

层次任务网络中的重新规划研究综述

邵天浩¹, 张宏军¹, 程 恺¹, 戴成友², 余晓晗¹, 张 可¹

(1. 陆军工程大学指挥控制工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 中国人民解放军 95429 部队, 云南 昆明 650000)

摘 要: 层次任务网络(hierarchical task network, HTN)作为智能规划技术的重要组成部分,已成功应用于无人平台任务规划、应急方案制定等各领域。由于日益增加的不确定因素对计划执行效果的影响,迫切需要重新规划技术,因此基于 HTN 的重新规划技术成为近年来的研究热点。首先,通过对当前研究现状的总结梳理,提出了基于 HTN 的 3 层重新规划框架。然后,分别从框架中的计划修复、局部重规划和全局重规划 3 个层次阐述了相应的技术路线与实现细节,针对不同层次指出了目前方法的优势与不足。最后,对该问题未来的研究方向进行了展望,并提出了待解决的关键问题及解决思路。

关键词: 智能规划; 层次任务网络; 计划修复; 局部重规划; 全局重规划

中图分类号: TP 181

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2020.12.21

Review of replanning in hierarchical task network

SHAO Tianhao¹, ZHANG Hongjun¹, CHENG Kai¹, DAI Chengyou², YU Xiaohan¹, ZHANG Ke¹

(1. Command and Control Engineering College, Army Engineering University, Nanjing 210007, China;

2. Unit 95429 of the PLA, Kunming 650000, China)

Abstract: As an important part of the intelligent planning technology, hierarchical task network (HTN) is successfully applied to the task planning in unmanned aerial vehicle platform, emergency plan formulation and other fields. Due to effect the increasing uncertain factors on the implementation the influence of the plan, it is urgent to use replanning technology, thus the replanning technology based on HTN has become a hotspot in recent years. First of all, a three-layer replan framework based on HTN is proposed by summarizing the current research status. Then, the corresponding technical route and implementation details are represented from three levels of plan repair, local replanning and global replanning in the framework respectively, and the advantages and disadvantages of the current method are pointed out for different levels. Finally, the future research direction of this problem is prospected, and the key problems to be solved and the solutions are putting forward.

Keywords: intelligent planning; hierarchical task network (HTN); plan repair; local replanning; global replanning

0 引言

随着人工智能研究的不断深入,智能规划作为人工智能领域的重要分支,产生了越来越多的规划技术。层次任务网络(hierarchical task network, HTN)作为规划技术的一种^[1],通过对任务的分解和冲突的消解来寻求完成任务的可行方案,其基本思想是将规划领域的特殊知识提取出

来,用于将该领域复杂抽象的任务递归地分解成越来越小的子任务,直到分解后的子任务都可以通过特定的规划动作直接完成为止^[2]。

HTN 最初由文献[1]在 1975 年提出,但直到 20 世纪 90 年代人们才对其有充分的理论认识,文献[3-4]对 HTN 规划的理论模型进行了研究。1994 年,文献[5-6]提出了 HTN 规划的形式化模型,并进行了复杂性分析,使

收稿日期:2020-03-01; 修回日期:2020-03-27; 网络优先出版日期:2020-05-18。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20200518.1132.024.html>

基金项目:国家自然科学基金(61806221);国防科技创新特区项目(19-163-11-LZ-001-003-01)资助课题

引用格式:邵天浩,张宏军,程恺,等.层次任务网络中的重新规划研究综述[J].系统工程与电子技术,2020,42(12):2833-2846.

Reference format: SHAO T H, ZHANG H J, CHENG K, et al. Review of replanning in hierarchical task network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(12):2833-2846.

得 HTN 真正进入实用领域^[2]。

目前,国外研究 HTN 的团队主要有:美国马里兰大学的 Dana Nau 团队,主要研究方向为简单层次顺序规划(simple hierarchical ordered plan,SHOP)类的规划算法^[7-9]。美国理海大学的 Hector Munoz Avila 团队,主要研究方向为 HTN 领域知识自动获取及适应规划^[10-12]。美国智能信息技术(smart information flow technologies,SIFT)机构的 Ugur Kuter 团队,主要研究方向为 HTN 的多样性规划^[13-15]。德国乌尔姆大学的 Daniel Holler 团队,主要研究方向为网络分解架构中的规划和行动(planning and acting in network decomposition architecture,PANDA)的规划结果解释及验证^[16-18]。德国斯图加特大学的 Ilche Georgievski 团队,主要研究方向为 HTN 服务组合及带偏好的规划^[19-21]。

国内研究 HTN 的团队主要有:华中科技大学的王红卫团队,主要研究方向为应急管理中带资源时间约束的规划^[2,22-23]。中山大学的卓汉逵团队,主要研究方向为基于马尔可夫的 HTN 模型获取^[24-26]。国防科技大学的刘忠团队,主要研究方向为军事计划优化及智能化指控方法^[27-30]。

由于 HTN 规划过程与人类解决问题的思考过程类似,使得其在规划领域有非常广泛的应用,包括:政府部门的应急方案制定^[10,22-23]、危机管理^[31]等;军事领域的军事资源优化配置^[32]、联合作战任务规划^[33-35]、指控行为建模^[36-37]等;工业领域的智能机器人任务规划^[38-40]、无人机路径规划^[41]、Web 服务自动组合^[42-43]、物流方案制定^[44]等;游戏领域的第一人称射击(first person shooting,FPS)游戏、实时策略(real-time strategy,RTS)游戏^[45-51]等;生理学或医学领域的临床决策辅助系统^[52-55]等。

虽然 HTN 规划已经广泛应用于各行各业,但现有的应用侧重点在于准静态规划,有一定的局限性,因为其假设状态空间内所有实体和环境的变化都是由计划的执行造成的。然而,现实世界中很少存在这样的理想情况,状态空间内的实体和环境会因为外界的不确定事件而改变。例如在 FPS 游戏与 RTS 中,非己方的行动会对状态空间产生一定的影响,此时的任务规划需要考虑计划与实际环境的冲突。因此,由于 HTN 规划过程与执行过程的分离,会出现计划无法正常执行的情况,迫使 HTN 需要对计划进行调整,以适应不断改变的外界环境,该过程被称为重新规划^[56]。

国内外都有对于 HTN 重新规划的研究,文献^[57]最早以专家知识为依据,在空战规划领域对行动序列(course of action,COA)进行调整。文献^[58]提出新的专家知识模板,利用启发式算法对 COA 进行调整。文献^[59]建立符号模型进行重新规划,避免了微小的环境变化也要通过编码来寻找修复方案。文献^[60]对专家知识的不合理性进行分析,将蒙特卡罗树搜索应用于指挥员行为建模,通过状态和动作抽象来构建规划树模型。文献^[13]提出利用依赖关系图来寻找最小失败任务,通过对最小失败任务做规

划来寻找修复方案。文献^[11]提出利用目标图来记录规划中的失败过程,从而辅助重新规划过程。文献^[61]基于遗传算法对依赖关系图进行改进,将共享目标的操作绑定在一起,更高质量地寻找出修复方案。文献^[62]对航母舰载机执行任务制定了一套可行的方案。文献^[63]在此基础上提出基于迭代的方案修复机制,通过识别、修复、更新和迭代 4 个过程对 COA 进行调整。文献^[64-65]利用相似度函数处理搜索树的遍历顺序来重构 COA,并将其应用到 FPS 游戏中。文献^[66]提出 HTN 领域转换技术,确保重新规划得到的 COA 与原始 COA 有最大的相同前缀。

现有文献中,对 HTN 重新规划的应用虽然不少,但大多局限于在特定的场景使用具体的重新规划算法,没有对重新规划技术进行整体性的归纳。本文对 HTN 重新规划技术的研究现状进行了归纳和总结,以探索重新规划技术研究中的不足之处,形成完整的 HTN 重新规划体系,以期推进 HTN 在动态环境下的规划能力。

本文首先提出基于 HTN 的重新规划框架;然后从计划修复、局部重规划和全局重规划 3 个层次对重新规划过程中具体的实现技术进行归纳总结;最后指出目前 HTN 重新规划技术中仍需要解决的问题以及未来的研究方向。

1 HTN 规划模型

HTN 作为智能规划的一种,以给定的初始状态、初始任务网和领域知识作为输入,以具体的 COA 作为输出。初始状态描述了状态空间初始时刻的状态。初始任务网定义了 HTN 需要解决的任务集合及其之间存在的各种关系。任务集包含复合任务和原子任务,复合任务不能由实体执行,需要分解为更细的子任务集合,原子任务可以由具体实体直接执行,并对状态空间产生一定的影响。领域知识包括方法集和操作集两部分,方法集定义了如何将复合任务分解为更细的子任务集合,操作集定义了原子任务执行的前提条件和对状态空间的改变^[2]。

自从文献^[1]在 1975 年提出 HTN 规划之后,就有各种各样的 HTN 规划器产生。HTN 规划器是 HTN 规划空间对任务网络进行分解和组合的部件,是 HTN 规划的核心。最早的 HTN 规划器是 20 世纪 70 年代中期由文献^[1]提出的动作层次网络(nets of action hierarchies,NOAH)以及文献^[67]提出的 Nonlin。随后,文献^[68]在 1984 年提出交互式计划和执行监控系统(system for interactive planning and execution monitoring,SIPE),文献^[69]在 1990 年提出 SIPE-2。文献^[70]在 1991 年提出 O-Plan 规划器。文献^[71]在 1994 年提出 O-Plan2 规划器。文献^[5]在 1994 年提出第一个同时具有可靠性和完备性的 HTN 规划器——通用方法规划器(universal method-composition planner,UMCP)。1999 年,文献^[7-8]提出简单层次规划器——SHOP 及其继承者 SHOP2(2003 年),并在 2006 年将其拓展至 Java 版本(Java SHOP2,JSHOP2)^[9],真正意义上将 HTN 规划与

编码结合在一起^[22]。文献[72]对上述 HTN 规划器的性能进行了分析与对比。文献[16]构建了一组基准问题,可以公平和客观地比较各种规划器效能。

由于 HTN 规划器大多以谓词逻辑为基础描述规划,包括最近的研究^[17-18]也是将 HTN 规划问题转化为谓词逻辑,因此本文给出 HTN 规划模型的形式化定义如下^[7-9]。

定义 1(谓词) HTN 规划器对状态空间的描述通过谓词逻辑来完成,谓词 p 由项 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l$ 组成,项可以是常元,也可以是变元,不含变元的谓词被称为原子谓词,谓词的取值有真和假两种。定义 L 表示谓词表达式集合,状态空间可以由 L 的 2^L 个取值表示。

定义 2(任务网络) HTN 中的任务被定义为原子任务 A 和复合任务 C 。任务网络 T_n 被定义为二元组:

$$T_n = \langle T, \psi \rangle$$

式中, $T \in A \cup C$ 表示任务网络中的任务集合; ψ 表示任务之间的约束关系,指定了在规划和执行过程中必须满足的对 T 的约束。

定义 3(操作) 操作 O 描述了原子任务执行的前提条件和对象状态空间的改变,被定义为三元组:

$$O = \langle a, \text{pro}(a), \text{eff}(a) \rangle$$

式中, $a \in A$ 表示某一原子任务; $\text{pro}(a) \in 2^L$ 和 $\text{eff}(a) \in 2^L$ 分别表示原子任务 a 执行的前提条件与效果, $\text{eff}(a)$ 包括 $\text{eff}(a)^+$ 和 $\text{eff}(a)^-$ 两个子集,表示原子任务 a 执行对状态空间添加与删除的谓词。

定义 4(方法) 方法 M 描述了如何将复合任务分解为更细的子任务集合,被定义为三元组:

$$M = \langle c, \text{pro}(c), T_n(c) \rangle$$

式中, $c \in C$ 表示某一复合任务; $\text{pro}(c) \in 2^L$ 表示复合任务分解的前提条件; $T_n(c)$ 表示由复合任务 c 分解得到的子任务集合组成的任务网络。

定义 5(规划问题) HTN 规划问题 P 被定义为四元组:

$$P = \langle O, M, T_n, s_0 \rangle$$

式中, O 和 M 分别表示操作集合和方法集合; T_n 表示需要规划的初始任务网络; $s_0 \in 2^L$ 表示状态空间的初始状态。

定义 6(重新规划问题) HTN 重新规划问题 P_r 被定义为三元组^[67]:

$$P_r = \langle P, C_A, \text{exe} \rangle$$

式中, P 表示原始规划问题; $C_A \in A$ 表示规划问题 P 的一种错误 COA 方案; $\text{exe} \in C_A$ 表示在执行空间已经执行过的 C_A 的前缀。

根据文献[2, 6, 22, 72]中对 HTN 的介绍,本文将 HTN 规划模型总结为状态空间、任务空间、知识空间 3 个空间与规划系统、执行系统 2 个系统,5 个部分的协同工作完成 HTN 规划与重新规划的过程,如图 1 所示。其中,知识空间是从特定领域通过一定的变换函数 F_1 得到的;规划系统将规划问题或重新规划问题通过规划函数 F_2 规划得

到行动序列 π 。

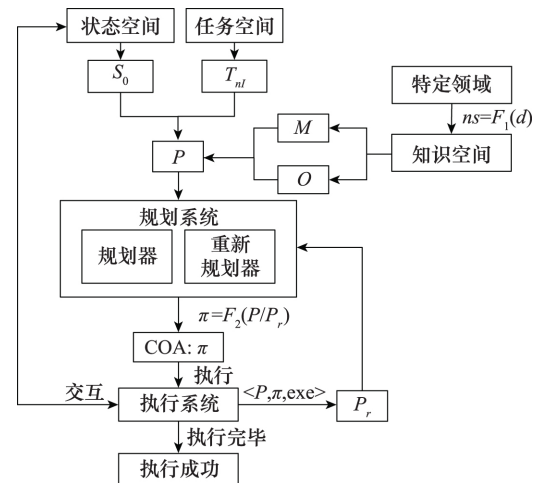


图 1 HTN 规划模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HTN planning model

2 分层的重新规划框架

HTN 规划的特点在于其具有的层次性。之所以将规划分层,在于不同层的规划侧重点不同,所需要占用的系统资源不同,相应的规划速度和影响也不同^[73]。

在 HTN 规划框架中,利用分层规划的思想将任务划分为顶层任务、中层任务和底层任务。底层任务可以由某个特定的动作执行,即原子任务。顶层和中层任务无法由某个特定的动作执行,需要通过一定的方法分解为下一层任务,即复合任务。顶层任务往往指初始任务网中的任务,既可以分解为中层任务,也可以分解为底层任务。

通过将任务分层,对不同层次的任务进行规划,不仅可以划分任务的重要程度,还可以合理地分配规划系统的资源。同时,分层规划也符合人类对于复杂问题求解的思路。

将需要规划的初始状态、初始任务网络和领域知识输入规划空间,可以得到初始 COA,在执行过程中通过初始 COA 与状态空间的交互来判断其执行条件是否满足,从而判断是否需要重新规划。

重新规划最简单的方式是将所有未完成任务作为任务目标,重新调用规划器来生成当前状态下完成任务的 COA,但这样会造成很大的资源浪费,例如外界的一点小异常就需要重新调用规划器做规划,计划执行的实时性不能被满足,因为对所有未完成任务做重新规划会花费较多的时间^[22]。

重新规划的另一种方式是将重新规划过程与原规划过程对应,进行分层重新规划,将其过程对应地分为 3 层,如图 2 所示。对底层任务的重新规划被称为计划修复,这一过程只从原子任务的角度对初始 COA 进行修复,不调用规划器;主要通过编写领域相关的修复规则库或符号模型来完成,具体在第 3 节中介绍。对于中层任务的重新规划被称为局部重规划,这一过程虽然需要调用规划器,但仅仅对

一部分未完成的任务进行重新规划,主要通过不同方式记录规划过程来提高重新规划的规划速度和稳定性,从而减少规划的复杂度和资源的浪费,具体在第 4 节中介绍。对于顶层任务的重新规划被称为全局重规划,这一过程是调用规划器对所有未完成的任务重新规划,是在前两种重新规划方案失效时的最终手段,可以通过一定的模型拓展来确保新 COA 与初始 COA 的最大相关性,具体在第 5 节中介绍。

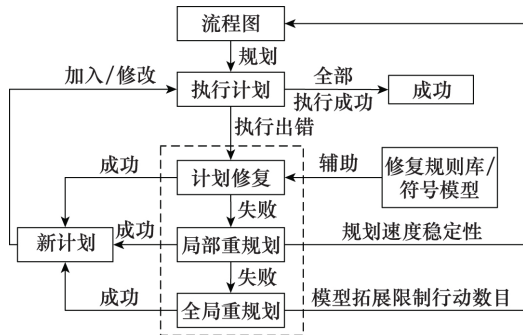


图 2 HTN 重新规划框架图

Fig. 2 Frame diagram of HTN replanning

3 计划修复

计划修复是 HTN 重新规划过程中对于底层任务做调整的方法,其特点在于只调整初始 COA 中的原子任务,不调用规划器对未完成的任务做规划。初始 COA 在实际执行过程中由于状态空间改变而出错时,首先应该考虑从原子任务角度对计划进行修复,如果通过增加和删除原子任务可以使新 COA 满足现有要求,就不需要考虑调用规划器来进行重新规划,确保用最小的消耗解决问题^[63]。

现有的计划修复方法主要有基于修复规则库的计划修复和基于符号模型的计划修复两种。

3.1 基于修复规则库的计划修复

基于修复规则库的计划修复,指通过匹配修复规则来对初始 COA 进行修复。

定义 7(修复规则) 修复规则 R 被定义为四元组^[54]:

$$R = \langle P_R, A_R, D_R, E_R \rangle$$

式中, $P_R \in 2^L$ 表示规则使用的前提条件; $A_R \in A$ 表示增加原子任务列表; $D_R \in A$ 表示删除原子任务列表; $E_R \in 2^L$ 表示使用该规则对外界环境进行改变,分为增加 E_R^+ 和删除 E_R^- 两种谓词。

图 3 表示基于修复规则库的计划修复流程。某时刻初始 COA 由于外界环境改变无法继续执行,根据出错的原子任务和当前的状态空间状态 S ,匹配修复规则库中的第一条规则 R ,若其使用前提 $P_R \in S$,则用 E_R 对 S 进行修改: $S' = S \cup E_R^+ / E_R^-$ 。若新的状态空间状态 S' 满足下一个原子任务的执行前提,则说明计划修复成功,根据 R 中的 A_R 与 D_R 对初始 COA 进行修复;否则选择下一修复规则,判断其是否可以对初始 COA 进行修复。基于修复规则库修复的 COA 可表示为

$$C'_A = \text{exe} \cup A_R \cup C_A / \text{exe} / D_R$$

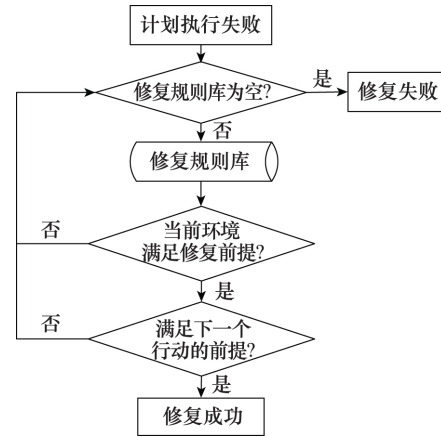


图 3 基于修复规则库的计划修复流程图

Fig. 3 Flowchart of plan repair based on repair rule base

3.2 基于符号模型的计划修复

基于符号模型的计划修复指通过符号建模的方式,利用谓词推理系统 (predicate inference system, PIS) 自动地进行计划修复。

PIS 可以根据初始状态与目标状态之间的谓词差异,自动筛选符合条件的谓词进行增加或删除。例如,初始状态 $s_0 = \{l_1, l_2, l_3, l_4\}$, 目标状态 $s_1 = \{l_1, l_2, l_3\}$, 谓词推理系统会在 COA 中增加原子行动 a' , 且 $l_4 \in \text{eff}(a')$ 。

某时刻初始 COA 由于外界环境改变无法继续执行,首先需要构造目标状态集,作为谓词推理系统的目标状态。

定义 8(目标状态集) 目标状态集 T_s 定义为初始 COA 中每个未完成原子任务执行前状态空间中的状态总和^[60]:

$$\begin{cases} \langle a_1, a_2, \dots, a_m \rangle = C_A / \text{exe} \\ S_i = S_i - 1 \cup \text{eff}(a_i)^+ / \text{eff}(a_i)^- \\ T_s = \{S_0 / -\text{pro}(a_1) \cup \text{pro}(a_1), S_1, S_2, \dots, S_m\} \end{cases}$$

式中, C_A 表示初始 COA; exe 表示 C_A 中已经执行过的原子任务; S_0 表示执行出错时状态空间中的状态; S_i 表示 a_i 执行后状态空间中的状态。

定义 S_0 与 T_s 各个元素中不同谓词的数目为两者的差异度,按照差异度对 T_s 中元素进行升序排序,并依次输入谓词推理系统,若谓词推理系统输出的 COA $C'_A \neq \text{null}$,说明修复成功,否则继续选择下一目标状态进行推理,其过程如图 4 所示。基于符号模型修复的 COA 可表示为

$$C'_A = \text{exe} \cup C''_A \cup a_{n+1} \cup a_{n+2} \cup \dots \cup a_m$$

式中, a_{n+1} 表示目标状态为 S_n 时仍需要执行的后续原子任务。

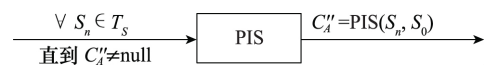


图 4 基于符号模型的计划修复示意图

Fig. 4 Schematic diagram of plan repair based on symbol model

3.3 计划修复小结

计划修复过程不需要调用规划器对未完成的任务做重新规划,基于修复规则库与符号模型的计划修复,本质上都是

通过增加、删除和修改原子任务来使原本不能继续执行的计划可以重新执行,从而完成最终的任务。由于计划修复不需要调用规划器,而是直接使用预先编写好的修复规则或者成熟的谓词推理系统来进行重新规划,具有修复速度快和消耗资源少的优势,非常适合外界环境改变较小的异常情况。

计划修复的缺点如下。① 基于修复规则库的计划修复严重依赖于规划问题,修复规则通常需要相应的领域专家来编写。某一问题的修复规则不能复用于其他领域的问题,使得修复规则库的通用性很低。不同领域问题的修复规则库需要不同的专家编写,增加了规划人员的负担^[64,74]。② 基于符号模型的计划修复虽然不需要事先编写修复规则,但需要依赖谓词推理系统,谓词推理系统只能处理初始状态与目标状态差异较少的情况,适用范围较小。由于需要构建目标状态集,修复速度慢于基于修复规则库的计划修复,但总体速度还是快于局部重规划和全局重规划。

4 局部重规划

局部重规划是 HTN 重新规划过程中对于中层任务做调整的方法,在调整的过程中需要调用规划器,选择新的分解方法来分解复合任务,撤销导致计划失败的行动,有选择地替换更为合适的新行动^[75]。

在局部重规划中,通常用规划速度和稳定性两大指标来判断重规划过程的优劣^[52-53]。规划速度指初始 COA 执行出错到完成重规划所用的时间。稳定性指初始 COA 中的原子任务在新 COA 中出现的比例,稳定性公式可表示为

$$\text{Stability}(C_A', C_A) = \frac{\sum \text{Same}(C_{A_i}', C_{A_j})}{\text{Num}(C_A)}$$

式中, $\text{Same}(C_{A_i}', C_{A_j})$ 表示初始 COA 的第 j 个原子任务与新 COA 中第 i 个原子任务相同; $\text{Num}(C_A)$ 表示初始 COA 中原子任务的总数。

目前提高局部重规划速度和稳定性的研究中,大多需要构建一个用于存储规划过程的数据结构,并在局部重规划中调用该结构中存储的信息,来辅助局部重规划的进行。其中,目标图^[11]和依赖关系图^[13]是两个经典的数据结构。目标图通过在操作和方法的定义中拓展标志位,从而提高局部重规划速度。依赖关系图通过定义依赖关系,从而提高局部重规划的稳定性。后期局部重规划速度和稳定性的研究大多是基于两者改进的^[14,61]。

4.1 基于标志位提高局部重规划速度

HTN 规划器在选择操作和方法时,首先需要判断两者的前提是否满足当前状态空间中的状态,即判断是否有 $\text{pro}(a/c) \in S$ 。在局部重规划中,由于需要调用 HTN 规划器对任务进行规划,因此也会涉及操作和方法的选择,进而产生大量的判断。要加快局部重规划的规划速度,需要尽可能减少重规划过程中的判断。通过在操作和方法的定义中拓展标志位,可以避免选择不符合当前状态的操作和方法,从而减少判断的产生。

拓展定义 1(操作) 在每个操作 O 中添加标志位 flag ,新操作 O' 被定义为

$$O' = \langle a, \text{pro}(a), \text{eff}(a), \text{flag}(a) \rangle$$

拓展定义 2(方法) 在每个方法 M 中添加标志位 flag ,新操作 M' 被定义为

$$M' = \langle c, \text{pro}(c), \text{Tn}(c), \text{flag}(c) \rangle$$

每个新定义的操作与方法都有一个标志位,标志位的取值有 3 种:“IN”“OUT”和“NULL”。“IN”表示该操作/方法在当前状态下可以被执行/分解;“OUT”则相反;“NULL”表示还未判断该操作/方法是否可以在当前状态下被执行/分解。在 HTN 规划产生初始 COA 的过程中,规划树同时生成^[38],记录着规划的过程,如图 5 所示。树的根节点由复合任务组成,树的叶节点由原子任务组成,对叶节点的广度优先遍历可得规划的 COA C_A 。

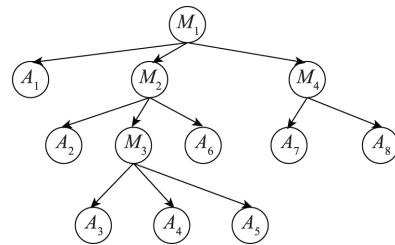


图 5 规划树示例图

Fig. 5 Schematic diagram of planning tree

定义 9(规划树节点) 规划树节点 Node 定义为二元组:

$$\text{Node} = \langle a/c, o/m \rangle$$

式中, $a/c \in A/C$ 表示节点存储的原子/复合任务; $o/m \in O'/M'$ 表示执行/分解对应原子/复合任务的操作集合与方法集合。

若初始 COA 执行过程中状态空间产生改变,可以从受影响的原子任务开始,通过调整规划树来修改操作与方法中标记位的值,并从规划树最终对应的节点开始调用规划器进行重新规划。在重新规划过程中,可以直接跳过标志为“OUT”的操作与方法,减少判断次数,从而提高重规划的速度。调整规划树过程的流程如图 6 所示。

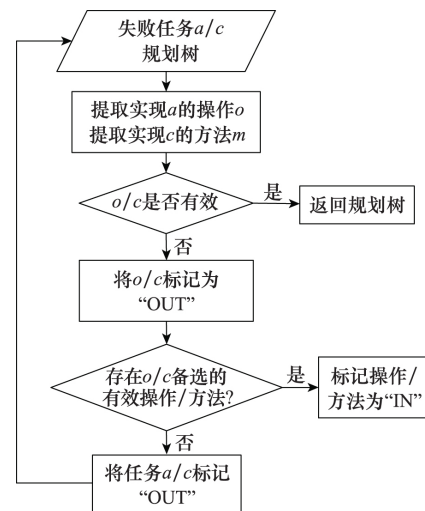


图 6 调整规划树流程图

Fig. 6 Flowchart of adjusting planning tree

调整规划树的过程以受影响的任务 a/c 和规划树为输入。调整过程中会对无法修复的 a/c 的父节点进行递归,以传递 a/c 失去有效性的影响。并从最终递归到的目标节点 T -Node 开始,调用规划器进行规划,在规划过程中可以根据标志位直接跳过标记为“OUT”的操作/方法,从而提高重规划的速度。基于标志位提高局部重规划速度的新序列可表示为

$$C'_A = \text{exe}/a_n/a_{n+1}/\dots/a_i \cup C''_A$$

式中, $a_n \sim a_i$ 表示 exe 与 T -Node 子节点重合的任务; C''_A 表示由目标节点 T -Node 经过规划得到的 COA。

4.2 基于依赖关系提高局部重规划稳定性

为了提高局部重规划的稳定性,要尽可能保留初始 COA C_A 中的原子任务。因此,若只对受状态空间改变影响最小的任务做重新规划,保留剩余任务,可以尽可能小地改变 C_A ,从而提高稳定性。

受状态空间改变影响最小的任务被称为最小失败任务。最小失败任务是指一个标记为“失败”但其父任务没有被标记为“失败”的任务。首先,在图 5 中,无法执行的原子任务 A_3 是一个“失败”任务。其次,如果“失败”任务 A_3 是其父任务 M_3 的第一个子任务,那么检查分解 M_3 方法的前提条件是否在当前状态空间中被满足,如果不满足,那么 M_3 也被标记为“失败”。如果“失败”任务 A_3 不是其父任务 M_3 的第一个子任务,那么任务 A_3 就是寻找到的最小失败任务 T_m 。

最小失败任务 T_m 与基于标志位的局部重规划中的目标节点 T -Node 的不同之处在于:前者只需要对 T_m 进行重规划(不包括 T_m 之后的其余子节点),后者需要对 T -Node 之后的所有任务进行重规划(包括 T -Node 之后的其余子节点)。如图 7 所示,尖括号内为初始 COA C_A , $a_2 \sim a_m$ 和 $a_3 \sim a_6$ 代表需要进行重规划的原子任务。可以看出,基于标志位的局部重规划需要对 T -Node 节点之后的所有任务进行重规划。而基于依赖关系的局部重规划只需要对 T_m 所含子节点进行重规划,从而提高重规划的稳定性。

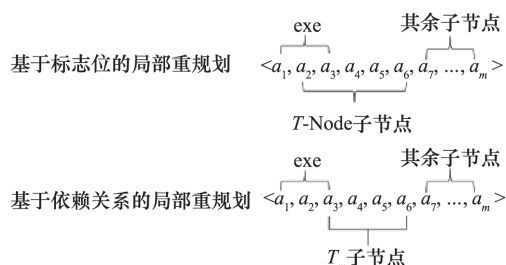


图7 局部重规划节点对比图

Fig. 7 Comparison diagram of planning node in local replanning

图 7 中,对 T_m 的重规划可以解决 $a_3 \sim a_6$ 任务不满足当前状态空间的问题,但不能保证任务 $a_7 \sim a_m$ 能满足当前状态空间。为了解决这一问题,引入依赖关系来表示前后两个任务的内在联系。

定义 10(依赖关系) 依赖关系 CL 被定义为三元组:

$$CL = \langle a_i, a_j, l \rangle$$

式中, $a_i, a_j \in A$ 表示原子任务, $l \in L$ 表示谓词表达式集合。依赖关系表示任务 a_i 执行之后 l 的状态满足 a_j 执行的一个前提条件^[13]。

HTN 在生成初始 COA 时,同时生成规划树和依赖关系集。图 8 为基于依赖关系的局部重规划流程图。

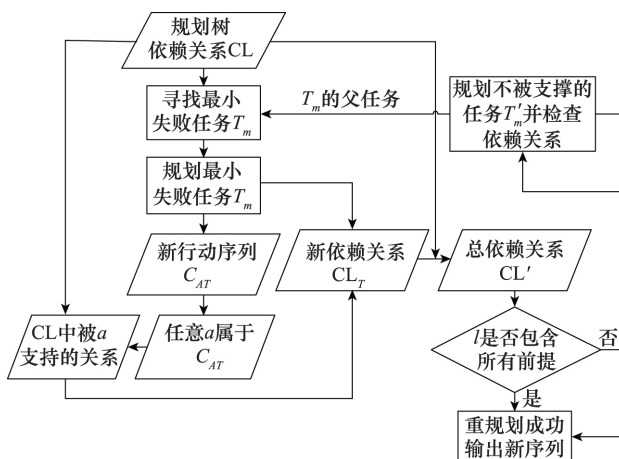


图8 基于依赖关系的重规划流程图

Fig. 8 Flowchart of replanning base on dependency

当某一原子任务由于外界环境改变而无法执行时,会对 T_m 进行重新规划,得到新 COA C_{AT} 和新依赖关系集 CL_T 。结合原有依赖关系集 CL 和新依赖关系集 CL_T ,构造总依赖关系集 CL' ,检查 CL' 所有依赖关系中的谓词表达式集合 l 是否至少一次包含 COA 的所有前提条件,若包含,则说明局部重规划成功;否则,将不包含于谓词表达式集合 l 中的任务作为最小失败任务 T'_m 做重规划。此处不对 T'_m 的父任务做递归,因为其当下无法执行的原子任务无关。基于依赖关系提高局部重规划稳定性的新 COA 表示为

$$C'_A = \text{exe}/a_n/a_{n+1}/\dots/a_i \cup C_{AT} \cup a_j \cup \dots \cup a_m$$

式中, $a_n \sim a_i$ 表示 exe 与 T_m 子节点重合的任务; C_{AT} 表示由最小失败任务 T_m 经过规划得到的 COA; $a_j \sim a_m$ 表示 T_m 子节点之后的其余子任务。

4.3 局部重规划小结

局部重规划是调用 HTN 规划器对部分未完成任务做重新规划的方法,其优势在于:① 能处理复杂状态空间变化的情况;② 虽然其规划速度比不上计划修复,但适用范围远超于计划修复,且不需要提前编写更多的领域知识(修复规则库等),降低了规划专家的工作量;③ 通过提升规划速度与稳定性两个指标,能用最少的资源规划出最符合当前状态空间的 COA。

局部重规划的缺点如下。

(1) 基于标志位提高局部重规划速度的方法,需要在初始规划时产生规划树,导致初始规划速度降低;需要对操作和方法进行拓展,不利于编码实现,同时提高了变量的维

护难度；其最大的劣势在于，标志位只能从“NULL”变为“IN”，从“IN”变为“OUT”，这导致被标记为“OUT”的操作和方法即使在未来的局部重规划中满足当时的状态空间，也不会再被选择，最终可能导致没有操作和方法供局部重规划选择。

(2) 基于依赖关系提高局部重规划稳定性的方法，同样需要在初始规划时产生规划树与依赖关系，导致初始规划速度降低；重规划得到的新 COA 会缺少已经执行过的 COA exe 中的某些后缀，导致已经执行过的某些行动不在新 COA 中，这也是基于标志位算法的缺陷之一。虽然文献[76]提出的 Shopper 执行引擎可以进行实时评估，使新 COA 更好地整合在一起，但其不能处理部分有序的规划，以及不完全信息条件下的规划。

5 全局重规划

全局重规划是指在当前状态下，直接调用规划器对所有未完成的任务进行重新规划。如果能生成新的 COA，则全局重规划成功；否则意味着在当前状态空间中无法完成给定的任务。

全局重规划是 HTN 重新规划过程的最后手段。在常规的全局重规划技术中，重规划完成后的 COA 在很大程度上与初始 COA 没有任何关系，甚至有可能与初始 COA 中已经执行过的某些行动完全相反，这将导致已经执行过的行动失效，并在当前状态下开始执行全新的 COA。同时，若状态空间的状态变化迅速，全局重规划的迭代速度会很快，即短时间内进行多次重规划来适应不断变化的状态空间。这两方面的问题都将导致时间和资源的浪费，前者可以通过对 HTN 规划模型的拓展来解决^[58]，后者可以通过限制全局重规划得到的原子行动数目来解决。

5.1 基于模型拓展的全局重规划

新旧 COA 的相关性是评价全局重规划优劣的指标之一。可以通过拓展 HTN 规划模型使新 COA 与旧 COA 有相同的前缀 exe，即新 COA 是以旧 COA 中已经执行过的行动为前缀的^[66]，假设 $\text{exe} = \langle a_1, a_2, \dots, a_m \rangle$ 。

拓展定义 3(谓词) 在原始谓词集合 L 中添加一组新的谓词表达式，新谓词集合 L' 被定义为

$$L' = L \cup \{l_i \mid 0 \leq i \leq m\} (l_i \notin L)$$

式中， l_i 没有特定的含义，仅仅用于表达某个已经执行过的原子任务在初始 COA 中的位置。

拓展定义 4(原子任务) 在原有的原子任务集 A 上添加一组新的原子任务，新原子任务集 A' 被定义为

$$A' = A \cup \{a'_i \mid 0 \leq i \leq m\}$$

式中， a'_i 是以 a_i 为依据构造的原子任务。

拓展定义 5(操作) 在原有的操作集 O 上添加执行原子任务 a'_i 的操作，新操作集 O' 被定义为

$$O' = O \cup \{o'_i \mid 0 \leq i \leq m\}$$

式中， o'_i 被定义为

$$o'_i = \langle a'_i, \text{pro}(a'_i), \text{eff}(a'_i) \rangle$$

a'_i 的 $\text{pro}(a'_i)$ 和 $\text{eff}(a'_i)$ 定义为

$$\text{pro}(a'_i) = \text{pro}(a_i) \cup \{l_i - 1\}$$

$$\text{eff}(a'_i)^+ = \text{eff}(a_i)^+ \cup \{l_i\}$$

$$\text{eff}(a'_i)^- = \text{eff}(a_i)^- \cup \{l_i - 1\}$$

对于 $\forall a \in A$ ，需要修改其前提条件 $\text{pro}(a)$ ：

$$\text{pro}(a) = \text{pro}(a) \cup \{l_m\}$$

由于在原子任务 $a \in A$ 中添加 l_m 作为前提，而 l_m 必须由规划器规划出原子任务 a'_i 来产生，而规划出 a'_i 的前提则是 l_{m-1} 在状态空间中，层层递推，就可以确保新计划的是以 a'_0, a'_1, \dots, a'_m 为前缀的。当然，必须在初始状态中添加 l_0 ，使 $s'_0 = s_0 \cup \{l_0\}$ 。当 a'_0, a'_1, \dots, a'_m 被规划出来后，规划器才会去选择原始任务集合 A 中的原子任务，并且不会再选择 a'_i 中的原子任务。

由于 HTN 规划器在规划时首先需要选择复合任务，判断复合任务分解方法的前提。因此仅仅对原子任务和操作做拓展是不充分和不严谨的，需要拓展复合任务及其分解方法。

拓展定义 6(复合任务) 在原有的复合任务集 C 上添加一组新的复合任务，新复合任务集 C' 被定义为

$$C' = C \cup \{c_a \mid a \in A\}$$

式中， c_a 是以每个 A 中的原子任务 a 为依据构造的，没有具体含义。

拓展定义 7(方法) 在原有的方法集 M 上添加分解复合任务 c_a 的操作，新方法集 M' 被定义为

$$M' = M \cup M^a \cup M^{\text{exe}}$$

式中， M^a 和 M^{exe} 均表示对复合任务 c_a 拓展定义的方法集，不同之处在于 M^a 中的 c_a 是由不在 exe 中的未执行过的原子任务拓展得到的，而 M^{exe} 中的 c_a 是由 exe 中的原子任务拓展得到的。

$$M^a = \langle c_a, \emptyset, \langle a, \emptyset \rangle \rangle, \forall a \in A \text{ 且 } a \notin \text{exe}$$

$$M^{\text{exe}} = \langle c_a, \emptyset, \langle a', \emptyset \rangle \rangle, a \in \text{exe}$$

式中， \emptyset 表示空集。

有了新方法集，就可以将新定义的原子任务 a'_i 从复合任务中分解出来，并且不影响其余复合任务的分解。

通过对 HTN 规划模型的拓展，可以保证全局重规划的新 COA 以 exe 为前缀，并且其后续行动是在此基础上进行规划的，exe 前缀与后续行动项序列是一个整体，而不是简单的拼接，这样就大大提高了全局重规划中新旧 COA 的相关性。

5.2 基于限制 COA 数目的全局重规划

基于限制 COA 数目的全局重规划是一种边规划边执行的技术。边规划边执行是当前 HTN 研究的一个热点，基于限制 COA 数目的全局重规划只是其中最基础的一种。

当状态空间变化迅速的情况下，全局重规划得到的新 COA 可能在很短时间内又与当前执行环境产生冲突，需要再次做全局重规划。这会使全局重规划的迭代速度很快，造成大量的规划资源与时间的浪费。通过限制全局重规划得到的 COA 数目 N ，可以有效地解决这一问题。

由于 HTN 规划是以深度优先来搜索的,因此只需要将所有未完成任务输入规划器,规划得到的前 N 个原子任务就是执行中的前 N 个原子行动。根据这一特点,当下一个原子行动的前提不满足当前状态空间状态时,调用规划器对未完成任务进行重新规划,当重规划得到的原子任务数目 n_i 和 n_{i+1} 满足 $n_i \leq N < n_{i+1}$ 时,全局重规划结束,其中 n_i 表示前 i 个复合任务分解得到的原子任务数目总和。

基于限制 COA 数目全局重规划得到的新 COA 的数目永远小于 N , 表示为

$$C'_A = a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n_i}$$

在当前状态下执行 C'_A , 若在执行的某时刻 a_i 的前提与当前状态空间中状态矛盾(或者 C'_A 中的任务全部执行完毕),则直接抛弃 C'_A , 重新基于 N 值规划出 n'_i 个新的原子行动,组成新原子 COA, 继续执行。通过上述的递推和迭代过程,可以将所有任务按照小于 N 个的划分全部执行完毕。

Dana 带领的团队对边规划边执行的研究已经有了实质性的成果^[77-79], 图 9 为其边规划边执行的示意图。

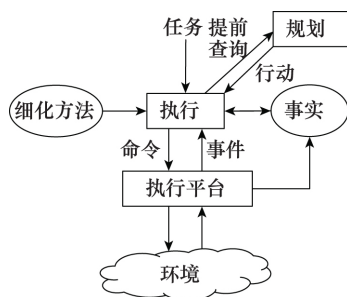


图 9 边规划边执行示意图

Fig. 9 Sketch diagram of planning while acting

首先,在执行方面,文献[80]提出了增强执行引擎(refinement acting engine, RAE)执行系统,包括了新的细化方法,用于将传统的原子行动分解为执行平台可以执行的命令,该系统还可以与现实世界的实际环境(被称为事实)进行交互。

其次,在规划方面,文献[81-84]提出了 RAEplan-LookAhead 规划系统,使用 HTN 中的传统方法,用于将复合任务分解为原子行动,该规划系统中的模拟环境被称为虚拟环境。

最后,RAE 执行系统在执行过程中调用 RAEplan-LookAhead 规划系统,提前查询需要执行的行动,RAEplan-LookAhead 规划系统利用规划成本的倒数——效率作为评估指标,结合蒙特卡罗搜索与启发式函数,得到最优的深度为 D 的规划树,将树中的操作返回给 RAE 执行系统进行执行。需要注意的是,返回的行动不能由执行平台直接执行,需要由 RAE 执行系统中的细化方法分解为命令,才可以由执行平台执行,这使得边规划边执行技术将规划与执行分为了不同的层次,原子行动不再是系统中的最小单位,这也是该技术与传统 HTN 的不同之处。

通过限制 COA 数目进行全局重规划,可以解决由状态

空间变化很快导致的重规划迭代速度过快的问题。当限制 COA 数目 N 很小时,可以将全局重规划认为是一种高级的边规划边执行,这是当前 HTN 重新规划技术的最新研究点之一。

5.3 全局重规划小结

全局重规划是调用 HTN 规划器对所有未完成任务做重新规划的方法,其优势在于:① 适用范围最广,在状态和资源允许范围内可以调整所有失败的 COA;② 通过模型拓展可以保持新 COA 与旧 COA 的相关性,最大程度上确保已经执行过的行动继续有效,新行动是在已经执行过的行动的基础上继续执行。

全局重规划的缺点如下。

(1) 将所有未完成任务进行重规划需要花费较多的时间,使计划执行的实效性降低,且每次只能产生一组新 COA。虽然文献[85]提出在规划中回溯寻找多组 COA,但其只能用于顺序任务分解的情况。规划模型的拓展依赖于已执行过的任务 exe,导致每次全局重规划都要重新对规划模型做拓展。基于拓展领域的全局重规划必须以已执行过的任务 exe 作为新 COA 的前缀,虽然可以最大程度提高新旧 COA 的相关性,但导致全局重规划的可选择性降低,需要研究平衡相关性和可选择性的新方法^[86]。

(2) 基于限制 COA 数目的全局重规划虽然减少了规划资源的浪费,同时提高了规划的实效性,但降低了新旧 COA 的相关性。虽然这一方法有边规划边执行的思想,但其不能解决边规划边执行过程中带来的各种意外情况。例如,将总任务进行分块导致的不能较好处理已经执行过的行动给状态空间带来的影响,需要进一步对该技术进行研究。

6 总结与展望

6.1 总结

生成的 COA 如何适应复杂的动态环境是智能规划技术面临的重大挑战。HTN 重新规划技术作为智能规划的一种,具有十分广泛的应用前景,利用 HTN 重新规划技术能够对 COA 进行实时修复和调整。如何对修复策略划分层次,以及如何根据态势的偏离程度选择不同的修复策略是 HTN 重新规划过程中的关键技术。本文首先提出基于 HTN 的重新规划框架,然后按照计划修复、局部重规划和全局重规划 3 个层次阐述了相应的技术路线与实现细节,为完善 HTN 重新规划技术的研究提供了理论支撑与技术参考,希望可以推进 HTN 重新规划在实际问题中的应用。

表 1 从重新规划的规划速度、新 COA 的稳定性、新旧 COA 的相关性、算法的实现难度和方法的环境适应性等 5 个方面对各技术方法进行了对比与总结。从表 1 可以看出,计划修复对环境的适应性较差,但其重新规划速度很快,实现难度较低,适用于环境变化很小的情况。局部重规划的环境适应性适中,但重新规划速度稍慢,且实现起来有一定的难度,适用于环境变化较大的情况。全局重规划的环境适应性很强,可以用于任何情况下的重新规划,但规划

速度最慢,虽然基于限制行动数目的全局重规划实现简单,但其稳定性与相关性都很弱。对于局部重规划与全局重规划来说,基于依赖关系的局部重规划有较高的稳定性与较强的相关性,但缺点在于实现难度大,需要通过依赖关系的定义与修正来辅助重规划的完成。综上所述,将 HTN 重

新规划技术进行分层不仅可以理清各种技术之间的区别,同时可以根据不同层次来选择不同的重新规划技术,从而提高规划速度,节省规划资源。并且,将重新规划技术分层复合 HTN 内在的分层特性,根据分层框架针对不同问题编写领域知识,可以提高领域专家的工作效率。

表 1 重新规划技术性能对比表

Table 1 Performance comparison table in replanning technology

重新规划中的技术方法	速度	稳定性	相关性	实现难度	环境适应性
基于修复规则库的计划修复	快	高	强	中	劣
基于符号模型的计划修复	快	中	中	低	劣
基于标志位的局部重规划	中	低	弱	中	中
基于依赖关系的局部重规划	慢	高	强	高	中
基于模型拓展的全局重规划	慢	中	中	高	优
基于限制行动数目的全局重规划	与 N 有关	低	弱	低	优

6.2 未来的研究方向

目前,随着人工智能技术的深入发展,智能规划作为其重要分支,相关规划模型和算法进展迅速,特别是与人类思考方式类似的 HTN 规划方法,在解决许多实际问题时效果显著,而国际自动规划与调度大会(International Conference on Automated Planning and Scheduling, ICAPS)从 2018 年开始专门开辟了层次任务规划的专题分论坛,凸显了层次任务规划的重要性。

面对实际环境中日益增加的不确定因素对计划执行的影响,迫切需要重新规划技术来应对,使计划执行的实际效果尽可能满足预期目标,这也是近年来重规划技术成为研究热点的重要原因。本文通过对 HTN 重新规划技术的深入梳理和分析,发现还有许多关键问题亟待解决,其未来研究方向可以从以下几个方面进行考虑。

(1) 构建通用的修复规则库

目前,修复规则库的编写主要通过领域专家针对特定领域构造一套新的领域知识,用于解决状态空间中出现的各种不确定情况。不同应用领域的修复规则库之间通用性很低,这和领域知识的通用性低有相同的原因,主要在于不同领域对状态、资源、实体等的描述均不同。

文献[57]最早构建了军事方面的领域知识与修复规则库,用于空中作战的规划与重新规划。文献[74]构建了机器人领域的知识与修复规则库,用于水下机器人任务的规划与重规划。文献[40]利用 JSHOP2 规划器构建了机器人智能规划的领域知识与修复规则库,可以根据不同环境自动调整 COA。文献[62]构建了军事方面的领域知识与修复规则库,用于航母舰载机保障任务的规划与重规划。文献[40,57,62,74]中的领域知识与修复规则库差异较小,而其余文献中的领域知识与修复规则库差异较巨大,这是由于前者的应用领域具有相同的资源和实体。

本文认为对修复规则库的通用性研究在于研究相似领域的基础规则库,构建相似领域之间的通用型“积木”,在真正构建修复规则库时,只需要进行简单堆积与适当扩充,这一点在文献[87]中定义了一种新的层次领域定义语言作为

通用型领域知识以及修复规则库构建的基础。

(2) 综合提升重新规划的性能指标

每种局部重规划算法都具有相应的使用范围和局限性,提高重新规划速度的算法稳定性较低,提高重新规划稳定性的算法规划速度较慢。而评价局部重规划算法好坏的指标也不仅仅局限于划速度与稳定性,综合提升重新规划的性能指标是当下亟待解决的关键问题之一。

文献[38]提出一种通过对规划树边缘节点做标记的方法加快重新规划的搜索速度。文献[88]通过构建各空间的多模式通信,提高重新规划的灵活性。文献[14]在依赖关系图的基础上,通过反规划的方法提高了重新规划的稳定性。文献[61]基于遗传算法改进局部重规划,提高了重新规划结果的多样性。

从上述研究可以看出,不同的重新规划算法改进的侧重点不同,如何平衡各项评价指标给研究者带来很大的挑战。目前,文献[89]提出新的规划器,应用于军事作战的计划生成和执行。文献[90]设计的分时规划系统可以在提升重规划速度的基础上提高新 COA 的质量,其思想是按照边规划边执行的过程来处理动态不确定情况。

在全局重规划中,已经提到边规划边执行的思想。此外,2019 年的 ICAPS 大会上强调了边规划边执行的重要性,说明边规划边执行的思想正在改变 HTN 规划与重新规划的过程。近几年,文献[79,83-84]以“交叉规划与执行”为主题做了大量的研究:统一规划和执行所用的模型,将规划所用的描述型模型用执行所用的操作型模型所代替。通过建立“细化方法”消除规划与执行中原有的差异,其最大的优势在于规划器可以实时地为某一任务选择最佳的分解方法,将方法提供给执行器,用于在现实世界中具体的执行。虽然这一研究的核心框架与传统的 HTN 规划有一定的区别,但其边规划边执行的核心思想以及处理不确定性问题时所使用的模拟技术,对于 HTN 重新规划技术的革新有重大的启发意义。未来可以转变 HTN 规划的研究思路,将执行与规划(模拟)两者高效地结合在一起,从而全面提升 HTN 重新规划的各项指标,这是当下 HTN 研究

中最核心与最热门的研究方向。

(3) 预先判定待修复的节点

无论是计划修复还是局部和全局重规划,目前将修复节点定为原子任务无法执行时的文献较多,而进行提前修复的应用偏少,这些应用主要集中在路径规划问题和资源分配问题。

文献[91]利用 Agent 间的协同合作对机器人寻路问题进行提前重规划。文献[45]使用游戏地图的自动抽象方法对 RTS 中实体的寻路问题进行提前重规划。文献[76]利用构建计划执行引擎——简单层次有序规则器对网络服务中资源规划问题进行提前重规划。文献[39]提出多 Agent 协作的高层分布式系统结构 HiDDeN,通过完整的故障检测管理方法,使修改尽可能提前。

上述应用也仅仅根据简单的规则提前确定修复节点,还不能真正意义上给重新规划带来本质上的实效性和灵活性的提高,对于如何提前确定修复节点,还有较大的发展空间。提前确定修复节点对于某些特定领域有很重要的意义。例如,军事领域的作战任务规划,若能提前确定计划执行可能失败的节点,可以给予指挥员更多的决策时间与空间,更好的把握战局。因此,如何提前确定修复节点,是 HTN 重新规划技术研究的重难点之一。

(4) 准确选择修复的策略

HTN 重新规划框架能够针对状态空间的偏离程度应用不同的修复策略对 COA 进行修复。如何将不同的偏离程度映射到不同层次的重新规划框架,大多数研究者通过依次判断来选择修复策略,没有真正做到直接映射。

文献[52—55]、文献[92—94]在 COA 出错时首先利用计划修复来调整 COA,当计划修复失效时,才会调用 HTN 规划器对部分或全部未完成的任务进行规划。少数研究者建立了偏离程度和修复策略之间的映射关系。文献[95]利用贝叶斯推理将不确定事件映射到分层重规划结构。文献[96]在基础 HTN 模型上添加了转换层,用于将用户的请求映射到分层重规划结构。文献[97]利用模糊神经网络完成映射。

虽然对于选择修复策略已经有了一定的研究,但是现有的选择方式大多缺乏理论依据,或者实现较为困难,因此如何确定修复策略仍需要进一步深入研究。

(5) 与新技术的有机结合

HTN 规划虽然具有完备的理论支撑和广泛的应用前景,但在机器学习与深度神经网络火热发展的背景下,HTN 重新规划技术也必须与新技术结合。

文献[98]将 HTN 重新规划技术与蒙特卡罗仿真结合,降低了重新规划成本,加快了重新规划速度。文献[99—104]通过在 HTN 中加入启发式搜索算法,在重新规划时可以选择最优化的新 COA,同时降低规划复杂度。文献[105]将 HTN 重新规划技术与马尔可夫决策相结合,在机器人任务规划领域减小搜索空间,使新 COA 更一致和稳定。文献[12,15,86,106]将自学习技术与 HTN 结合,通过自

学习自动构建 HTN 领域知识或修复规则,大大提高了规划专家的规划效率。

从上述研究可以看出,HTN 规划与重新规划技术与现有新技术的结合可以更快、更优地解决动态环境下的规划问题。目前,将 HTN 的规划结构与执行结构分离进行规划的研究已经取得了一定的进展^[83];规划结构部分利用蒙特卡罗树搜索来模拟得到最优的计划,并利用一定的监督学习算法,对蒙特卡罗树搜索进行深度和广度的剪枝来提高搜索效率。执行结构部分则通过不同的调用策略,提高了 HTN 在不同动态环境下的规划能力。

HTN 与新技术尤其是人工智能技术的有机结合,是 HTN 规划与重新规划发展的前景之一。目前该方面的研究正处于起步阶段,具有较大的研究价值。

参考文献:

- [1] SACERDOTI E D. The nonlinear nature of plans[C]//Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1975: 206—214.
- [2] 王红卫, 刘典, 赵鹏, 等. 不确定层次任务网络规划研究综述[J]. 自动化学报, 2016, 42(5): 655—667.
WANG H W, LIU D, ZHAO P, et al. Review on hierarchical task network planning under uncertainty[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(5): 655—667.
- [3] YANG Q. Formalizing planning knowledge for hierarchical planning[J]. Computational Intelligence, 1990, 6(1): 12—24.
- [4] KAMBHAMPATI S, HENDLER J A. A validation-structure-based theory of plan modification and reuse[J]. Artificial Intelligence, 1992, 55(2/3): 193—258.
- [5] EROL K, HENDLER J, NAU D. UMCP: a sound and complete procedure for hierarchical task-network planning[C]//Proc. of the International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems, 1994: 249—254.
- [6] EROL K. Hierarchical task-network planning systems formalization, analysis, and implementation[D]. Maryland: University of Maryland, 1995.
- [7] NAU D, AU T C, ILGHAMI O, et al. SHOP2: an HTN planning system[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2011, 20(1): 379—404.
- [8] NAU D, AU T C, ILGHAMI O, et al. Applications of SHOP and SHOP2[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(2): 34—41.
- [9] ILGHAMI O. Documentation for JSHOP2[R]. Maryland: University of Maryland, 2006.
- [10] MUNOZ-AVILA H, AHA D W, NAU D, et al. SiN integrating case-based reasoning with task decomposition[C]//Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2001: 999—1004.
- [11] WARFIELD I, HOGG C, LEE-URBAN S, et al. Adaptation of hierarchical task network plans[C]//Proc. of the International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, 2007: 429—434.
- [12] FINE-MORRIS M, MUNOZ-AVILA H. Learning domain struc-

- ture in HGNs for nondeterministic planning[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2019: 22–30.
- [13] AYAN N F, KUTER U, YAMAN F, et al. HOTRiDE: hierarchical ordered task replanning in dynamic environments[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2007: 31–36.
- [14] KUTER U, MILLER C. Computational mechanisms to support reporting of self confidence of automated/autonomous systems[C]//Proc. of the AAAI Fall Symposium Series: Self-Confidence in Autonomous Systems, 2015: 18–21.
- [15] GOPALAKRISHNAN S, MUNOZ-AVILA H, KUTER U. Learning task hierarchies using statistical semantics and goal reasoning[J]. AI Communication, 2016, 31(2): 167–180.
- [16] BEHNKE G, HOLLER D, BERCHER P. Hierarchical planning in the IPC[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2019: 6–14.
- [17] BEHNKE G, HOLLER D, BIUNDO S. Bringing order to chaos—a compact representation of partial order in SAT-based HTN planning[C]//Proc. of the Conference on Artificial Intelligence, 2019: 1562–1571.
- [18] BEHNKE G, HOLLER D, BIUNDO S. Finding optimal solutions in HTN planning—a SAT-based approach[C]//Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2019: 20–28.
- [19] GEORGIEVSKI I, AIELLO M. Automated planning for ubiquitous computing[J]. ACM Computing Surveys, 2016, 49(4): 1–46.
- [20] GEORGIEVSKI I, NGUYEN T A, NIZAMIC F, et al. Planning meets activity recognition: service coordination for intelligent buildings[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 38: 110–139.
- [21] KALKSMA M, SETZ B, RIZKY P A, et al. Mining sequential patterns for appliance usage prediction[C]//Proc. of the International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, 2018: 23–33.
- [22] 王红卫, 祁超. 基于层次任务网络规划的应急响应决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- WANG H W, QI C. Hierarchical task network planning based emergency response decision making theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [23] 唐攀, 祁超, 王红卫. 基于层次任务网络规划的应急行动方案制定方法[J]. 管理评论, 2016, 28(8): 43–50.
- TANG P, QI C, WANG H W. Emergency response action plan development based on hierarchical task network planning[J]. Management Review, 2016, 28(8): 43–50.
- [24] SUKTHANKAR G, GEIB C, BUI H H, et al. Plan, activity and intent recognition[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2014: 227–249.
- [25] ZHUO H H, KAMBHAMPATI S. Model-lite planning: case-based vs. model-based approaches[J]. Artificial Intelligence, 2017, 246: 1–21.
- [26] TANG M, CAI J, ZHUO H H. Multi-matching network for multiple choice reading comprehension[C]//Proc. of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019: 7088–7095.
- [27] 张家铭, 刘忠, 石建迈, 等. 考虑飞行初段弹道交叉的多导弹协同发射时序规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(2): 316–321.
- ZHANG J M, LIU Z, SHI J M, et al. Fire scheduling for multiple missiles cooperative engagement considering trajectory intersection during the initial flight phase[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(2): 316–321.
- [28] 张迎新, 陈超, 刘忠, 等. 资源不确定军事任务计划预测调度模型与算法[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3): 33–38.
- ZHANG Y X, CHEN C, LIU Z, et al. Method for modeling and solving military mission planning with uncertain resource availability[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 33–38.
- [29] 罗旭辉, 刘忠, 张维明, 等. 层次任务网络的作战计划建模及生成技术[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(12): 24–28.
- LUO X H, LIU Z, ZHANG W M, et al. Research on modeling and generation of operational plan based on hierarchical task-network[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(12): 24–28.
- [30] 姜鑫, 杜正军, 王长春, 等. 不确定性环境下的多阶段军事对抗决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2163–2168.
- JIANG X, DU Z J, WANG C C, et al. Method of multistage military conflict decision-making in uncertainty environments[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8): 2163–2168.
- [31] BIUNDO S, SCHATTENBERG B. From abstract crisis to concrete relief—a preliminary report on combining state abstraction and HTN planning[C]//Proc. of the European Conference on Planning, 2001: 157–168.
- [32] 曲源超. 基于层次任务网络的军事计划优化方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- QU Y C. Research on the method of military planning optimum based on hierarchical task network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [33] XU X, JU R S, LIU X C, et al. Extending HTN to planning and execution control for small combat unit simulation[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2017, 8(2): 1–18.
- [34] 肖海, 刘新学, 舒健生, 等. 基于扩展 HTN 规划的作战任务分析方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(9): 108–111.
- XIAO H, LIU X X, SHU J S, et al. Research on operational task analysis method based on extended HTN planning[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(9): 108–111.
- [35] 耿松涛, 操新文, 李晓宁, 等. 基于扩展层级任务网络的联合作战电子对抗任务分解方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(5): 8–13.
- GENG S T, CAO X W, LI X N, et al. Joint operations electronic countermeasures task decomposition method based on extended hierarchical task network[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018, 32(5): 8–13.
- [36] 孙林, 焦鹏, 许凯. 基于改进分层任务网的指控行为模型[J]. 计算机科学, 2017, 44(S1): 519–522.

- SUN L, JIAO P, XU K. Command and control behavior model based on improved hierarchical task network[J]. Computer Science, 2017, 44(S1): 519–522.
- [37] 汪鑫, 高岩, 陈逸, 等. 作战班组层次行为建模[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(12): 250–255.
- WANG X, GAO Y, CHEN Y, et al. Combat team's hierarchical behavior modeling[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(12): 250–255.
- [38] LEE S M. Hierarchical planning knowledge for refining partial-order plans[D]. Commonwealth of Pennsylvania: Lehigh University, 2012.
- [39] GATEAU T, LESIRE C, BARBIER M. HiDDeN: cooperative plan execution and repair for heterogeneous robots in dynamic environments[C]//Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 4790–4795.
- [40] 宋沐民, 路飞, 陈娜, 等. 智能空间下基于分层任务网络的服务机器人任务规划[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(7): 83–89.
- SONG M M, LU F, LU N, et al. Task planning for service robot with hierarchical task network in intelligent space[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(7): 83–89.
- [41] 宋月. 基于 HTN 的无人机任务规划的研究与仿真分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- SONG Y. Research and simulation analysis of task planning for UAV based on HTN[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [42] SIRIN E, PARSIA B, WU D, et al. HTN planning for web service composition using SHOP2[J]. Web Semantics, 2004, 1(4): 377–396.
- [43] HRISTOSKOVA A, VOLCKAERT B, TURCK F D. Dynamic composition of semantically annotated web services through QoS-aware HTN planning algorithms[C]//Proc. of the International Conference on Internet and Web Applications and Services, 2009: 337–382.
- [44] 王喆, 王世昌, 李明磊, 等. 层次任务网络规划在应急物流方案制定中的应用研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(5): 15–20.
- WANG Z, WANG S C, LI M L, et al. Research on application of HTN planning in emergency logistics program formulation[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(5): 15–20.
- [45] NAVEED M, KITCHIN D, CRAMPTON A. A hierarchical task network planner for pathfinding in real-time strategy games[C]//Proc. of the International Symposium on AI & Games, 2010.
- [46] VERWEIJ T. A hierarchically-layered multiplayer bot system for a first-person shooter[D]. Amsterdam: Vrije Universiteit of Amsterdam, 2007.
- [47] ROBERTSON G, WATSON I. A review of real-time strategy game AI[J]. AI Magazine, 2014, 35(4): 75–104.
- [48] DONALDSON M J. Modeling dynamic tactical behaviors in COMBATXXI using hierarchical task networks[D]. Monte-rey: Naval Postgraduate School, 2014.
- [49] 罗文杰, 杨佩, 王皓, 等. FPS 游戏中基于 HTN 的 Anytime 规划器的研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(21): 92–95.
- LUO W J, YANG P, WANG H, et al. Research of HTN-based anytime planner in FPS games[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(21): 92–95.
- [50] LAAVERI T. Integrating AI for turn-based 4X Strategy game[D]. Helsinki: University of Applied Sciences, 2017.
- [51] LIN S, JIAO P, XU K, et al. Modified adversarial hierarchical task network planning in real-time strategy games[J]. Applied Sciences, 2017, 7(9): 872–895.
- [52] SANCHEZ-GARZON I, FDEZ-OLIVARES J, CASTILLO L. A repair-replanning strategy for HTN-based therapy planning systems[C]//Proc. of the Conferencia De La Asociacion Espanola de Inteligencia Artificial, 2011.
- [53] SANCHEZ-GARZON I, FDEZ-OLIVARES J, CASTILLO L. Monitoring, repair and replanning techniques to support exception handling in HTN-based therapy planning systems[C]//Proc. of the Conferencia De La Asociación Española de Inteligencia Artificial, 2011: 33–42.
- [54] FDEZ-OLIVARES J, SANCHEZ-GARZON I, GONZALEZ-FERRER A, et al. Task network based modeling, dynamic generation and adaptive execution of patient-tailored treatment plans based on smart process management technologies[C]//Proc. of the Knowledge Representation for Health Care, 2011: 37–50.
- [55] JIN L, DECHER K S, SCHMIDT C J. Bio-planner a plan adaptation approach for the discovery of biological pathways across species[C]//Proc. of the Innovative Applications of Artificial Conference, 2009: 99–106.
- [56] HAYASHI H, CHO K, OHSUGA A. A new HTN planning framework for agents in dynamic environments[C]//Proc. of the International Workshop on Computational Logic in Multiagent Systems, 2004: 108–133.
- [57] MYERS K L. CPEF: a continuous planning and execution framework[J]. AI Magazine, 1999, 20(4): 63–69.
- [58] KROGT R V D, WEERDT M D. Plan repair as an extension of planning[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2005: 161–170.
- [59] OUALI L O, RICH C, SABOURET N. Plan recovery in reactive HTNs using symbolic planning[C]//Proc. of the International Conference on Artificial General Intelligence, 2015: 320–330.
- [60] XU X, YANG M, LI G. Adaptive CGF commander behavior modeling through HTN guided Monte Carlo tree search[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2018, 27(2): 231–249.
- [61] BECHON P, BARBIER M, LESIRE C, et al. Using hybrid planning for plan reparation[C]//Proc. of the European Conference on Mobile Robots, 2015.
- [62] QI C, WANG D. Dynamic aircraft carrier flight deck task planning based on HTN[J]. IFAC Papersonline, 2016, 49(12): 1608–1613.
- [63] 曾素颖. 动态环境下航母甲板任务规划方案修复与重规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- ZENG S Y. Aircraft carrier deck task plan repair and replanning research under dynamic[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [64] SOEMERS D J N J, WINANDS M H M. Hierarchical task net-

- work plan reuse for video games[C]//Proc. of the IEEE Conference on Computational Intelligence and Games, 2016: 78–84.
- [65] URO M. Adversarial hierarchical-task network planning for complex real-time games[C]//Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2015: 1652–1658.
- [66] HOLLER D, BERCHER P, BEHNKE, et al. HTN plan repair using unmodified planning systems[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2018: 26–30.
- [67] TATE A. Generating project networks[C]//Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1977: 888–893.
- [68] WILKINS D E. Domain-independent planning representation and plan generation[J]. Artificial Intelligence, 1984, 22(3): 269–301.
- [69] WILKINS D E. Can AI planners solve practical problems[J]. Computational Intelligence, 1990, 6(4): 232–246.
- [70] CURRIE K, TATE A. O-plan: the open planning architecture[J]. Artificial Intelligence, 1991, 52(1): 49–86.
- [71] TATE A, DRABBLE B, KIRBY R. O-plan2: an open architecture for command, planning and control[M]. San Francisco: Morgan kaufmann, 1994.
- [72] GEORGIEVSKI I, AIELLO M. HTN planning: overview, comparison, and beyond[J]. Artificial Intelligence, 2015, 222: 124–156.
- [73] HIATT L M. Probabilistic plan management[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2009.
- [74] 刘园园. 水下机器人规划修复方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- LIU Y Y. Research on planning repair for autonomous underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [75] BIDOT J, SCHATTENBERG B, BIUNDO S. Plan repair in hybrid planning[C]//Proc. of the German Conference on Artificial Intelligence, 2008: 169–176.
- [76] GOLDMAN R P, MARAIST J. Shopper a system for executing and simulating expressive plans[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2010: 230–233.
- [77] GHALLAB M, NAU D, TRAVERSO P. Automated planning and acting[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [78] ZUCKERMAN I, WILSON B, NAU D. Avoiding gametree pathology in two player adversarial search[J]. Computational Intelligence, 2018, 34(2): 542–561.
- [79] PATRA S, GHALLAB M, NAU D, et al. APE: an acting and planning engine[J]. Cognitive Systems, 2019, 7: 175–194.
- [80] NAU D, GHALLAB M, TRAVERSO P. Blended planning and acting: Preliminary approach, research challenges[C]//Proc. of the Conference on Artificial Intelligence, 2015: 4047–4051.
- [81] PATRA S, TRAVERSO P, GHALLAB M, et al. Planning and acting with hierarchical input/output automata[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling Workshop on Generalized Planning, 2017: 15–23.
- [82] HASLUM P, IVANKOVIC F, RAMIREZ M, et al. Extending classical planning with state constraints: heuristics and search for optimal planning[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2018, 62: 373–431.
- [83] PATRA S, MASON J, KUMAR A, et al. Integrating acting, planning, and learning in hierarchical operational models[C]//Proc. of the 30th International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2020.
- [84] PATRA S, GHALLAB M, NAU D. Interleaving acting and planning using operational models[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2019: 46–54.
- [85] 宋泾舸, 查建中, 陆一平. HTN 规划中面向多计划生成的顺序任务分解算法[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4): 46–49.
- SONG J G, ZHA J Z, LU Y P. Multiple plans oriented OTD algorithm for HTN planning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(4): 46–49.
- [86] ZHANG W P, SHEN L C, CHEN J. Learning and fatigue inspired method for optimized HTN planning[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(2): 233–241.
- [87] HOLLER D, BEHNKE G, BERCHER P, et al. HDDL—a language to describe hierarchical planning problems[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2019: 6–14.
- [88] BERCHER P, BIUNDO S, GEIER T, et al. Plan, repair, execute, explain-how planning helps to assemble your home theater[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2014: 386–394.
- [89] NEUFELD X, MOSTAGHIM S, PEREZ-LIEBANA D. HTN fighter: planning in a highly-dynamic game[C]//Proc. of the Computer Science and Electronic Engineering, 2017: 189–194.
- [90] GREY A, MATIGNON L, AKNINE S. HEART: hierarchical abstraction for real-time partial order causal link planning[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2018: 17–25.
- [91] HAYASHI H, TOKURA S, OZAKI F. Towards real-world HTN planning agents[J]. Knowledge Processing and Decision Making in Agent-Based Systems, 2009, 170: 13–42.
- [92] MOLINEAUX M, KLENK M, AHA D W. Goal-driven autonomy in a navy strategy simulation[C]//Proc. of the Conference on Artificial Intelligence, 2010: 1548–1554.
- [93] GATEAU T, BARBIER M, LESIRECABANIOLS C. Local plan exertion and repair in a hierarchical structure of sub-teams of heterogeneous autonomous vehicles[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2010.
- [94] GATEAU T, SEVERAC G, LESIRE C, et al. Knowledge base for planning, execution and plan repair[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2012: 39–46.
- [95] 刘海涛. 水下机器人任务规划与重规划技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- LIU H T. Research on mission planning and re-planning for

- AUV[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [96] BEHNKE G, HOLLER D, BERCHER P, et al. Change the plan-how hard can that be[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2016: 38–46.
- [97] 王晓晖. 动态不确定环境下深空探测器自主任务规划方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- WANG X H. Study on autonomous mission planning technology for deep space explorer under dynamic uncertain environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [98] PATRA S, GHALLAB M, NAU D, et al. Acting and planning using operational models[C]//Proc. of the Conference on Artificial Intelligence, 2019: 23–30.
- [99] LI M L, WANG H W, QI C. A novel HTN planning approach for handling disruption during plan execution[J]. Applied Intelligence, 2016, 46(4): 1–10.
- [100] ALFORD R. Search complexities for HTN planning[D]. Maryland: University of Maryland, 2016.
- [101] CHENG K, WU L, YU X H, et al. Improving hierarchical task network planning performance by the use of domain-independent heuristic search[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 142: 117–126.
- [102] HOLLER D, BERCHER P, BEHNKE G, et al. On guiding search in HTN planning with classical planning heuristics[C]//Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2019.
- [103] WINER D R, ROGELIO E, RIVERA C. A depth-balanced approach to decomposition planning for problems where hierarchical depth is requ[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2018.
- [104] BEHNKE G, HOLLER D, BERCHER P, et al. More succinct grounding of HTN planning problems-preliminary results[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2019: 40–48.
- [105] SZULYOVSKY B. Reasoning over hierarchical task workflows in robust robot planning[D]. Austria: Management Center Innsbruck, 2015.
- [106] XIAO Z H, WAN H, ZHUO H H, et al. Learning HTN methods with preference from htn planning instance[C]//Proc. of the International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2019: 31–39.

作者简介:

邵天浩(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为任务规划、智能控制。

E-mail:605862558@qq.com

张宏军(1963—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为人工智能、作战规划、机器学习。

E-mail:jsnjzhj@263.net

程 恺(1983—),通信作者,男,副教授,博士,主要研究方向为智能规划、数据挖掘。

E-mail:chengkai911@126.com

戴成友(1982—),男,工程师,硕士,主要研究方向为作战规划、机器学习。

E-mail:376679530@qq.com

余晓晗(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为智能规划、多准则决策。

E-mail:yu_xiaohan@sina.cn

张 可(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为软件工程、数据挖掘。

E-mail:2387303531@qq.com