

基于计划识别的态势估计方法研究

李伟生^{①②} 王三民^② 王宝树^②

^①(重庆邮电学院计算机科学与技术研究所 重庆 400065)

^②(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

摘要 针对 Kautz(1987)计划识别方法在控制机制上的不足,讨论了基于规划知识图的计划识别方法;以一阶谓词逻辑为形式语言,研究了战术智能规划的一个实例,给出了一种集成了战术智能规划系统和战术计划识别系统的态势估计模型。该模型通过动态建立计划库突破了 Kautz 计划识别方法中封闭世界假设的限制,可以对敌军的行动目标和行动计划提出合理的假设,并在此基础上预测敌军的未来行为,为指挥决策提供依据。

关键词 态势估计, 规划, 计划识别, STRIPS 系统

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)03-0532-05

Study of Situation Assessment Method Based on Plan Recognition Theory

Li Wei-sheng^{①②} Wang San-min^② Wang Bao-Shu^②

^①(Institute of Computer Science and Technology, Chongqing Univ., of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Computer Science and Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract For the shortage of plan recognition method presented by Kautz(1987) in controlling mechanism, a plan recognition method based on planning knowledge graph is discussed in detail. Using first-order predicate logic as formal language, an instance of tactical intelligent planning is analyzed and a situation assessment model combined tactical intelligent planning system and a tactical plan recognition system are proposed. The plan library, which is dynamic set up, could break through the limit of closed world hypothesis in Kautz's plan recognition method. The model is capable of supplying reasonable hypothesis for enemy's action goal and plan and projecting enemy's future action, which is helpful to command decision.

Key words Situation assessment, Planning, Plan recognition, STRIPS system

1 引言

态势估计^[1]是对战场上战斗力量部署及其动态变化情况进行解释,推断敌方意图,预测将来活动,并提供最优决策依据与支持资源分配的过程。在C⁴ISR信息融合系统中,态势估计处于第二级,它接受一级融合的结果,从中抽取对当前军事态势尽可能准确、完整的感知,为指挥员决策提供直接的支持。而计划识别是根据代理的行为序列来推断代理所追求目标的过程,着重于对当前已发生行为的分析和抽象,因而对动态问题有很好的适应性,与态势估计中通过观察、分析战场中军事单元的动态行为来识别其计划的要求相一致,因此,态势估计实质上是一个计划识别过程。

计划识别系统的输入是代理的行为,输出为代理所追求的目标以及实现这一目标的计划。在智能规划领域的机器人

动作规划的实例中,我们发现表示计划识别要素的基本思想,比如战术世界模型、作战计划、作战目标等。为了深入研究计划识别模型,文中以一阶谓词系统为形式语言,给出了一种集成了战术智能规划系统和战术计划识别系统的态势估计模型。该模型通过动态建立计划库突破了 Kautz 计划识别方法中封闭世界假设的限制,可以对敌军的行动目标和行动计划提出合理的假设,并在此基础上预测敌军的未来行为。

2 计划识别

规划是寻求能够达到所希望目的的行为(或计划)的序列的过程。计划识别和规划是对两个相逆问题的求解,计划识别是根据代理的行为序列来推断代理所追求的目标的过程,它根据观察到的片断、琐碎的现象,推出具有合理因果关系的、完整而全面的计划描述。

2.1 计划识别系统

一个规划 P 可以表示为

$$P = (G, \{G_1, \dots, G_m\}, \{C_1, \dots, C_m\}) \quad (1)$$

其中 G 是执行该规划所能达到的目的的描述, $\{G_1, \dots, G_m\}$ 是与实现 G 相关的一系列事件(子目的)的集合, $\{C_1, \dots, C_m\}$ 是约束集。约束集可以分为 4 个子集^[2]: 前提(Precondition)子集, 用于描述执行规划的初始状态; 结果(Effect)子集, 表示执行规划后的环境状态; 等式(Equality)子集, 描述事件间的相等关系, 比如多个事件由同一个代理发生; 时间(Temporal)子集, 用于表示事件之间的时间约束关系。

计划识别系统的输入是顺序流^[3], 它采用“等和看”(Wait and See)策略, 根据新观察到的行为来修改有关代理的当前假设规划, 并依据此假设规划产生对下一个要观测行为的预测, 这些预测可能被满足, 也可能不被满足。若这些预测不满足, 则需要利用观测到的违反预测的行为对假设进行修改。通过修改, 使当前的规划与观测行为相符。基于此, 计划识别过程首先产生少量可能的规划假设, 这些假设为输入的观测提供进一步的信息时被确定真假。其次, 依据当前的假设, 推测下一步要观测的行为, 若在后续的观测中违反了预测的行为, 则触发修改过程以维护规划假设的正确性。

2.2 计划识别表示

Kautz^[4]首次独立于领域和算法, 形式化地定义了计划识别问题的构成和求解。其主要思想是: 将目的、子目的、行动称为事件, 建立事件规划层次; 定义顶层事件为END事件, 表示不是任何事件的组成部分, 即该事件是计划识别的终结, 以此作为推导的控制机制; 计划识别的工作是将观测行为同该规划层次进行匹配来获得代理顶层目标的过程, 即描述产生观测的END事件的问题。

计划识别的规划层次按照抽象和分解两种关系进行组织, 定义为三元组 $H = \langle P, Dec, Ab \rangle$ 。 P 是该层次 H 中规划的集合, Dec 表示分解层次 $H_D = \langle p, A_p, C_p \rangle$, 其中 $p \in P$ 是一个规划, A_p 是行动(Action)的集合, C_p 是关于这些行动的限制条件如 A_p 中不同行动之间的时间、空间等关系, 因此 Dec 限制了一个规划 p 如何被可能的行动实现的完全知识, 它是一种部分关系(Part of), 表示非END事件发生作为其他事件的组成部分。 Ab 表示抽象层次 $H_A = \langle p_1, p_2 \rangle$, 其中 $p_1, p_2 \in P$, 表示规划 p_1 是规划 p_2 的子类型(IS-A)。这样, 规划之间可以表现为整体与部分、抽象与具体两种形式^[4,5]:

(1)整体与部分关系表达式 设 $\Psi(x)$ 是一个抽象规划,

$\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x)$ 是 $\Psi(x)$ 的所有组成规划, 则

$$\forall x \Psi(x) \supset \varphi_1(f_1(x)) \wedge \varphi_2(f_2(x)) \wedge \dots \wedge \varphi_n(f_n(x)) \quad (2)$$

其中 f_1, f_2, \dots, f_n 是位置或映像函数, 表示整体和部分之间的映射关系, 分别返回规划的一个组成部件(子事件)。

(2)抽象与具体关系表达式 设 $\Psi(x)$ 是一个抽象规划, $\varphi(x)$ 是 $\Psi(x)$ 的一个具体规划, 则

$$\forall x \varphi(x) \supset \Psi(x) \quad (3)$$

实际上, Kautz 的规划层次关系就是关于代理行为、意图知识的图形描述。一个事件层次的创建者必须明确层次中那些事件是 END 事件从而定义领域中可能的高层目标。抽象层次的定义基于规划分层的封闭世界的假设: 假定输入层次完全描述了被观测代理的行为; 假定最少可能的 END 事件发生。Kautz 将这样导出的封闭世界分层模型称为覆盖模型, 覆盖模型构成了计划识别的基础。给定封闭的分层模型, 识别问题是一个寻求所观测行为的最简洁的解释的过程。概括来说, Kautz 定义了输入输出之间的语义关系, 基于用户输入、行为的知识、一些清晰的封闭世界和简单的假设, 上述关系决定那个计划作为识别结果被演绎证明出来。

2.3 计划识别过程

计划识别过程通常可分为两步: 首先建立求解领域的计划库, 描述求解目标及达到该目标的计划连同实现该计划的代理执行的完整行动序列; 其次, 观察者解释代理的行为, 按照行为在获得目标中的作用来推理猜测代理的目的并且基于该目的来预测代理随后的行为, 即计划推理。Kautz 把抽象于 END 事件的规划认为是具有独立意义的规划, 即规划推导的终端, 以此作为推导的控制机制。对于这种表示, 其困难主要在于难以区分具有独立意义的规划的界限, 即什么样的规划才可以抽象于 END 是一个难以确定的问题。为了克服这一不足, 文献[5]提出一种基于规划知识图的方法来控制推导过程。

规划知识图是一个有向无环的“与或”(AND/OR)图, 如果一个父结点与其后继结点之间是抽象与具体的关系时, 这些后继结点称为“或”结点; 如果一个父结点与其后继结点之间是整体与部分的关系时, 这些后继结点称为“与”结点。规划知识图没有使用 END 这类特殊规划, 而是采用为每个规划提供一个支持程度的方法来确定可识别的候选规划。设 $\Psi(x)$ 是一个抽象规划, $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x)$ 是 $\Psi(x)$ 的所有组成规划, 即 $\forall x, \Psi(x) \supset \varphi_1(f_1(x)) \wedge \varphi_2(f_2(x)) \wedge \dots \wedge \varphi_n(f_n(x))$, 使用位置或映像函数 f_1, f_2, \dots, f_n 来表示规划的组成部件对规划的支持程度, 通过这种方式, 求解的过程可以控制在任何层次上, 从而找到置信度较高的一个规划。使用 $P(B|A)$ 来表示规划 A 对规划 B 的支持程度, 有下面的等式成立:

(1)如果规划 A_i 是规划 B 的组成规划, 则 A_i 对 B 的支持程度 $P(B|A_i) \leq 1$, 若规划 B 共有 m 个组成规划 $A_i, i=1, 2, \dots, m$, 则这 m 个组成规划一起对 B 的支持程度为

$$P(B | \bigwedge_{i=1}^m A_i) = \sum_{i=1}^m P(B | A_i) = 1;$$

(2) 具体规划 A 对它的抽象规划 B 的支持程度 $P(B | A) = 1$, 即出现一个具体类型的规划也意味着出现其抽象类型的规划, 因为具体规划是抽象规划的一种特例。

文献[5]把观察到的现象 A 出现的可能性作为 1, 而在实际系统中得到的信息往往是不精确或不确定的, 即在态势估计系统中, A 出现的可能性应由检测(比如模糊检测)到的发生事件的实际结果输出; 该文在计算规划的组成规划或具体规划出现时, 其可能性加上了该规划本身的置信度, 本文认为是不合适的, 因为这与全概率或条件概率的思想是不一致的, 规划出现的可能性可根据下面的式子计算得出^[6]:

(1) 若规划 B 共有 m 个组成规划 A_i , $i = 1, 2, \dots, m$, 规划 A_i 出现的可能性为 $P(A_i)$, 则规划 B 出现的可能性为

$$P(B) = P(B | \bigwedge_{i=1}^m A_i) P(A_i) = \sum_{i=1}^m P(B | A_i) P(A_i) \quad (4)$$

(2) 若抽象规划 B 有 n 个具体规划 A_i , $i = 1, 2, \dots, n$, 规划 A_i 出现的可能性为 $P(A_i)$, 则规划 B 出现的可能性为

$$P(B) = \bigvee_{i=1}^n P(B | A_i) P(A_i) = \bigvee_{i=1}^n P(A_i) \quad (5)$$

3 基于 STRIPS 系统的计划识别模型

3.1 STRIPS 规划系统

STRIPS 系统^[7]把行动表示为算子。一个算子由一个名字、一个参数列表和分别称为前提(preconditions)、删除列表(delete-list)、添加列表(add-list)的 3 组公式组成。其中, 前提由一组合取的逻辑公式组成, 用来描述执行这项操作必须满足的条件; 删除列表用于描述执行这个算子后必须从状态模型中删除的一组公式; 添加列表用来描述执行这个算子后必须从状态模型中增加的一组公式。

规划问题的初始和最终世界状态分别称为初始状态和目标状态。规划系统的推理机制就是在初始状态下, 找到满足目标状态的行动序列。STRIPS 系统可以使用从开始到目标的向前搜索, 或者用从目标回到开始的向后搜索来达到对状态空间的求解。这两种规划方法分别称为进步规划和回归规划。STRIPS 系统的输出是实例化的算子序列, 这些算子所对应的行动将达到给定的目标状态。文献[7]对向前和向后这两种搜索算法的效率进行了讨论, 由于向前搜索没有考虑应用哪个规划到哪个实例的启发性, 在状态描述和规则数量巨大时是难以实现的, 因此可能没有向后搜索有效。向后搜索算法可描述如下:

步骤 1 从目标状态出发;

步骤 2 选择执行结果可以达到某个子目标的算子;

步骤 3 使用算子的 preconditions 替换子目标;

步骤 4 重复步骤 2, 步骤 3, 直到新的状态满足初始状态为止。

3.2 基于 STRIPS 系统的战术计划识别

给定世界初始状态, 通过规划推理可以寻求能够达到希望目的状态的行为序列(计划)。基于此, 我们可以这样进行战术计划识别: 首先, 根据当前状态建立对目标状态的假设, 并通过规划推理产生由初始状态到目标状态的可能计划; 然后对实时获得的信息进行预处理, 把数据转换为相应的行动, 并在计划库中搜索包含了这些发生的行动的计划, 并把这些计划作为对蓝方行动计划的假设。随着新信息的输入得到新的行动, 这一过程得以继续, 如果假设计划中不包含行动, 则该假设成立的可能性会减少; 反之, 如果其中仍包含行动, 则检查附加在该计划中行动间的约束关系, 比如, 它们应该是同一个代理的行动, 在时序上的先后关系等等。根据这些限制可以计算这些行动与该计划的吻合程度, 直到某一假设计划对目标的支持程度达到了一定的阈值。基于 STRIPS 系统的战术计划识别模型如图 1 所示。

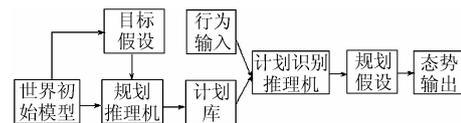


图 1 基于 STRIPS 系统的战术计划识别模型

图 1 所示的模型先对敌军的行动目标进行假设, 再通过规划推理产生相应的行动计划假设, 这一模型不仅能补充一些我们没观察到而又实际发生的现象, 同时可对敌军的未来行为进行预测。下面以一阶谓词逻辑为形式语言, 来研究战术智能规划和战术计划识别的一个实例。

设蓝方的一个运输船队将要通过海域 Z , 海域 Z 的地形及态势简图如图 2 所示, p_1 , p_2 是两条航道, A , B 是两个由红方扼守的岛屿, C 是蓝方一基地。 p_1 的部分航段在 A 的火力范围之内, p_1 在 B 的火力范围之外; p_2 的部分航段在 B 的火力范围之内, p_2 在 A 的火力范围之外; A 在 B 的火力范围之外, B 在 A 的火力范围之外。为了打通 p_1 或 p_2 航道, 蓝方拟派出轰炸机以攻击 A 或 B ^[8]。首先, 轰炸机需要经过飞行接近 A 或 B , 使 A 或 B 在它的攻击范围之内, 然后实施攻击。

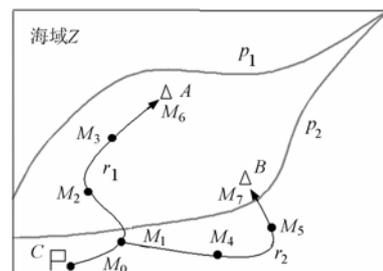


图 2 海域 Z 的地形及态势简图

设蓝方轰炸机可从西南方向沿航迹 r_1 攻击 A 或从东南方向沿航迹 r_2 攻击 B ，为了表示轰炸机的飞行航迹，我们采集一定的点，用点的序列来表示航迹，两个点之间没有其他的采样点。对于岛屿上火力而言，至少有两种状态：已被毁坏和运作良好；对于轰炸机而言，至少有 4 种状态：着陆、飞行、可攻击、已毁坏；轰炸机是否处于“可攻击”状态，主要取决于它是否有足够的弹药。轰炸机与岛屿之间的距离决定岛屿是否在轰炸机的攻击范围之内，因此有必要在系统中引入距离谓词。此外，系统还包括时间谓词等。该问题的目标可表示为：

$STATUS(A, DESTROYED) \vee STATUS(B, DESTROYED)$

限于篇幅，这里不列出该问题包含的谓词、所需的行动算子和世界初始模型(与地形和战术目标有关的事实)。由于目标状态是析取的形式，可以将其分成两个子目标分别求解。通过规划推理，可以得到下述两个实现上述目标的计划：

计划 P_1 (攻击 A) 中的行动-目标序列：

- (A_{00})TAKEOFF(Bomber)
- (G_1)STATUS(Bomber, FLYING)
- (A_{01})MOVE(Bomber, M_0, M_1)
- (G_2)OBJECTATPOINT(Bomber, M_1)
- (A_{12})MOVE(Bomber, M_1, M_2)
- (G_3)OBJECTATPOINT(Bomber, M_2)
- (A_{23})MOVE(Bomber, M_2, M_3)
- (G_4)OBJECTATPOINT(Bomber, M_3)
- (A_{36})ATTACK(Bomber, A)
- (G_5)STATUS(A , DESTROYED)

计划 P_2 (攻击 B) 中的行动-目标序列：

- (A_{00})TAKEOFF(Bomber)
- (G_1)STATUS(Bomber, FLYING)
- (A_{01})MOVE(Bomber, M_0, M_1)
- (G_2)OBJECTATPOINT(Bomber, M_1)
- (A_{14})MOVE(Bomber, M_1, M_4)
- (G_3)OBJECTATPOINT(Bomber, M_4)
- (A_{45})MOVE(Bomber, M_4, M_5)
- (G_4)OBJECTATPOINT(Bomber, M_5)
- (A_{57})ATTACK(Bomber, B)
- (G_5)STATUS(B , DESTROYED)

其中，算子 TAKEOFF, MOVE 和 ATTACK 分别表示起飞、移动和攻击，谓词 STATUS 和 OBJECTATPOINT 分别表示实体的状态和位置。现在，将这两个计划存入计划库。为了对计划库有更清楚的了解，使用规划知识图来表示这两个计划，如图 3 所示，图中以圆弧标出的表示与结点。图中 s_1, s_2, \dots, s_{10} 为位置或映像函数，表示了各个行动对目标的支持程度。

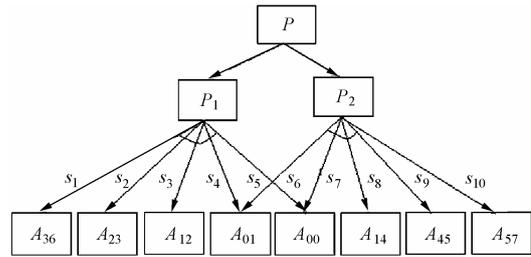


图 3 求解问题的规划知识图描述

下面讨论，在相同的初始世界模型前提下，如何运用这个计划库来进行蓝方行动计划的识别。假设红方根据敌情通报，在时刻 t_0 蓝方一架轰炸机从基地 C 起飞(图 2)，向红方目标进发，即发生了行动 A_{00} (在此暂不考虑行动间的约束关系，并且认为行动发生的概率为 1)。那么，红方指挥员很自然地会假设，蓝方轰炸机为了打通航道，可能会进攻岛屿 A 或 B 。由于牵涉到计划假设概率分配的问题，考虑比较简单的情形，认为各个行动对目标的支持程度是等概率的，由图 3 则有 $s_i = 0.2 (i = 1, 2, \dots, 10)$ 。即在时刻 t_0 ，攻击 A 或 B 的两个假设的可能性是一样的(都是 0.2)。

接下来，在时刻 t_1 红方得到情报，蓝方轰炸机达到 M_1 位置，即蓝方有行动 A_{01} 。由于轰炸机与岛屿 A 或 B 的距离相当，此时仍无法得知蓝方执行计划 P_1 还是 P_2 。接下来，在时刻 t_2 红方得到情报，蓝方轰炸机达到 M_2 位置，即蓝方行动 A_{12} ，此时蓝方的行动与假设的计划 P_2 不相符合，而对计划 P_1 的支持程度达到了 0.6，这时可以较肯定地判断蓝方执行计划 P_1 。

在上面的例子中，有许多值得进一步探讨的内容。场景可以进一步扩展，比如，蓝方轰炸机由战斗机护航，从基地出发后，红方派出战斗机拦截，这样蓝方轰炸机和战斗机都是为了同样的作战目标，这时就应该研究它们的行动之间的合作关系，需要引入另外的描述多代理合作来完成同一任务的谓词和算子。

4 结束语

文中讨论了基于规划知识图的计划识别方法，给出了一种集成了战术智能规划系统和战术计划识别系统的态势估计模型。这包含了我们的一个基本观点，即针对计划识别问题的求解，首先应建立智能规划模型。当然，这种观点并不具有普遍性，在不考虑智能规划模型的情况下也可以通过手工来编制规划，形成计划识别所需的计划库。然而，在设计计划识别所需的计划库时，必须首先考虑世界模型的代表问题。Kautz 计划识别方法中要求计划库完备(封闭世界模型)，而在现实世界中这是很难满足的，本文通过动态建立计划库可以突破这一模型的限制。一旦有了计划识别问题所需的世

界模型, 只需给出行动的目标, 然后通过智能规划器编制计划, 这一特性对实时性要求很高的战场环境是非常有用的。应该说, 智能规划和计划识别这两个问题许多现实环境中是同时存在的, 并且是相互依存的。

参 考 文 献

- [1] Waltz E, Linas J. Multisensor Data Fusion [M]. Norwood, Massachusetts, USA, Artech House, 1990, chapter 1.
- [2] Camilleri G. A generic formal plan recognition theory [C]. In Proceedings of the 1999 International Conference on Information Intelligence and Systems, Bethesda, Maryland, USA, Nov. 1999: 540 – 547.
- [3] Schmidt C F, Sridharan N S, Goodson J L. The plan recognition problem: an intersection of psychology and artificial intelligence [J]. *Artificial Intelligence*, 1978, 11(1): 45 – 83.
- [4] Kautz H A. A formal theory of plan recognition [D]. [PhD thesis], University of Rochester, 1987.
- [5] 姜云飞, 马宁. 一种基于规划知识图的规划识别算法[J]. 软件学报, 2002, 13(4): 686 – 692.
- [6] 李伟生. 信息融合系统中态势估计技术研究[D]. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2004.4.
- [7] Nilsson N J. Artificial Intelligence – A New Synthesis [M]. San Francisco Morgan Kaufmann, : 1998, 373 – 396.
- [8] 姚春燕. 战术态势估计中时空推理理论与技术研究[D]. [博士论文]. 长沙: 国防科技大学, 1999.10.
- 李伟生: 男, 1975年生, 博士, 研究方向为信息融合, 智能信息处理.
- 王三民: 男, 1969年生, 博士, 研究方向为模糊逻辑.
- 王宝树: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能信息处理与模式识别.