:最终生成的图 D 中的结点对应 RPG 中出现的命题,边对应 RPG 中命题间的支持关系.

首先证明命题和结点之间的对应关系.首先,图 D 的所有结点均来自于 RPG;其次,由于 RPG 没有删除边,因此 RPG 中的所有命题一定出现在最后的命题层.算法 2 删除了所有动作结点,所以图 D 的所有结点都对应命题;最后,算法 3 进行了命题结点的合并,所以不同结点对应不同的命题.即 RPG 中的命题与图 D 中的结点一一对应.

再证明边与支持关系之间的对应关系.同样地,由于 RPG 没有删除边,RPG 中出现的所有动作一定出现在最后一个动作层.对于任意两个命题 $p_1 \in L$ 和 $p_2 \in L$ (对应的结点分别为 v' 和 v''),如果在最末动作层存在动作 $a \in A$ (对应结点为 v)使得 $p_1 \in \text{pre}(a)$ 且 $p_2 \in \text{add}(a)$,则 p_1 和 p_2 之间存在支持关系.根据算法 2,会删除效果边 $\langle v, v'' \rangle$ 和前提边 $\langle v', v \rangle$,增加支持边 $\langle v', v'' \rangle$ 以表示支持关系.即 RPG 中的命题支持关系与图 D 中的边一一对应.证毕. \square

定理 2(算法 1 的复杂性). 设 RPG 中包含 n 个命题, m 个动作, k 个动作层,则算法 1 的复杂性为 $O(mn^2)$.

证明:由于算法 1 是串行执行的,因此其复杂性取决于复杂性最高的一步.若 RPG 中包含 n 个命题,则最后一层命题层包含 n 个命题结点,且每层命题层的结点数不超过 n ;同样地,若 RPG 中包含 m 个动作,则最后一层动作

层包含 m 个动作结点,且每层动作层的结点数不超过 m .根据已知条件,RPG 中共有 k 个动作层和 $k+1$ 个命题层.

Step 1. 移除所有空动作,由于每个动作层中的空动作数取决于上一层命题层的命题数,因此该步骤的复杂性为 $O(kn)$;

Step 2. 保存用来判断目标可达性的向量组 $\langle k, S_i \rangle$, 复杂性为 $O((k+1)n)=O(kn)$;

Step 3~Step 4. 调用算法 2,其复杂性为该子算法的复杂性.根据规划领域的封闭世界假定,每个动作的增加效果不包括其前提,因此前提边数(设为 a)和效果边数(设为 b)的和不超过总命题数 n .前提和效果的组合数 $ab \leq a(n-a) \leq n^2/4$,并且动作数不超过 m ,因此算法 2 的复杂性是 $O(mn^2)$;

Step 5. 调用算法 3,其复杂性为该子算法的复杂性.虽然算法 3 的 Step 2~Step 3 是一个 n^2 次的循环,但是 Step 5~Step 7 仅对对应相同命题的两个结点执行,这样的结点对最多有 n 个.每个结点最多涉及 n 个支持关系,因此算法 3 的复杂性为 $O(n^2)$;

Step 6 的复杂性为 $O(1)$.

另一方面,RPG 扩展的每一层一定会有新的动作或者命题,因此 $k < \max(n, m)$, 于是有 $k < mn$.

综上,算法 1 的复杂性为 $O(mn^2)$.证毕. □

2.3 例子

例 1:设某规划问题的描述如图 6 所示,动作模型在 Domain.pddl 文件中给出,问题模型在 Problem.pddl 文件中给出.其中以“P”开头的标识符表示命题,共有 4 个动作 A,B,C,E;“NOT”表示删除效果(领域和问题来自文献[13]).

例 1 的从初始状态到目标状态的放宽式规划图如图 7 所示(为减少篇幅,已省去空动作).

```

Domain.pddl:
...
Action A
Precondition: P1
Effect: P4, NOT P1

Action B
Precondition: P2
Effect: P5, P6

Action C
Precondition: P4
Effect: P7

Action E
Precondition: P4
Effect: P8, NOT P4
...

Problem.pddl:
Initial: P1, P2, P3
Goal: P7

```

Fig.6 Part of Domain.pddl and Problem.pddl
图 6 领域描述和问题描述的部分内容

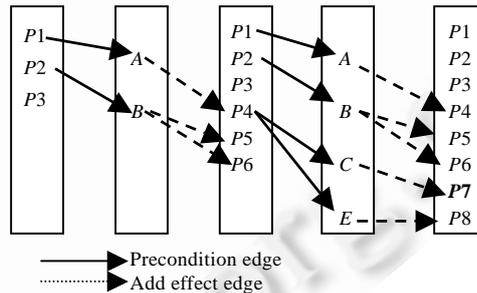


Fig.7 RPG for Example 1
图 7 例 1 的放宽式规划图

对图 7 中的 RPG 使用算法 2,得到如图 8 所示的 PRG.这里沿用规划领域的习惯^[9,14],称具有支持关系的命题结点间的边为因果链边(casual link edge).这里得到 IPS 的 CON 向量组为 $\langle 0, S_1 \rangle$ 中 $S_1 = \{P1, P2, P3\}$; $\langle 1, S_3 \rangle$ 中 $S_3 = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6\}$; $\langle 2, S_5 \rangle$ 中 $S_5 = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8\}$; 经过算法 3 处理后,得到图 9,它就是例 1 的 PRG,其中无自环.

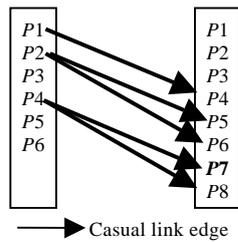


Fig.8 Result of Fig.7 using Algorithm 2

图8 图7在使用了算法2后的结果

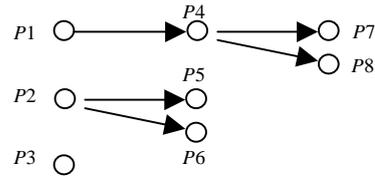


Fig.9 Result of Fig.8 using Algorithm 3

图9 图8在使用了算法3后的结果

3 PRG 保留了 RPG 的规划性质

PRG 中,IPS 的 CON 是规划可达命题集,可以通过求 IPS 的 CON 来判断 GPS 是否可达;IPS 到 GPS 的距离是规划解长度的可采纳估计,这个估计可以通过最短路算法求得.考虑到目前规划领域对 RPG 的应用就是分析 GPS 可达和得到规划解长度的可采纳估计,这两个结果实际上说明了 PRG 保留了 RPG 的规划性质.下面分别讨论 IPS 的 CON 的意义、IPS 到 GPS 的距离的意义,包括求解算法以及应用例子.

3.1 IPS的CON意义

规划中一般认为对初始状态应用 0 或多个可应用动作后得到的状态为可达状态,所有可达状态的命题组成了可达命题集.可以进一步定义放松式规划 n 可达命题集:

定义 14(放松式规划 n 可达命题集 n -R-RPS). 对初始状态依次应用 n 个可应用的无冲突动作集合得到的状态称为规划 n 可达命题集,简称 n -R-RPS(reachable proposition set).

定义 15(放松式规划可达命题集 R-RPS). 规划的可达命题集 R-RPS 是 n -R-RPS 的不动点,即存在某个非负整数 k ,使得 k -R-RPS= $(k+1)$ -R-RPS, i 为整数且 $i \geq 0$,则 R-RPS= k -R-RPS.

根据上述定义,再怎么增加动作也不会改变已有的命题集,则此命题集是放松式规划最终可达命题集.同样地,对于有向图 D 中的顶点子集 W ,如果存在某个非负整数 k ,使得 $N_D^{+k}[W]=N_D^{+(k+i)}[W]$, i 为整数且 $i \geq 0$,则 $N_D^{+k}[W]$ 称为 W 的闭出邻集 CON 的不动点.

定理 3. 将放松式规划问题中的命题映射为有向图 D 的顶点,将可应用动作的前提边和效果边映射为有向图 D 中的有向边,其中,前提命题对应起点且效果命题对应终点,则在有向图 D 中初始状态命题结点的第 n 个闭出邻集是放松式规划 n 可达命题集,其闭出邻集的不动点就是放松式规划可达命题集.

证明:采用将数学归纳法和构造方法相结合证明如下:

根据引理的构造过程,假设初始状态命题集 IPS 对应顶点子集 W ,那么 0-R-RPS 对应 $N_D^0[W]$.

假设对于 $0 \leq k$,有 k -R-RPS 对应 $N_D^{+k}[W]$,那么在 k -R-RPS 上每个可应用动作的一个前提和一个效果的组合就对应 $N_D^{+k}[W]$ (一个顶点子集)的一条出边.不失一般性,假设存在一个效果命题 eff 不在 k -R-RPS 中,那么构造顶点 w 和边 (v,w) , $w \notin N_D^{+k}[W]$ 且 $v \in N_D^{+k}[W]$.显然,点 w 对应于效果命题 eff ,且对于每个效果命题都可以构造这样对应的顶点.于是有 $(k+1)$ -R-RPS 对应 $N_D^{+(k+1)}[W]$.

进一步地,当随着 k 的增大, k -R-RPS 不再变化,即到达不动点, $N_D^{+k}[W]$ 中也不需要再构造新边,即也到达不动点.因此,IPS 的闭出邻集的不动点就是放松式规划可达命题集.证毕. \square

实际上,邻集是图论研究的重要工具,比如在旅行售货商^[15]等问题上就有着重要的应用.邻集最重要的性质就是转换,它可以从任意的集合中分离出来,并且在有限图中总会到达一个不动点.在规划研究当中,这种转换和最终到达的不动点都具有重要意义,即可达状态集合.如果要在有向图上直接求邻集,可以参考旅行售货商问题的指数邻集构造方法^[15],它给出了邻集结构和多项式可搜索邻集等定义以及各种邻集的算法及复杂性分析.

根据算法 1 的 Step 2 和定理 3,IPS 的 CON 已经求出,它就是原 RPG 上的第 n 层的命题集 n -R-RPS.

例 2(接例 1):由图 7 所示的 RPG 可以得到该规划问题的 IPS 的 CON 向量组为:

$\langle 0, S_1 \rangle$ 中 $S_1 = \{P1, P2, P3\}$;

$\langle 1, S_3 \rangle$ 中 $S_3 = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6\}$;

$\langle 2, S_5 \rangle$ 中 $S_5 = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8\}$.

可以使用迭代枚举的方法在如图 9 所示的 PRG 中得到集合 $W = \{P1, P2, P3\}$ 的闭出邻集:

$N_D^0[W] = \{P1, P2, P3\}$;

$N_D^1[W] = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6\}$;

$N_D^2[W] = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8\}$.

可以验证二者确实是一致的.

3.2 IPS到GPS的距离意义

PRG 的边对应命题间的支持关系,后者来自至少一个动作.于是,PRG 的路径对应一组动作序列,假设动作的其他前提也被满足,则它使一个状态转换到另一个状态.在同样的假设下,这组动作序列是放松式规划问题的规划解,也可以通过距离和邻集闭包的关系来加以说明.此外,在对状态的启发式估值中,如果估值不超过真实值,则此估值是可采纳的(admissible)

定理 4. IPS 到 GPS 的距离作为对规划问题解的长度估计是可采纳的.

证明:RPG 中,GPS 出现在 RPG 中的层数是对规划问题的可采纳的估计.

由于动作的其他前提也被满足地假设,因此 IPS 到 GPS 的距离小于等于 GPS 出现在 RPG 中的层数.

因此,IPS 到 GPS 的距离作为对规划问题解长度估计是可采纳的.证毕. \square

这里需要特别指出的是,上面说到 IPS 到 GPS 的距离小于等于 GPS 在 RPG 中出现的层数.但实际上,IPS 到 GPS 的距离等于 GPS 在 RPG 中出现的层数.这是因为:目标命题一旦出现,根据 RPG 的性质,就不会被删除,因此,G 中最后一个在 RPG 中出现的命题 p 所在的层数就是 IPS 到 GPS 的距离.所以,同样是可纳启发,本文认为,PRG 和 RPG 的启发能力是等价的.与 IPS 的 CON 一样,可以通过判断第 n 层的命题集 n -R-RPS 中是否包括 GPS 来进行距离估计,进而得到解长度的估计,这是 RPG 的经典用法.如果需要独立计算命题集之间的距离,可以使用图论中的最短路算法来寻找有向图中的距离,Cherkassky 等人给出了这类问题的理论及实际结果的综述^[16].

例 3:可以验证,在例 1 中($IPS = \{P1, P2, P3\}$, $GPS = \{P8\}$), $P1$ 到 $P8$ 的距离为 2, $P8$ 所在的 RPG 层数为 5(表示至少需要 2 层动作到达 GPS 所出现的命题层).也可以通过 $\langle 2, S_5 \rangle$ 中 $S_5 = \{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8\} \supseteq \{P8\}$ 得到这个估计.

4 无圈序

PRG 中结点的无圈序指出了对应命题被实现的顺序要求.下面分别讨论 PRG 中无圈序的意义、约简算法以及应用例子.

4.1 无圈序意义

由于 PRG 的边对应支持关系,再由支持关系的定义可知,PRG 中结点的无圈序指出了在最短的放松式规划解中对命题被实现的顺序要求.从图论的角度,无圈序的长度是起点到终点的距离,该距离对应最短的放松式规划解.

判断有向图是否有圈是 NP 完全的,但 Alon 等人^[17]设计了一种多项式算法在一定条件下对此进行判断.文献[12]中给出了一个复杂性为 $O(n+m)$ (n 为结点数, m 为边数)的 DFSA 算法,以求无圈有向图中的顶点无圈序.

除了引入目标议程帮助规划求解^[7]外,无圈序在基于角色的权限管理^[18]上也起着十分重要的作用,如何在实际应用中应用无圈序是未来的工作之一.

4.2 无圈序约简算法

根据引理 1 和引理 2,任何一个无圈有向图总有一个零入度的顶点和一个零出度的顶点,且含有顶点的一个无圈序.鉴于 PRG 的性质,显然,所有零入度的顶点都对应初始状态中的命题.

引理 3. 无圈有向图的子图仍然是无圈有向图.

引理 3 可以从无圈图和子图的定义直接得出.根据引理 1 和引理 3,可以进一步得到引理 4.

引理 4. 无圈有向图删除一个零出度的顶点后仍是无圈有向图,并且仍有一个零出度的顶点.

鉴于 PRG 的物理意义,如果一个零出度的顶点不对应 GPS 中的命题,那么它就没有启发作用.根据引理 4,可以对 PRG 一直约简,直到所有零出度的顶点都是目标命题.下面的算法 4(如图 10 所示)正是这样设计的.在经过约简之后,所有无圈序(可能会有多个)都对应一个命题序列,并且其第 1 个命题属于 IPS,最后一个命题属于 GPS.

算法 4 的正确性由引理 4 保证.在最坏情况下,算法 4 会删除所有边和几乎所有结点(比如初始状态包含目标状态),其复杂性为 $O(n+m)$,其中, n 为 PRG 的结点数,而 m 为 PRG 的边数.

Algorithm 4. Acyclic order reduction algorithm.
Input: PRG $D(V_D, A_D)$;
Output: PRG $D(V_{D'}, A_{D'})$.
 Begin
 1. While exists node v in V_D , $deg_+(v)=0$ and $v \notin GPS$ do
 2. { For every edge $\langle v'v \rangle$ in A_D remove $\langle v'v \rangle$;
 3. Remove v from V_D ;
 4. return D ;
 End

Fig.10 Algorithm for acyclic order reduction

图 10 无圈序约简算法

4.3 例子

例 4:图 9 经过约简后得到图 11.这说明,如果需要实现目标 $P8$ 必须先实现 $P4$.



Fig.11 Result of Fig.9 using Algorithm 4

图 11 图 9 在使用了算法 4 后的结果

5 出度或入度为 1 的结点

收缩 PRG 中出度或者入度为 1 的结点,可以产生规划中的宏动作,从而加速规划求解.下面分别讨论出度或入度为 1 的结点的意义、宏动作建议算法以及应用例子.

5.1 出度或入度为 1 的结点的意义

尽管原则上规划中的宏动作可以使用任意动作的组合,但由于组合爆炸,实际中往往采用一些增加效果和前提条件交叠的动作进行组合.仅将 PRG 中发现的必须连续执行的动作进行组合,可以控制组合爆炸的问题.具体地说,如果结点的出度为 1,表示存在着唯一的动作需要该结点对应的命题作为前提条件,则此动作可以与上一步动作组合成宏动作;如果结点的入度为 1,表示存在着唯一的动作需要该结点对应的命题作为效果,则此动作可以与下一步动作组合成宏动作.这样组合的宏动作数目较少,可以避免组合爆炸问题.另外,已有研究^[19]表明,短的宏动作是比较高效的.因此,下面的宏动作建议算法只给出长度为 2 的宏动作(长度是指其中包含的动作数).除用于加速求解^[19]外,宏动作也可用于目标之间的互斥分析^[20].

5.2 宏动作建议算法

算法 5(如图 12 所示)收缩出度或入度为 1 的结点,以给出宏动作建议.

Algorithm 5. Macro action suggestion algorithm.

Input: PRG $D(V_D, A_D)$;

Output: Macro action suggestions set $MASS = \{\langle a_{11}, a_{12} \rangle, \dots, \langle a_{m1}, a_{m2} \rangle\}$.

Begin

```

1. While exists node  $v$  in  $V_D$ , ( $deg_+(v)=1$  or  $deg_-(v)=1$ , and  $v \notin GPS \cup IPS$ ) do
2.   {   If  $deg_+(v)=1$ , suppose  $\langle vv'' \rangle \in A_D$ 
3.       {   For every edge  $\langle v'v \rangle$  in  $A_D$  add  $\langle v'v'' \rangle$ , remove  $\langle v'v \rangle$ ;
4.           Add actions corresponding to  $\langle v'v \rangle$ ,  $\langle vv'' \rangle$  into  $MASS$ ;
5.       }
6.   If  $deg_-(v)=1$ , suppose  $\langle v''v \rangle \in A_D$ 
7.       {   For every edge  $\langle vv' \rangle$  in  $A_D$  add  $\langle v''v' \rangle$ , remove  $\langle vv' \rangle$ ;
8.           Add actions corresponding to  $\langle v''v \rangle$ ,  $\langle vv' \rangle$  into  $MASS$ ;
9.       }
10.  Remove  $v$ ;
11.  return  $MASS$ ;
End

```

Fig.12 Algorithm for macro action suggestion

图 12 宏动作建议算法

因宏动作仅为建议,算法 5 的正确性不需要证明.在最坏情况下,算法 5 会对几乎所有结点(不在 IPS 或者 GPS 内的)都进行收缩,每次收缩最多 $n-1$ 条边(每个结点最多和另外 $n-1$ 个结点有边关联),其复杂性为 $O(n^2)$.其中, n 为 PRG 的结点数.

5.3 例子

例 5:在例 4 中,可以得到如下宏动作建议: (A, E) .

使用这个宏动作,显然可以一步得到解.

6 总结

本文对智能规划中的放松式规划图作了进一步研究,提出了放松式规划图中的命题关系图.在 RPG 中,收缩动作层结点得到一个 PRG,它能在不削弱规划意义的前提下简化 RPG.初步研究结果说明,PRG 的 IPS 的 CON 是放松式规划可达命题集,可以通过求 IPS 的 CON 来判断 GPS 是否可达;PRG 的 IPS 到 GPS 的距离是规划解长度的合理估计,这个估计可以通过最短路算法求得;PRG 的无圈序指出了对应命题被实现的顺序要求,该要求可以被引入目标议程帮助规划求解;PRG 的出度或入度为 1 的结点收缩对应规划中构造的宏动作,这些宏动作可以加速规划求解.其中,为从 RPG 中得到 PRG,本文提出了复杂性为 $O(mn^2)$ (n 为 RPG 中的命题数, m 为 RPG 中的动作数)的算法;为约简无圈序以得到目标议程和简化宏动作建议,提出了复杂性为 $O(n+m)$ (n 为 PRG 的结点数, m 为 PRG 的边数)的算法;本文还提出了复杂性为 $O(n^2)$ (n 为 PRG 的结点数)的宏动作建议算法.

下一步,本文准备从 3 个方面进一步加深研究:首先是进一步研究 PRG 的图论性质及其规划意义,如可对互斥的命题组进行类型分析^[21],进而构建类型(多值)对象^[22];其二是在无圈序的验证和规划应用方面寻找应用的突破口,以前在 RBAC 方面对图规划的应用^[18]就是一个可能的结合点;最后是对上面给出的目标议程和宏动作建议,找到一些合适的规划器(比如 Macro-FF^[19])对其进行实验.

将问题转换为相应的数学模型并利用该模型中已有的成果,是解决问题的捷径.这些数学问题已被深入加以研究,即便不能直接套用到应用问题上,其中也会有很多可以借鉴的方法.但是,目前使用的数学模型往往过于复杂,难以应用基础工具.因此,简化现实问题中的复杂图是应用更多的图论工具的基础.比如,图论作为一种重要的数学工具已经在规划中被广为采用^[5-9],其中,放松式规划图就是很有效的启发式方法^[7].但是,RPG 就是一个有向二部图,且其结点数可能是实际命题数和可用动作数的几十倍(假设 RPG 扩展了几十层).而经过简化的 RPG,即 PRG,却只有和实际命题数相当的结点数,这就为最短路算法等图论工具提供了应用的平台.

致谢 感谢姜定俊教授对此文的讨论.

References:

- [1] Jiang ZH, Jiang YF. An improved method for calculating activation sets of action derived preconditions. *Chinese Journal of Computers*, 2007,29(12):2061–2073 (in Chinese with English abstract).
- [2] Rao DN, Jiang ZH, Jiang YF, Zhu HQ. Further research on observation reduction in non-deterministic planning. *Journal of Software*, 2009,20(5):1254–1268 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3453.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03453]
- [3] Rao DN, Jiang ZH, Jiang YF, Wu KH. Learning non-deterministic action models for Web services from WSBPEL programs. *Journal of Computer Research and Development*, 2010,47(3):445–454 (in Chinese with English abstract).
- [4] Rao DN, Jiang ZH, Jiang YF, Liu Q. Learning first-order rules for derived predicates from plan examples. *Chinese Journal of Computers*, 2010,33(2):251–266 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.00251]
- [5] Chen AX, Jiang YF, Zhang XN, Liu GY. GP: Genetic planning algorithm based on planning graph. *Chinese Journal of Computers*, 2007,29(1):153–160 (in Chinese with English abstract).
- [6] Jiang ZH, Jiang YF. A weighted algorithm of graphplan. *Chinese Applications and Software*, 2005,22(5):16–18 (in Chinese with English abstract).
- [7] Hoffmann J, Nebel B. The *ff* planning system: Fast plan generation through heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 2001,14:253–302. <http://www.jair.org/papers/paper855.html> [doi: 10.1613/jair.855]
- [8] Gerevini A, Serina I. LPG: A planner based on local search for planning graphs. In: Ghallab M, Hertzberg J, Traverso P, eds. *Proc. of the 6th Int'l Conf. on AI Planning System (AIPS 2002)*. Toulouse: AAAI Press, 2002. 968–973.
- [9] Rao DN, Jiang ZH, Jiang YF. Using causal-link graphs to detect conflicts among goals. In: Lee JWT, Dong C, eds. *Proc. of the 2007 Int'l Conf. on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC 2007)*. Hong Kong: IEEE Press, 2007. 3087–3092. [doi: 10.1109/ICMLC.2007.4370678]
- [10] 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 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3351.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03351]
- [11] Ghallab M, Nau D, Traverso P. *Automated Planning: Theory and Practice*. Elsevier: Morgan Kaufmann Publishers, 2004.
- [12] Bang-Jensen J, Gutin G. *Digraphs: Theory, Algorithms and Applications*. 2nd ed., London: Springer-Verlag, 2008.
- [13] Jiang ZH. *Research on theory and algorithms of derived planning problems [Ph.D. Thesis]*. Guangzhou: Sun-Yet Sun University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [14] Gimenez O, Jonsson A. The complexity of planning problems with simple causal graphs. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 2008,31:319–351. <http://www.jair.org/papers/paper2432.html> [doi: 10.1613/jair.2432]
- [15] Deineko VG, Woeginger GJ. A study of exponential neighborhoods for the traveling salesman problem and for the quadratic assignment problem. *Mathematical Programming*, 2000,87(3):519–542.
- [16] Cherkassky BV, Goldberg AV, Radzik T. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation. *Mathematical Programming*, 1996,73:129–174. <http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/journals/mp/mp73.html> [doi: 10.1007/BF02592101]
- [17] Alon N, Yuster R, Zwick U. Finding and counting given length cycles. *Algorithmica*, 1997,17(3):209–223. [doi: 10.1007/BF02523189]
- [18] Liu Q, Jiang YF, Rao DN. Safety analysis of ARBAC policy based on Graphplan. *Chinese Journal of Computers*, 2009,31(5): 910–921 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2008.00910]
- [19] Botea A, Enzenberger M, Müller M, Schaeffer J. Macro-FF: Improving AI planning with automatically learned macro-operators. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 2005,24:581–621. <http://www.jair.org/papers/paper1696.html>
- [20] Jiang ZH. Finding and combining goal interaction. In: Lee J, ed. *Proc. of the 2008 Int'l Conf. on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC 2008)*. Kun Ming: IEEE Press, 2008. 52–56. [doi: 10.1109/ICMLC.2008.4620377]
- [21] Long D, Fox M. Automatic synthesis and use of generic types in planning. In: Chien S, Kambhampati S, Knoblock CA, eds. *Proc. of the 5th Int'l Conf. on Artificial Intelligence Planning and Scheduling Systems (AIPS 2000)*. Breckenridge: AAAI Press, 2000. 196–205.

- [22] Helmert M. The fast downward planning system. Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), 2007,26:191–246. <http://www.jair.org/papers/paper1705.html>

附中文参考文献:

- [1] 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,2007,29(12):2061–2073.
- [2] 饶东宁,蒋志华,姜云飞,朱慧泉.对不确定规划中观测约简的进一步研究.软件学报,2009,20(5):1254–1268. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3453.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03453]
- [3] 饶东宁,蒋志华,姜云飞,吴康恒.从 WSBPEL 程序中学习 Web 服务的不确定动作模型.计算机研究与发展,2010,47(3):445–454.
- [4] 饶东宁,蒋志华,姜云飞,刘强.从规划解中学习一阶派生谓词规则.计算机学报,2010,33(2):251–266. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2010.00251]
- [5] 陈嵩祥,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,2007,29(1):153–160.
- [6] 蒋志华,姜云飞.一种带权值的图规划算法.计算机应用与软件,2005,22(5):16–18.
- [10] 文中华,黄巍,刘任任,姜云飞.模型检测规划中的状态分层方法.软件学报,2009,20(4):858–869. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3351.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03351]
- [13] 蒋志华.派生规划问题的理论与算法研究[博士学位论文].广州:中山大学,2008.
- [18] 刘强,姜云飞,饶东宁.基于 Graphplan 的 ARBAC 策略安全分析方法.计算机学报,2009,31(5):910–921. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2008.00910]

附录:缩写对照表

缩写	原文	中文
CON	Close out-neighborhoods	闭出邻集
FF	Fast forward	FF 规划器
PRG	Proposition relation graph	命题关系图
IPC	International planning competition	国际规划大赛
IPS	Initial proposition set	初始命题集
GPS	Goal proposition set	目标命题集
RPG	Relaxed planning graph	放松式规划图
R-RPS	Relaxed reachable proposition set	放松式可达命题集



蒋志华(1978—),女,广西桂林人,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为智能规划.



姜云飞(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为定理机器证明,智能诊断,智能规划.



饶东宁(1977—),男,博士,讲师,主要研究领域为智能规划,图论.



朱慧泉(1978—),男,博士生,主要研究领域为图论,游戏 AI,数据挖掘.