

李延军：关于不确定规划的动态知识逻辑（2016）

本论文从动态知识逻辑的角度研究了不确定规划问题，用一种改良的动态知识逻辑刻画了不确定规划中的推理。借助逻辑语言丰富的表达能力，本论文将标准的不确定规划问题推广到更加具有一般性的不确定规划问题，并将推广后的不确定规划问题归约为该动态知识逻辑上的模型检测问题。进而通过对该逻辑系统上的模型检测问题的研究，证明推广后的不确定规划问题与标准的不确定规划问题具有相同的复杂度。本论文还研究了该动态知识逻辑上的可满足问题，给出了判定该逻辑系统的任意公式是否可满足的具体算法，并证明了其可满足问题是可判定的。

经典的规划问题是指在一个状态转移系统中，是否存在一个动作的线性序列使得在初始状态上依次执行完该动作序列上的动作之后必将到达目标状态集中的某个状态。不确定规划的不确定首先是指初始状态是不确定的，即初始状态可能是初始的不确定状态集——也称为主体的信念状态——中的任何一个状态。其次，不确定规划中的状态转移系统具有非确定性(nondeterministic)，即在一个状态上执行某个动作后可能有多个下一状态。因此，不确定规划问题是指是否存在一个动作的线性序列，使得无论在不确定状态集上哪个状态上执行该动作序列，也无论系统的非确定性如何，最终都必将到达目标状态集中的某个状态。

要刻画主体在不确定规划中的推理，关键是描述动作执行所带来的主体信念状态的变化，这正是动态知识逻辑的内容。标准的动态知识逻辑是在知识逻辑的基础上加入动作模型，利用动作模型对知识模型的更新来描述动作执行对主体的知识造成的影响。动态知识逻辑的长处在于描述多主体情况下动作执行带来的知识尤其是高阶知识的变化。（这里的高阶知识是指类似“我知道你不知道我知道...”这样的知识。）但是对于只有单个主体的不确定规划来讲，标准的动态知识逻辑并不是很合适，因为它需要用复杂的动作模型来表示在不确定规划中非常简单直观的状态转移系统。本论文所提出的逻辑系统结合了人工智能领域和动态知识逻辑两方面的优点：首先，逻辑模型直接由状态转移系统和主体当前的信念状态组成；其次，继承了动态知识逻辑的精神在逻辑语义上通过更新模型的方法来记录执行动作带来的主体信念状态的变化。

基于逻辑角度的不确定规划研究有一个天然的优势，即逻辑语言有着接近于自然语言的丰富的表达能力。从逻辑的角度看，规划问题的目标可以表达为到达使得目标公式为真的状态上，而目标公式可以用逻辑语言表示的任意公式。这不仅仅是表达方式的改变，更是可以带来实质改变的对标准不确定规划问题的推广。例如，对于标准不确定规划而言规划的目标是使得主体最终信念状态是目标状态集的任意子集即可，但是如果规划的目标用一个带否定性知识的逻辑公式 $\neg Kp$ 来表示，那么主体最终信念状态不仅需要是目标状态集的子集而且还要至少包含一个 p 为假的状态。

不仅如此，本论文中还将规划目标表示为带动作算子的公式。例如，可以用公式 $[a^*]p$ 表示规划

的目标是到达这样的状态使得主体在该状态下无论再做多少次动作 a 命题 p 都始终为真。另外，本文中的动态知识逻辑还可以表达对规划问题的解（即动作的线性序列）的形式上的限制。例如，规划的目标不仅是找到一个可以保证到达目标状态的动作序列，而且如果动作 a 在这个序列中出现的话那么它一定出现在动作 b 的后面。本论文中从目标公式和规划问题的解的形式两个方面将标准的不确定规划问题推广到更加一般化的情况，而且将这种一般化的不确定规划问题归约为该动态知识逻辑上的模型检测问题。

一般情况下对不确定规划问题的推广都会带来问题复杂度的增加。但是本论文通过对逻辑系统的模型检测问题的研究，证明了本论文对标准不确定规划的推广并没有带来复杂度的增加，该动态知识逻辑的模型检测问题与标准的不确定规划问题具有相同的复杂度。另外，本论文还研究该动态知识逻辑上的可满足问题，证明了该逻辑的可满足问题是可判定的。