实现态势估计的一种推理方法*)

A Reasoning Method to Realize Situation Assessment

程 岳 王宝树 李伟生

(西安电子科技大学计算机学院 西安710071) (国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙410073)

Abstract Battlefield situation analysis is basis of command decision. Situation assessment is most important component of current command decision system. This paper introduces inference algorithm of Bayesian network and analyzes of intrinsic characteristic and reasoning mode of situation assessment. We present application of Bayesian network to situation assessment and form inference model that can infer and get entire battlefield situation information, thus supports decision.

Keywords Bayesian network, Data fusion, Situation assessment

1 引言

美国联合领导实验室(JDL)数据融合小组(DFS)建立数据融合处理模型,把数据融合分为三级:一级是对目标位置和身份的估计;二级是对敌、我军事态势估计;三级是敌兵力威胁估计。态势估计接受一层融合的结果,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,是 C³I 系统的"高级神经中枢"。目前态势估计尚没有完整的定义,一种功能性描述认为:态势估计是根据参战各方力量的部署、作战能力、效能对战术画面进行解释,辨别敌方意图和作战计划的过程。这个过程需要模仿人类专家推理的能力,依靠丰富的领域知识来求解,所以,需要将基于知识的推理算法应用于态势估计的假设推理框架中来完成,需要从不完全的、不精确的或不确定的知识和信息中作出推理,完成对当前战场态势的解释,因此,不确定、不完全的知识如何表示,如何推理是实现态势估计所必须完成的关键所在。

贝叶斯网络[1,7]是一种对概率关系的有向图解描述,适用于不确定性和概率性对象,应用于有条件地依赖多种控制因素的决策。它是一种概率推理技术,使用概率理论来处理在描述不同知识成分之间的条件相关而产生的不确定性,提供了一种将知识直觉地图解可视化的方法,是一种新的知识表示模型,知识的不完全、不确定性用概率来表示。贝叶斯网络的计算机模型化已成为建设决策支持系统的一个重要部分,并被称为智能软件[7],广泛应用于"信息恢复、交通管理、国防系统"等方面。

本文采用贝叶斯网络技术,建立战场和军事单元的概率模型,将多个军事实体在不同层次上连接,从而构造、演化一个对战场态势进行分析、推理、预测的贝叶斯因果模型。表示战场和军事单元特征的不确定性证据被收集应用于不同的网络结点,证据自动在网络中传播修改高层战场态势假设,为指挥员决策提供依据。

2 贝叶斯网络及证据传播算法

2.1 贝叶斯网络

定义:贝叶斯网络是一个有向无环图(DAG),其结点用随机变量标识,它规定图中每个结点 V_i 条件独立于由 V_i 的父结点给定的 V_i 的非后代结点构成的任何结点子集。即假设 $A(V_i)$ 是图中非 V_i 后代结点的任何结点集合,设 $P(V_i)$ 是图中 V_i 的直接双亲,贝叶斯网络是对图中所有 V_i,$P(V_i|A(V_i)P(V_i))=P(V_i|P(V_i))$ 的一种陈述方式。

贝叶斯网络中推理模式有三种:因果推理或由上向下推理;诊断推理或自底向上推理;辩解,即在诊断推理中嵌入因果推理。通过这三种推理模式的综合运用,完成证据在贝叶斯网络中的传播,自动蕴含着一般推理中控制机制的实现,如数据驱动,目标驱动。

贝叶斯网络结构可以通过训练或在领域专家的指导下进行学习得到[7],学习贝叶斯网络就是要找到网络结构和表示结点变量之间因果关系的条件概率表。利用建立的贝叶斯网络模型解决实际问题的过程称为贝叶斯网络推理。在一次推理中,那些已确定值的变量构成的集合成为证据 E,需要求解的变量集合称为假设 X,一个推理问题就是求解给定证据条件下假设变量的后验概率 $P(X/E)$。

贝叶斯网络结构和表示结点之间因果关系的条件概率表,将领域问题的知识用图形方式表示出来,与其它知识表示方法相比,有以下优点:(1)它建立在概率理论之上,具有坚实的理论基础。(2)对条件独立性的利用,极大地简化了概率计算。(3)图形结构中表现出来的因果关系,符合人们的思维习惯,容易理解。(4)将由因到果和由果索因及混合推理等有机地结合在一起,可以同时进行,符合智能化推理的种种要求。

2.2 贝叶斯网络中的证据传播算法[1]

求解给定证据条件下假设变量的后验概率 $P(X/E)$ 的问题,可以通过 Pearl 提出的消息扩散与汇聚算法来进行。该方法利用单连通图结构的特点进行有效推理,其基本思想是给每一个结点分配一个处理机,每一个处理机利用相邻结点传递来的消息和存储于该处理机内部的条件概率表来进行计算,以求得自身的置信度及后验概率,并将结果向其余相邻结点传播。在实际计算中,贝叶斯网接收到证据以后,证据结点的信度值发生改变,该结点的处理机将这一改变向它的相邻结点传播;相邻结点的处理机接收到传递来的消息后,重新计算自身的信度,然后将结果向自己其余的相邻结点传播,如此

*)国防科工委预研项目:16.8.2.1。程 岳 硕士生,主要研究方向:数据融合、军事专家系统。王宝树 博士生导师,主要研究方向:数据融合、智能信息处理、人工智能。李伟生 博士生,主要研究方向:态势估计理解、规划识别。

继续下去直到证据的影响传遍所有的结点为止。

形式化表示为：给定证据 E 后任意的非证据结点 X 的后验分布 $P(X/E)$ 称为该结点的置信度 $Bel(X)$，根据贝叶斯网络推理模式的特点，一个结点的信度可以分解为两个参数：诊断性参数 $\lambda(X)$ 和因果性参数 $\pi(X)$，从而该结点的信度 $Bel(X)=\alpha\lambda(X)\pi(X)$（$\alpha$ 为归一化常数），诊断性参数 $\lambda(X)$ 和因果性参数 $\pi(X)$ 根据子结点和父结点传递的消息进行计算。其中 $\lambda(X)=\prod_j \lambda_j(X)$，$\lambda_j(X)$，为结点 X 的第 j 个孩子结点传递的信息：$\pi(X)=\sum_{U_1,U_2,\cdots,U_n} Pr(X/U_1,U_2,\cdots,U_n)\prod_i \pi_x(U_i)$，$Pr(X/U_1,U_2,\cdots,U_n)$ 为结点变量 X 在父结点集 $\{U_i\}$ 下的条件概率，也就是专家知识的概率化表示形式，$\pi_X(U_i)$ 为结点 X 的父结点传递给其的信息，算法的具体步骤见文[1]。

从这个算法可以看出，每一结点内部的处理器在运算时都只是使用自身的条件概率表和相邻结点传递来的 λ、π 消息。如果将每一个接点的计算时间平均看作一个单位，则采用该方法的计算时间将正比于证据在传播过程中所经历的最长路径中的结点树，在最坏情况下将正比于贝叶斯网络直径。对于多连通图的情况，由于消息的传递的双向性，使得消息会在无向环路中循环传播而无法进入稳态，得不到最终结果。可采用多种方法将多连通的贝叶斯网络拓扑结构变换为单连通的拓扑结构，再利用 Pearl 的算法进行计算。

2.3 Pearl 的多层次假设中的证据推理算法[2]

设集合 $H=\{h_1,h_2,\cdots,h_n\}$ 为推理中的假设结果，其相互独立且逻辑上是完备的。集合 H 的某些子集合具有语义意义，即某些单假设 $h_i(i=1,2,\cdots,n)$ 可组成更大的语义单位，因而对假设集合 H 产生划分，这样的划分逐次进行，从而形成严格的语义层次结构，每个子集有父集合包含它，这样子集合可以看作以 H 为根的树型结构的结点，单假设 h_i 为树的叶子结点，子集合形成中间结点 S。

这样，我们设叶子结点 h_i 的置信度为 $Bel(h_i)$，表示在给出证据的情况下，h_i 为真的概率；中间结点 S 置信度为各个直接后继结点置信度的和；在证据 e 到达时，对某个结点产生影响，该结点的置信度发生变化，产生发送给其父结点与子结点的双向消息；其邻居结点收到消息，更改自身置信度，产生消息给其邻居结点，就这样证据在层次结构中继续传播，直到证据对每个结点的影响都计算出。当证据不停地到来时，就可以计算出证据对假设的累计影响。具体传播算法见文[2]。

该算法的特点是，只要有新证据到达，其可作用于任何适用于该证据的假设层，且对所有假设的置信度都有影响，而各个假设的当前置信度是随时间序列到达的所有证据的累计效果的叠加，符合人类思维推理的规律，是处理逻辑推理的有效算法。

3 态势估计问题的贝叶斯模型

3.1 态势估计问题分析

态势估计是军事智能决策过程中重要的环节，其以军事知识和军事经验为基础，自适应地对急剧动态变化的战场场景进行监控，按照军事专家的思维方式和经验，自动对多源数据进行分析、推理和判断，做出对当前战场情境合理的解释，为军事指挥员提供较为完整准确的当前态势分析报告。实际上，这类似于专家解决问题的过程，是人类思维过程的模拟化。这个过程可记作在已知军事知识 $K=(K_1,K_2,\cdots,K_i,\cdots,K_m)$ 和当前实时数据信息 $S=(S_1,S_2,\cdots,S_i,\cdots,S_n)$ 的情况下得到态势 $H=(H_1,H_2,\cdots,H_i,\cdots H_l)$ 的假设结果 $P(H|K,S)$，P 表示每个备选假设（态势）有一个不确定的概率关联值或置信度。

在这个过程中，军事领域知识起着决定作用，根据知识建立态势特征与态势识别的对应关系，形成对当前态势的分类识别：设态势空间框架 $\theta=\{A,B,C,\cdots\}$，其元素为战场空间中可能出现的全部态势分类；$M=\{X,Y,Z,\cdots\}$ 为态势特征集合，表示战场空间中所出现的事件。所谓态势评估实际上就是态势特征集合与态势空间框架的对应映射关系 f：

$$f:\quad M\rightarrow\Theta$$

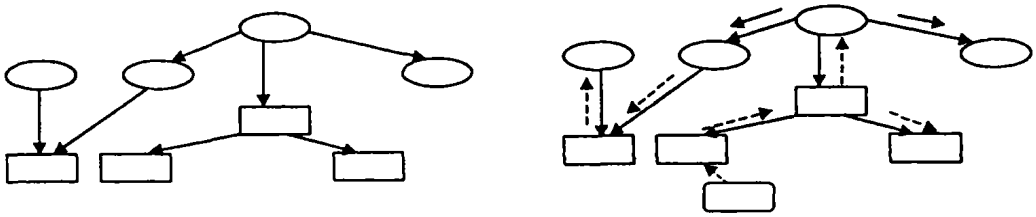
由此对态势进行分类识别，形成态势假设（当前态势描述）。这样，就将态势空间进行一次粗集划分，完成了对当前态势判决的一次识别，实际上，对态势特征的分类就是对其所属态势类别的判断。对应于人类思维认识的渐进性，这个过程是多级识别的，即存在映射集合 $F=\{f_1,f_2,\cdots,f_n\}$，其中元素 $f_i(i=1,2,\cdots,n)$ 描述了集合 $M=\{X,Y,Z,\cdots\}$ 中元素在 i 层所具有的类别特征与态势类别的对应关系。通过 $F=\{f_1,f_2,\cdots,f_n\}$ 对 $M=\{X,Y,Z,\cdots\}$ 进行多级识别，最后达到对全局态势的认识。从这个过程可以看出，态势领域问题是个层次化动态分类的过程，需要依靠丰富的领域知识建立对应识别规则试探性的求解，将基于知识的推理算法应用于这个过程来完成的。

从以上可以看出态势估计问题的特点：首先，它具有层次性的特征，是分层假设描述和评估处理的结果；其次，态势分析所要识别的战场情景是通过定性的战斗原则、战术性能及用兵方式等军事领域知识来进行识别分类的，即领域问题的特点是基于知识的，问题的求解过程是应用知识推理的过程；再次，评估过程由于信息和知识的模糊性、不完整性和不精确性，估计假设结果有相关联的置信度，最高置信度的备选假设为最优解；最后，态势估计是一个动态的、按时序处理的过程，其结果水平将随时间的增长而提高。

3.2 态势估计问题的贝叶斯网络模型

根据以上对态势估计问题域的分析，我们建立态势估计问题的贝叶斯网络模型[3,6]，如图1所示。其中，图1(a)是对具体的战场态势场景通过咨询军事专家建立的贝叶斯网络态势估计模型，连接结点之间的有向弧表示结点之间的因果关系，因果关系的强度用条件概率表来描述。高层圆结点表示全局态势，中间圆结点表示子态势，由子态势组成全局态势例如，进攻态势包括火力控制、突击、支援掩护、伴攻迷惑等不同子态势，对子态势的识别为全局态势的理解提供证据。下方的方形结点表示影响态势的战场事件，而对事件的了解是通过事件线索（最下方的结点）的发现来解释的，事件线索（event cue）来自一层数据融合过程或对战场的监控所得数据。

利用贝叶斯网络模型解决实际问题的过程称为贝叶斯网络推理。在图1(b)中，有向弧旁边的箭头表示证据传播的信息流，从中可以看出，根据已建立的态势估计模型，通过自底向上的推理，逐级达到对战场环境、发生事件、子态势的识别，获得对全局态势的掌握，为决策者提供决策依据。在图1(b)中，自顶向下的推理表示态势预测的过程，态势与子态势之间的因果联系表现为对态势的预测，而态势结点与事件结点、事件结点与事件结点之间的关系表现为底层具体军事单元状态信息的更新。这样，通过用作为证据的觉察事件实例化底层事件节点，利用贝叶斯网络推理算法，应用自底向上的诊断推理和自顶向下的因果推理，从而更新所有节点的置信度，完成对态势的估计与预测。



(a)态势估计模型　　(b)态势估计问题评估过程

图1　贝叶斯网络的态势估计模型

态势估计模型的建立依靠领域专家，通常不同的作战场景有不同的态势模板，但通用的模型形式是一样的。在这个模型中，应用 Pearl 的两种证据传播算法进行推理，在事件与事件、事件与态势之间的算法采用贝叶斯网络证据传播算法；在态势结点与态势结点之间采用树型多层次假设中的证据推理算法。

利用贝叶斯网络进行态势估计有以下优点[3]：(1)同神经网络一样，它充分利用图形方式表示出人类思维推理模式，但其结点之间的连接有明显的实际意义，而神经网络中神经元之间的语义连接是模糊的，并且贝叶斯网络结构可通过传统的知识工程方法建立。(2)态势估计中的重要概念如态势、事件、事件线索、事件传播、预测等都是量化的而不仅仅是定性说明。(3)事件传播算法反映了态势估计的连续性，随时间序列到达的事件线索对态势的累计效果作用作为事件发生的置信度。这种时间上连续的特点在无记忆的专家系统如产生式系统和神经网络中是不存在的。

结论　贝叶斯网络提供了强有力的图形工具来表达基于概率的领域知识，同时可以利用贝叶斯定理建立高效的推理算法；而态势估计问题是应用军事知识解决问题的推理过程，因此可根据问题域的特点建立贝叶斯网络推理模型，在证据到达时，根据消息传播算法，计算证据对态势的影响，推理算法和知识表达方式合理，因此，是一种解决态势估计问题有前景的应用模型。但由于具体的贝叶斯网络模型是静态模板模型，弹性限度不是太大，且由于军事态势估计问题是涉及动态模式识别的推理过程，问题变量变化复杂，固定的模板难于捕捉动态可变的领域变量，因而需要更灵活的推理模式，对此我们提出，将大的固定的贝叶斯网络进行分解，形成军事态势估计核子网(kernel subnet)，在问题分析过程中，建立网络组合算法，在军事知识核子网库中检索子网来建立适用于问题域的推理网络；同时将规划识别理论引入态势估计问题中，建立规划识别与贝叶斯网络结合的动态贝叶斯决策网络[8](DBN)，来实现最优的态势估计求解。总之，贝叶斯网络的强知识表示和推理算法在态势估计问题中有广阔的应用前景。

参考文献

1　Pearl J. Fusion, propagation, and structuring in belief networks. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241～288

2　Pearl J. On evidence reasoning in a hierarchy of hypothesis. Artificial Intelligence, 1986, 28(3): 241～288

3　Miao A X. A Computational Situation Assessment Model for Nuclear Power Plant Operations. IEEE Trans. on SMC, 1997, 27(6)

4　Zhang Weixiong. A Template-based and Pattern Driven Application to Situation Awareness and Assessment in Virtual Humans. In: Proc. of the Forth Inter. Conf. on Autonomous Agents, Barcelona, Spain, June 2000

5　Nobel D. Distributed situation assessment. In: Proc. of Inter. Conf. on multisource-multisensor information fusion, USA, 1998. 478～485

6　Hanson M L. An intelligence agent for supervisory control of teams of unihabited combat air vehicles (UCAVs), Unmanned Systems 2000 Conf. Orlando, FL, July, 2000. 11～13

7　Heckerman D. A tutorial on learning Bayesian Networks: [Technical Report]. Microsoft Research Adwanced Technology Division, 1995

8　Albrecht D W. Towards a Bayesian model for keyhole plan recognition in large domains. In: proc. of the sixth Intl. Conf. UM97

(上接第153页)

OS5. Device management

Characteristics of a serial or parallel device; Buffering strategies; Free lists and device layout; Servers and interrupts; Recovery from failures.

OS6. Security and protection

Overview of system security; Security methods and devices; Protection, access, and authentication; Models of protection; Memory protection; Encryption; Recovery management.

OS7. File systems and naming

File layout; Directories: contents and structure; Naming, searching, access, backups; Fundamental file concepts (organization, blocking, buffering); Sequential files; Nonsequential files.

OS8. Real-time systems

Process and task scheduling; Memory and disk management; Failures, risks, and recovery; Special concerns in real-time.

结束语　美国四所知名大学《操作系统》课程设计的一个突出特点是强调学生的实践能力和动手能力的培养。通过实践能力和动手能力的培养，达到发现和培养创新人才的目的。通过资料分析，我国大学《操作系统》课程的课时虽然比美国大学的课时安排得还要多一点，但我们的《操作系统》课程教学几乎都是从理论到理论，几乎谈不上实践和实验。目前，仅有北京大学和清华大学分别开设了 Littce OS 和 Nachos OS 实验课。这种状况是需要加以改变的。其次《操作系统》的课程教学模式、教学方法与教学手段的研究与改善也需要给予重视。

参考文献

1　Tanenbaum A S, Albert S. Woodhull: Operating Systems Design and Implementation (Second Edition) [M] PP. 1 1992

2　Wilkes j, Golding R, Staelin C, Sullivan T. The HP Autoread Hierachical Storage System ACM Trans. on computer System, 2001, 14: 108～136