

基于多目标测量函数的规划解质量测评方法*

李伟生, 肖祖仁

(重庆邮电大学 计算机科学与技术研究所, 重庆 400065)

摘要: 智能规划中, 大部分规划器注重求解过程, 而缺乏对规划解质量的优劣进行分析。针对这一不足, 提出使用规划时间、规划长度、倾向约束、资源约束等判断依据构建出多目标测量函数, 对规划解的质量进行综合测评和优劣分析。实验表明, 该方法可行且具有实际意义。最后, 就未来的研究方向进行展望。

关键词: 智能规划; 倾向约束; 多目标测量函数; 质量测评

中图分类号: TP181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)10-3717-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.029

Method of plan quality evaluation based on multi-goal metric function

LI Wei-sheng, XIAO Zu-ren

(Institute of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the field of intelligent planning, most planners focus on the solving process, yet neglect to evaluate the quality of the result. This paper proposed a method of plan quality evaluation based on multi-goal metric function. It combined the multi-goal metric function with some certain measurement standards, such as planning time, solution length, preference constraints and resource constraints. The experimental results show that this method is meaningful and feasible. Finally, it summarized promising research directions of plan quality evaluation.

Key words: intelligent planning; preference constraints; multi-goal metric function; quality evaluation

0 引言

智能规划就是寻找一个有效动作序列, 将某个现实问题从一个已知的初始状态转换成满足特定条件的目标状态的过程, 这种有效动作序列称为规划解。大部分规划器可分成两类, 一类是领域无关的启发式规划器, 如 HSP^[1]、FF^[2]、LPG^[3] 和 fast-downward^[4] 等; 另一类是基于领域知识的领域约束规划器, 如 TLPlan^[5]、TALPlan^[6] 和 SHOP2^[7] 等, 它们是各类规划器中的代表作。然而上述规划器都存在一大不足之处, 即很少对规划解的质量进行综合测评及优劣分析。

现实中规划领域众多, 每一领域的规划问题又呈现出许多类型, 各种类型侧重方向不一, 规划目标也就不一样。目前, 规划问题一般分为 propositional(命题型)、temporal(时序型)、numeric(数值型)和 preferences(倾向控制型)四种。每种规划问题侧重的判断依据不一样, 如命题型规划侧重于求解长度最短的规划解, 而时序型规划侧重于求解时间最短的规划解。

不可否认, 现有的规划器都在各自领域或阶段有着不俗的表现, 能对某些特定的规划问题进行求解, 得到相应的规划解。然而它们关注的主要是求解的过程, 而很少对规划解的质量进行优劣分析, 同一个规划问题可能出现多个规划解, 并且这些规划解的长度或代价(如时间、内存开销等)可能不一样, 长度小且代价低的规划解质量明显优于那些长度大或代价高的规划解。所以, 对规划解的质量进行测评和优劣分析非常重要,

这可以帮助人们获取质量最优的规划解, 从而减小时间、空间或其他资源的开销。

本文重点阐述使用倾向控制等软性约束条件和规划时间、规划长度、资源约束等测量依据对规划解的质量进行测评和优劣分析的方法。倾向控制是一种软性约束, 它反映了研究人员对不同规划问题的主观认识和目标倾向。例如, 在积木领域(block domain)中, 当某一时刻有多个积木可供抓举时, 人们倾向于抓起重量最小的积木块; 物流领域(logistics domain)中, 从某一地点装载货物时, 人们倾向于使用本地现有的空闲卡车, 而不是从其他地点调运卡车等。为了实现这种软性约束, 需设计出相关测量函数作为判断依据。

本文首先介绍了约束可满足规划中的硬性和软性约束条件; 然后阐述了基于多目标测量函数的规划解质量测评方法; 接下来探讨了该方法的可行性和意义; 最后给出相关实验结论及工作总结。

1 约束可满足规划思想

智能规划中, 约束条件分为硬性约束条件和软性约束条件两大类。硬性约束条件是必须实现的目标, 如规划问题中设定的目标状态等, 而软性约束条件则是应该但不是必须实现的目标, 如领域约束规划中的领域知识、倾向控制规划中的倾向算子, 它们反映的是设计人员对某一特定规划问题的基本认识或主观倾向性。

收稿日期: 2012-03-11; **修回日期:** 2012-04-16 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61142011); 国家教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-11-1085)

作者简介: 李伟生(1975-), 男, 四川安岳人, 教授, 博士, 主要研究方向为智能信息处理、模式识别与信息融合; 肖祖仁(1986-), 男, 江西赣州人, 硕士, 主要研究方向为智能规划(xiaozuren1986@163.com)。

约束可满足规划(CSP)^[8]就是在原有的经典或非经典规划中添加约束条件,以使规划过程最大限度地满足这些条件,从而得出更贴近实际情况的规划解。现实中的规划问题复杂多变,有的对规划时间有限制,有的对规划长度有要求,有的对某一资源的最大使用数量也有约束,因此判断标准不一致,规划问题就会变得不可测,甚至无法得出规划解。

本文中使用的倾向控制语句对规划过程进行必要的软性约束,并连同规划时间、规划长度、资源限制等内容进行综合判断,设计出一种多目标测量函数对规划解的质量进行测评和优劣分析。

2 倾向控制原理及实现

2.1 基本原理

倾向控制是一种软性约束,它反映的是研究人员在设计规划系统时所表现出来的主观倾向性。例如,在物流领域中,人们倾向于使用燃油消耗最少的卡车,倾向于选择最不繁忙的路线等;在倾向控制规划(preference-based planning, PBP)^[9]中,人们为给定规划问题寻求最喜欢(most-preferred)的规划解,也即最满足倾向条件的规划解。

倾向控制规划的规划实例是一个二元组 (I, \leq) ,其中, I 是一个标准的经典规划问题, \leq 是满足传递性和自反性的 $P \times P$ 二元关系,而 P 表示规划问题 I 的所有规划解的集合;关系 \leq 用来比较规划问题 I 的任意两个规划解 P_1 和 P_2 的优劣。例如, $P_1 \leq P_2$ 表示“ P_1 至少和 P_2 一样好”,即“ P_1 优于 P_2 ,或者 P_1 和 P_2 一样好”;又如, $P_1 < P_2$ 表示“ P_1 优于 P_2 ”,也就是说,当 P_1 严格优于 P_2 时, $P_1 < P_2$ 才为真。

倾向控制规划的基本思想是,对给定的一个规划实例 $N = (I, \leq)$,要求找出满足下列条件的所有规划解的集合:

$$\bigwedge_N = \{p \in P \mid \text{不存在 } p' \in P, \text{使得 } p' < P\}$$

2.2 规划语言——PDDL3

PDDL3^[10](Gerevini & Long 2005)是PDDL2.2^[11](Edelkamp & Hoffmann 2004)的扩展版本,它增加了倾向控制语句等软性约束条件的描述,增强了对规划质量的表达。PDDL3是专门为第五届国际规划大赛设计的语言,从本届大赛开始,倾向控制规划方法开始浮出水面。

基于PDDL3的规划问题是一个多元组 $\langle I, G, A, P, M \rangle$,其中:

- a) I 是初始状态和初始数值变量组成的集合。
- b) G 是目标状态和目标数值变量组成的集合。
- c) A 是一系列动作的集合,并且该集合中的每个动作都包含一个前提条件集合(含命题条件和数值变量条件)和一个效果集合(含添加效果 eff_a^+ 、删除效果 eff_a^- 和数值效果 eff_a^{num})。

d) P 是一系列倾向控制算子的集合,即规划解倾向于达到的软性约束条件。倾向控制语句一般分为两大类:(a)非操作路径倾向语句,如目标倾向(goal preference)和前提条件倾向(precondition preference)等;(b)操作路径倾向语句,如时序扩展倾向(temporally extended preference),这种倾向控制出现在整个时序扩展过程中,用来控制规划的时序逻辑,包括(always f)(sometime f)(sometime-after f g)(at-most-once f)等。

e) M 是一个测量函数(metric function)的集合,它用来测

量使用不同倾向控制算子进行规划的代价。

2.3 倾向控制语句的实现

下面以积木领域和物流领域为例,介绍前提条件倾向、目标状态倾向和时序扩展倾向等倾向控制语句^[12]的实现。

2.3.1 前提条件倾向

前提条件倾向与时序无关,在动作的前提条件中定义,用来表述某个动作执行时需要满足的前提倾向条件。例如,下面的“light”是一个前提条件倾向,在动作“pickup”的前提条件中定义,用来表示“倾向于抓起更轻的积木块”。

```
(:action pickup
(parameters(? b-block))
(precondition (and (clear ?b)
(preference light (not (heavy ?b))))))
(:effect (holding ?b)))
```

每当抓起更重的积木块时,“light”倾向条件将遭受违背,违背的次数越多,规划解的代价也就越高。

2.3.2 目标状态倾向

目标状态倾向也与时序无关,在目标状态中定义,用来表述目标状态需要满足的倾向条件。以物流领域为例,下面的“truck”就是一个目标状态倾向,用来表示“倾向于使用本仓库的卡车”。

```
(:goal (and (delivered package1 depot1)
(preference truck (at truck depot1))))
```

该目标状态需满足一个硬性条件“包裹 package1 必须由仓库 depot1 交付”和一个软性倾向条件“卡车 truck 停在仓库 depot1”。

2.3.3 时序扩展倾向

PDDL3中,使用线性时序逻辑来定义时序扩展倾向和时序扩展约束条件,它们都在:constraints结构中进行表述。

```
(:constraints
(and
;;prefer to deliver priority packages first
(preference priority
(forall ?p1-prio-package ?p2-nonprio-package
(Sometime-before (delivered ?p1)(delivered ?p2))))
;;prefer economical trucks
(forall ?p-package ?t-truck)
(preference economy
(always (implies (loaded?p? t) (cheap? t))))
(metric minimize (+
(* 10 (is-violated priority))
(* 20 (is-violated econ))))))
```

上例中,倾向算子“priority”表示“有多个包裹待传递时,倾向于先传递优先级最高的那个包裹”;倾向算子“economy”表示“选择卡车时,倾向于使用最经济实惠的卡车”。在整个时序扩展过程中,“priority”和“economy”的倾向条件都可能被违背(is-violated),被违背的次数可以用来测量规划质量,违背次数越多,越背离倾向条件。

该处的测量函数(metric function)用来测量规划解的质量,它在很大程度上由规划问题所接收的倾向控制算子决定。在PDDL3中,用“is-violated preferName”来标志名为“prefer-

Name”的倾向算子是否被违背,不违背时取值为0,遭遇违背时取值为1。上例中,“倾向算子 economy 的重要性是 priority 的两倍”。

通常寻求倾向算子被违背次数最少的规划解,即最满足倾向愿望的规划解。然而在实际规划中,由于产生冲突或花费昂贵,使得一些倾向目标难以得到满足,这就要求灵活使用倾向约束,或设计出新的约束目标。

3 多目标测量函数的设计

倾向控制是一种软性约束,是应该但不是必须实现的目标。对于现实中复杂的规划问题来说,软性约束目标的实现是非常重要的,它与硬性约束目标一样,都反映了规划器求解问题的能力强弱。

为了实现这些软性和硬性目标,应尽量设计出全面有效的启发式测量函数,用于对规划解的质量进行全面考评和优劣分析,进而寻求质量最优的规划解,从而提高规划系统的整体效率。

现实中,对规划解进行质量评估时,存在许多判断标准,其中规划时间、规划长度、资源限值、倾向覆盖是四种不错的选择,只要灵活搭配,就能够构造出一个多目标融合的质量测评标准。

3.1 规划长度测量函数(L)

规划长度测量函数 $L(r)$ 对规划解 r 进行分析,返回 r 所包含的动作数目。对同一规划问题,规划解所含动作数目越少其质量越高,表示从初始状态到达目标状态越快捷。规划长度测量函数定义如下:

$$L(r) = (\text{number of actions in } r)$$

3.2 规划时间测量函数(T)

规划时间测量函数 $T(r)$ 对规划时间进行分析,返回规划求解所耗的时间。给定初始状态和目标状态,可能得出多种规划解,且所耗时间不尽相同,通常情况下找寻时间最短的规划解。规划时间测量函数定义如下:

$$T(r) = (\text{total time by } r)$$

3.3 资源约束测量函数(S)

有些规划问题对所使用的资源数量进行了限制,如最少最多开栈问题,给定栈的总数目 MAX_NUM_STACKS,要求按照给定的操作顺序完成排好所有对象顺序的入栈出栈工作,操作对象排序方式不一样,所用到的栈的数目可能不一样,且结果要求在不超出栈的限定数目的前提下,尽可能少地使用栈。这种问题需考虑资源的限制数目。资源约束测量函数定义如下:

$$S(r) = (\text{maximum resources used})$$

3.4 倾向控制测量函数(P)

当规划问题涉及到倾向控制这种软性约束时,就要对所有倾向算子进行测评。在 PDDL3 中,表达式“is-violated preferName”表示倾向算子“preferName”是否被违背,没有违背时返回0,被违背时返回1。这样,在整个规划解 r 中,被违背的倾向算子越少,质量越高,越满足软性约束条件。倾向控制测量函数定义如下:

$$P(r) = \sum w_i (\text{is-violated preference}[i])$$

其中: w_i 表示倾向算子 preference[i] 相对于其他倾向算子的重

要倍数。

3.5 综合质量测量函数(M)

目前,规划问题通常分为 propositional(命题型)、temporal(时序型)、numeric(数值型)、preferences(倾向控制型)四种。每种规划问题侧重的求解目标并不一样,如命题型规划侧重于求解长度最短的规划解,时序型规划侧重于求解时间最短的规划解,数值型规划侧重于求解使用资源最少的规划解,而倾向控制型规划则侧重于求解最符合倾向条件的规划解。

然而现在的规划问题越来越复杂多变,不再局限于单纯的命题型、时序型、数值型或倾向控制型。因此,设计一个综合的质量测评函数已是必不可少的,这个综合测量函数既要满足单纯类型规划问题的质量测评,又要满足复杂类型规划问题的质量测评。

为了实现这一目标,引入一个权值向量 factor,用来存放函数 L, T, S, P 在综合测量函数 M 中所占的比重,分别标记为 factor_L、factor_T、factor_S、factor_P,这一组值可以根据各种测量目标在整体规划中的重要程度事先公议得出,当然,不能违背具体问题具体分析的原则。上述每个比重 factor[i] $\in [0, 1]$,综合测量函数定义如下:

$$M(r) = \lambda_l \text{factor}_L \times L(r) + \lambda_t \text{factor}_T \times T(r) + \lambda_s \text{factor}_S \times S(r) + \lambda_p \text{factor}_P \times P(r)$$

其中: $\lambda_l, \lambda_t, \lambda_s, \lambda_p$ 是四种不同规划类型的判断标志,取值为0或者1。

4 基于倾向控制和多目标测量的规划解质量测评方法

4.1 规划解质量测评可行性分析

首先,通过下面的“下班—回家”例子说明上述函数的可行性及意义。

假设某人下班后,在回家途中有能力完成三件事情,即 job₁ = 喝咖啡、job₂ = 看杂志、job₃ = 坐车回家。针对这个问题,假设存在这样的软性约束条件:

每个人都倾向于在咖啡时间(coffee-break)与其他人一起去咖啡室喝杯咖啡(social-coffee),而不是自己独自一人选择其他时间去,因为在非咖啡时段,咖啡室主要供应果汁和热茶,这间泡咖啡人手不足,需耐心等待;每个人都倾向于喝完咖啡后再浏览一本杂志(review-magazine),但是浏览杂志没有喝咖啡重要;每个人都倾向于在喝完咖啡、浏览杂志后坐上快速公车(fast-bus)回家,如果一下班就去坐车,只能坐上慢车,这就是为什么大家倾向于先喝杯咖啡、看本杂志后再上车的原因,然而不管怎么说,回家才是最重要的。该例子的软性约束描述如下:

```
( ;constraints
  (and
    ;;prefer to have a coffee
    (preference drink-coffee
      (sometime (at coffee-bar)))
    ;;prefer to have a coffee at coffee-break
    (preference social-coffee
      (sometime (and (at coffee-bar) (coffee-break))))
    ;;prefer to review a magazine
```

```
(preference review-magazine (review magazine1))
;;prefer to take the fast-bus
(preference fast-bus
(sometime (get-on fast-bus1))))))
(metric minimize (+
(* 6 (total-time))
(* 2 (plan-length))
(* 4 (is-violated social-coffee))
(* 2 (is-violated drink-coffee))
(is-violated review-magazine)
(is-violated fast-bus)))
```

注意,该例子与资源约束无关,所以,令 factor_S = 0,而 factor_L、factor_T、factor_P 可以根据规划问题的具体要求取不同的值。

现在考虑四个规划解 P₁、P₂、P₃ 和 P₄,某人采取其中任何一种方法都能顺利地返回家中。

P₁:下班后不喝咖啡,不看杂志,直接搭慢车回家,花费时间为 5 h;

P₂:下班后与其他人一起在咖啡时间去咖啡室喝了一杯咖啡,然后浏览了一本杂志,之后搭上快速公车回家,花费时间为 4.5 h;

P₃:下班后自己独自一人在非咖啡时间去咖啡室喝了一杯咖啡,然后浏览了一本杂志,之后搭上快车回家,花费时间为 4.8 h;

P₄:下班后没去喝咖啡,只浏览了一本杂志,此时快车没到,只搭上慢车回家,花费时间为 5.3 h。

四个规划解的质量测评结果如表 1 所示。

表 1 “下班一回家”例子测评结果

plan	quality = plan_metric
P ₁	6×5.0 + 2×1 + 4×1 + 2×1 + 1 + 1 = 40.0
P ₂	6×4.5 + 2×3 + 4×0 + 2×0 + 0 + 0 = 33.0
P ₃	6×4.8 + 2×3 + 4×1 + 2×0 + 0 + 0 = 38.8
P ₄	6×5.3 + 2×2 + 4×1 + 2×1 + 0 + 1 = 42.8

从表 1 可知,规划解 P₂ 的综合测量值最小,是四个规划解中质量最好的,也是最符合软性约束条件的;在相同软性约束条件下,P₄ 的质量最差。

另外,如果单纯考虑规划时间,P₂ 是最优的(时间最短,为 4.5 h);如果单纯考虑规划长度,P₁ 是最优的(长度最短,为 1);如果单纯考虑软性约束条件,P₂ 和 P₃ 是最优的(倾向算子被违背次数均为 0),这样一来,标准不统一,目标不明确,无法进行测量。

使用综合测量值进行判断就能够避免这种不统一的混乱局面出现,只要事先议出各种目标在整个函数中的比重,就能得出一个被广为接受的规划解。如果规划问题仅属于某一类型的规划,那么其对应的测量函数比重取 1,其他函数比重取 0。例如,如果规划问题仅属于时序型规划,那么规划时间测量函数比重取 1,其他函数比重取 0。当某一规划问题属于多类型的综合问题时,各测量函数的比重可由测评专家组议得出。

综上,基于多目标测量函数的规划解质量测评方法是可行的,且是有意义的。

4.2 规划解质量测评设计理念及实现

对于多目标规划问题,首先为每种类型设计一个目标测量

函数;然后根据各个目标的重要程度去均衡这些目标,设计出一种综合测量函数,以期得到一个能被接受的有效方案,如下所示:

$$M(r) = \sum_i \lambda_i \times \text{factor}[i] \times F_i(r)$$

其中: λ_i 为第 i 个目标测量函数 $F_i(r)$ 的判断标志,符合该类型时取值为 0,否则为 1;factor[i] $\in [0,1]$ 是第 i 个目标测量函数 $F_i(r)$ 在综合测量中所占的比重; $F(r) = \{L(r)、T(r)、S(r)、P(r)\}$ 。

使用上述理念对某个规划问题进行求解,当出现 n 个规划解时,选择综合测量函数取值最小的那个规划解,即

$$\text{bestPlanMetric} = \text{minimize} \{M(r_j) | j = 1, \dots, n\}$$

其中: $M(r_j)$ 为第 j 个规划解的综合测量值。当某两个规划解的质量测评值相等时,可使用“单位时间规划长度”来进一步比较两者的质量,定义如下:

$$\text{单位时间规划长度} = L(r)/T(r)$$

基于倾向控制和启发式测量的规划解测评方法实现过程如下所示:

```
// 设置各种权值及判断标志
// 求解 T(r):total_time;
// 求解 L(r):num_actions;
// 求解 S(r):num_resources;
// 求解 P(r):constraints_metric();
// 求取综合测量函数的值
if (dis_gmetric)
{
fprintf (fp, "\n; Best plan with metric value. ");
fprintf (fp, "\n; TotalTime of Plan: %f", total_time);
fprintf (fp, "\n; Number of Actions: %d", num_actions);
fprintf (fp, "\n; Number of Resources: %d", num_resources);
Best_Metric = minimize(
is_timed * Factor_T * T(r)
+ is_proposition * Factor_L * L(r)
+ is_resources * Factor_R * S(r)
+ is_preference * Factor_P * P(r));
fprintf (fp, "\n; Best Plan Metric: %.3f", Best_Metric);
}
```

5 实验结果及分析

为了验证本测量方法的可用性和有效性,本文在 Metric-FF^[13] 规划器的改进版本 Sgplan5^[14,15] 上作了相应改变,定义了若干处理函数以实现上述测评过程,规划中使用基于有用动作 (helpful-action) 的 best-first 搜索策略。

实验中使用了多个规划领域,包括 trucks、TPP、storage_rovers、openstacks 等,每个规划领域都涵盖了多种类型的规划问题,它们均下载自国际智能规划大赛官方网站。实验结果与第五届国际规划大赛(IPC5)^[16] 结果是吻合的,因此,该方法是可行的,且是有实际意义的。

下面两个表为 trucks 规划领域的部分实验结果,其中表 2 为时序型规划问题的测评结果,表 3 为包含倾向控制等软性约束条件的复杂型规划问题的测评结果。各种权值及判断标志设置如下:

a)表 2 参数

factor_T = 0.95, factor_L = 0.75, factor_S = 0, factor_P = 0; is_timed = 1, is_proposition = 1, is_resources = 0, is_preference = 0。

b) 表 3 参数

factor_T = 0.75, factor_L = 0.75, factor_S = 0, factor_P = 0.95; is_timed = 1, is_proposition = 1, is_resources = 0, is_preference = 1。

表 2 Timed 型问题测评结果

problem	total_time	num_actions	num_resource	constr_metric	best_Metric
P01	0.01	15	-	-	11.26
P02	0.01	20	-	-	15.01
P03	0.02	20	-	-	15.01
P04	0.03	26	-	-	19.52
P05	0.02	29	-	-	21.76
P06	0.06	34	-	-	25.54
P07	0.04	38	-	-	28.53
P08	0.06	41	-	-	30.79
P09	0.12	46	-	-	34.59
P10	0.07	52	-	-	39.05
P11	0.07	50	-	-	37.55
P12	0.12	56	-	-	42.09
P13	0.20	65	-	-	48.89
P14	0.27	73	-	-	54.94
P15	0.21	76	-	-	57.75

表 3 Preferences 型问题测评结果

problem	total_time	num_actions	num_resource	constr_metric	best_metric
P01	0.01	15	-	0	11.26
P02	0.02	18	-	2	14.74
P03	0.01	24	-	0	18.01
P04	0.02	28	-	0	21.01
P05	0.02	32	-	2	24.71
P06	0.07	39	-	3	30.67
P07	0.16	39	-	3	30.72
P08	0.51	40	-	7	35.42
P09	0.61	47	-	7	40.46
P10	0.46	57	-	4	44.66
P11	1.47	61	-	6	49.95
P12	2.20	61	-	8	52.24
P13	1.87	65	-	11	57.76
P14	3.65	70	-	4	55.63
P15	5.00	79	-	13	71.31

6 结束语

本文针对多数规划器缺乏对规划解的质量进行综合优劣分析这一不足,提出了使用倾向控制等软性约束条件以及规划时间、规划长度、资源约束等测量依据对规划解的质量进行综合测评和优劣分析的方法,该方法立足多目标规划,寻求一个综合测量函数,根据各个目标在综合函数中所占的比重进行权衡优化,最终实现对规划解的质量进行优劣分析。实验结果表明该方法是可行的。

当然,现实中的规划问题层出不穷,新的规划解质量判断标准也会随之出现,这就给了本方法一个很大的扩展空间,只要有合适的规划解质量测评依据,就能与本文中的综合测量函数组合起来,设计出新的更全面的综合测量函数,应用于具体

实践。

本文使用的多目标测量函数是线性函数,在未来可扩展成为非线性函数,如增加对期望值、方差值等信息进行精确测量,或者结合概率规划的相关技术进行模糊测量等。另外,学习型规划技术也是一个不错的研究方向,规划器在求解过程中、自主学习、自主判断规划解的质量优劣。

参考文献:

- [1] BONET B, GEFFNER H. Planning as heuristic search[J]. *Artificial Intelligence*, 2001, 129(1-2):5-33.
- [2] HOFFMANN J, NEBEL B. The FF planning system: fast plan generation through heuristic search[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2001, 14(1):253-302.
- [3] GEREVINI A, SERINA I. LPG: a planner based on local search for planning graphs with action costs[C]//Proc of the 6th International Conference on Artificial Intelligence Planning and Scheduling. 2002: 281-290.
- [4] HELMERT M. The fast downward planning system[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2006, 26(1):191-246.
- [5] BACCHUS F, KABANZA F. Using temporal logics to express search control knowledge for planning[J]. *Artificial Intelligence*, 2000, 116(1-2):123-191.
- [6] KVARNSTROM J, DOHERTY P. TALplanner: a temporal logic based forward chaining planner[J]. *Journal of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 30(1-4):119-169.
- [7] NAU D, AU T C, ILGHAMI O, et al. SHOP2: an HTN planning system[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2003, 20(1):379-404.
- [8] DO M B, KAMBHAMPATI S. Planning as constraint satisfaction: solving the planning graph by compiling it into CSP[J]. *Journal of Artificial Intelligence*, 2001, 132(2):151-182.
- [9] BAIER J A, McILRAITH S A. Planning with preferences[J]. *Journal of AI Magazine*, 2008, 29(4):25-36.
- [10] GEREVINI A, LONG D. Plan constraints and preferences in PDDL3, technical report RT-2005-08-07[R]. [S. l.]: Dept. di Elettronica per l'Automazione, Universit' a di Brescia, 2005.
- [11] EDELKAMP S, HOFFMANN J. PDDL2.2: the language for the classic part of the 4th international planning competition, technical report 195[R]. Freiburg: Institute fur Informatik, 2004.
- [12] GEREVINI A, LONG D. Preferences and soft constraints in PDDL3[C]//Proc of ICAPS Workshop on Planning with Preferences and Soft Constraints. 2006:46-53.
- [13] HOFFMANN J. The metric-FF planning system: translating" ignoring delete lists" to numeric state variables[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2003, 20(1):291-341.
- [14] HSU C W, WAH B W, HUANG Rou-yun, et al. New features in SGPlan for handling preferences and constraints in PDDL3.0[C]//Proc of the 5th International Planning Competition, International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2006.
- [15] HSU C W, WAH B W, HUANG Rou-yun, et al. Handling soft constraints and goals preferences in SGPlan[C]//Proc of ICAPS Workshop on Preferences and Soft Constraints in Planning. 2006.
- [16] HASLUM P. Quality of solutions to IPC5 problems-preliminary results and observations[C]//Proc of ICAPS Workshop on the Planning Competition. 2007.