

C³I系统中战术态势估计的推理方法*

姚春燕 郝文贤 庄钊文

(国防科技大学ATR重点实验室 长沙 410073)

摘要 本文首先讨论了态势估计中推理框架的现有形式,并从中抽取共性;然后讨论了推理算法的研究现状及存在的问题;最后在推理框架共性之下,提出了应用模糊理论和统计理论解决这些问题的步骤。

关键词 态势估计,推理框架,时间推理,空间推理,因果推理

分类号 E96

An Overview of Reasoning Method in Tactical Situation Assessment of C³I System

Yao Chunyan Yu Wenxian Zhuang Zhaowen

(ATR LAB, NUDT, Changsha Hunan, 410073 Chian)

Abstract In this paper, the existential reasoning frame forms of SA is discussed in detail from which the common essence is extracted. Then, the paper discusses the present state of the research of reasoning algorithm. Finally, the steps to solve these problems using fuzzy theory and probability theory are proposed.

Key words situation assessment, reasoning structure, temporal reasoning, spatial reasoning, causal reasoning

随着计算机、通信、传感器技术的迅速发展,现代战场环境的复杂性、瞬变性不断增加,直接表现为敌方威胁的速度、机动性、复杂性的大大提高和我方可获取的战场信息量的大幅度增长。这就要求C³I系统提供实时信息处理能力来辅助决策以缩短决策时间,提高决策质量,提高作战效率,增强武器系统的效能。这种实时信息处理能力的支撑技术之一是多传感器数据融合技术。美国实验室联席理事会(Joint Directional Laboratory)数据融合小组(Data Fusion Subpanel)将数据融合处理模型分为三组:一级——融合的位置和属性估计;二级——敌我军事态势估计;三级——敌方兵力威胁估计。态势估计接收一层融合的结果,从中抽取出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。

国外态势估计和威胁估计(Situation Assessment and Threat Assessment, STA)技术发展比较迅速,在态势估计理论和系统结构的研究和开发方面取得了很大进展。据公开发表的文献,美国对SA的研究始于70年代末,到目前为止,已研制出至少3个可操作系统和15个原型系统^{[1]-[6],[12]},其中包括TCAC(美国陆军分析系统),BETA(战场开发与目标获取),ASAS(全源分析系统)等。英国自80年代中后期开始对海军STA问题进行研究,到目前为止,已研制出一个原型系统KBS,用于本舰传感器与无线数据链及信号情报融合,并在对航迹、身份、行为模式以及有关意图、战术的启发式推理的基础上提供战术估计。南非目前也已研制出一个基于知识的威胁估计系统Future,用来辅助南非海军日常值班中及早检测开普敦周围海域的威胁事件。与国外研究相比较,国内对态势估计问题的理论研

* 1998年3月9日收稿

第一作者:姚春燕,女,1972年生,博士生

究方面尚没有一种统一的、能为大家普遍接受的观点

本文首先探讨了态势估计中推理框架的现有形式,并从中抽取共性;然后讨论了推理算法的研究现状及其存在的问题;最后在推理框架共性之下,指出了应用模糊理论和统计理论解决这些问题的步骤。

1 态势估计的推理框架

由于SA的功能是根据不断到来的数据逐步达到对敌方意图和作战计划的辨别,因此可以将它归为一个多假设动态分类问题。由于SA问题是一个复杂的病态结构的问题,它的输入数据和知识库数据都含有不确定性,解决它需要模仿人类专家推理的能力,依靠丰富的领域知识来试探性地求解,因此,SA需要采用启发式分类,将基于知识的推理算法应用于SA的假设结构(推理框架)来完成。这样,对各种类型的战术态势估计系统,需要抽取推理框架的共同特点,将不同研究者对战术SA推理框架的理解统一起来,以进一步开发直接适用于SA的推理算法,指导战术SA系统的设计。由于推理框架是根据问题结构的特点建立的,因此,我们首先讨论态势的结构特点。

1.1 态势估计问题的结构特点

Bassat认为SA问题结构具有多角度、多成员、层次性的特征^[7]。所谓多角度,是指对某一个态势的辨别是通过对它从多个侧面进行分析得到;多成员是指从某一角度看,几种备选假设同时共存。例如从突击的角度看,没有理由事先假设敌方的攻击仅仅由坦克组成,可能的备选假设如:坦克、飞机、摩托化步兵、装甲兵、直升机载步兵的任意组合都是可能的;层次性是指低层线索为高层线索的组成部分,高层线索可以为低层线索提供证据。例如,砾石的大小和土壤的类型有助于确定坦克的可通行性;这一信息可用来进行地形分析。地形分析的结果综合其它因素,如敌方作战能力,可用来确定敌方采用的战术等。

Bassat提出的问题结构有一定的合理性,但这种结构没有明确地区分开知识的句法和语义。如果以这种结构直接作为推理框架,推理算法的实现将是很困难的。以下我们讨论建立在这种问题结构特点之上的是4种推理框架:匹配滤波器网络框架、基于图解的推理框架、基于描述的推理框架和基于模板的计划识别推理框架。

1.2 四种推理框架

◦ 匹配滤波器网络框架

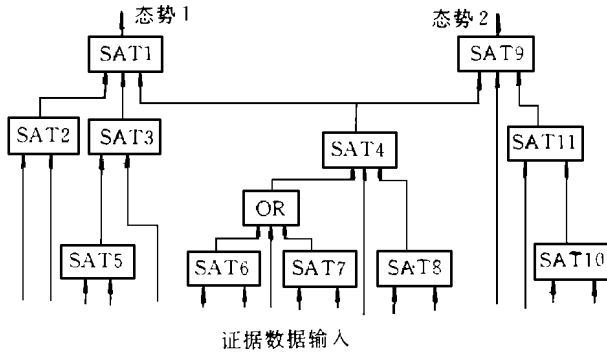
针对Bassat提出的问题结构不易实现的缺点,Kirillov提出匹配滤波器网络框架^[8]。他首先将态势估计任务简化为确定有关正在(已经,将要)发生的事件的What、When、Where属性,从句法方面对态势估计任务进行分解,将它的语义压缩在各子任务内部,框架结构如图1所示,子任务的功能结构如图2所示。从图中可以清楚地看到,在句法层,可将态势估计任务或子任务的输入和输出表示为关于某些事件的消息,第*i*个子任务第*k*端的消息可表示为某一谓词 A_{ik} 的不变形式:

$$\text{Message}_k = A_{ik}(X_{ik}, S_{ik}, T_{ik}) = 1, 2, \dots, m; k = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

X_{ik}, S_{ik}, T_{ik} 分别是 A_{ik} 类型的事件的定性定量值、空间属性值和时间属性值的集合。从语义方面看,可以将图2中所示的元件(子任务)看作是一个非线性逻辑-空间-时间滤波器,它和某些事件特征相匹配。当输入消息参数相应于这种事件特征时,相应的态势就被检测到。

◦ 基于图解的推理框架

Nobel提出了一种基于图解的信息表示理论^[4],图解的思想来源于认知科学和社会心理学,应用图解可以表示对某一客观对象的理解。Nobel提出的图解结构分为三层:第一层作为特征槽层,定义态势特征,如平台位置、平台类型、平台间空间关系等;第二层作为限制层,定义对允许填入槽中的特征的限制,限制是弹性的,允许不同特征以变化的程度填入槽中,如果图解中足够多的槽被充分填充,图解即被“激活”;第三层作为推断和行动选择层,定义了适用于此图解的推断和行动。态势这样的复杂抽象概念需要一个两维图解网络结构:一维是类属类型,即低层图解是高层图解的一种;另一维是部属类型,即低层图解为高层图解的一个槽提供详细信息,在这一结构中,最高层的图解表示对态势



证据数据输入

图 1 态势估计中匹配滤波器网络框架例示 (OR 表示综合从相互独立的或备选的信息源获得的证据)

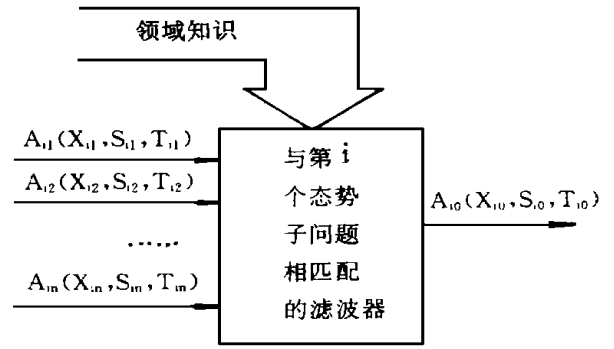


图 2 匹配滤波器结构。领域知识用于合成滤波器特征函数

最深刻的理解，低层的槽对应于态势的可观测特征。部属层次中的低层图解被激活后，可以填入高层图解的槽，进而部分激活高层图解。被激活的高层图解驱动与它相连的低层图解，因而使这些低层图解更容易识别与它匹配的态势特征。在这种结构下，态势数据输入低层图解会建立一个激活“流”，激活“流”通过层次结构，可以形成对态势的一个理解。

。基于描述的推理框架

美国 MITRE 公司曾研制了一个态势估计专家系统原型 SCAN^[3]。在 SCAN 中，一个“描述”是一个事件序列，一个“事件”是出现在某一具体时段内的可检测的活动。每一事件以子描述或命题来表示，是父描述出现的线索。每个描述包括若干子描述和命题，每个子描述又包括若干子描述和命题，如此下去，直到最底层为止。对每一子描述，均定义了入口条件和时间关系限制。由于当时人工智能技术发展的局限性，尽管作者认为很有必要考虑空间关系，仍未能在 SCAN 中实现对复杂空间关系的表示和推理。推理过程是在自上而下和自下而上两个方向上，不断将输入数据与各命题的前件、子描述的入口条件以及时间限制相匹配的过程。

。基于模板的计划识别推理框架

Azarewicz 等人首先建立了一个军事目标/任务/计划层次结构^[5]。这一结构中顶层的节点是某一军事目标，各子目标作为它的子节点；对任一子目标节点，将用来完成它的各项任务作为它的各个子节点；对每一任务子节点，将用来完成这项任务的各个计划作为它的各个子节点。层次中的每个节点采用模板表示，每个模板包括一套参数，它的满足为识别一个目标、任务、计划或事件的假设提供证据。时间和空间限制、因果限制均包含在条件属性中。推理过程通过在自上而下和自下而上两个方向上，不断将输入数据与节点的条件属性相匹配而进行。

1.3 推理框架的共性

从 1.2 节的讨论中可以看到，以上 4 种形式的推理框架就其结构特点来说，本质上是很相似的，一个示例正如图 1 所示。首先，它们都具备态势估计问题结构的层次性特征。其次，以上 4 种推理框架，都主要按照信息需求的因果关系，将态势估计任务分为层次结构的子任务（结构），与每一个子任务的输入相连的其它子任务为该子任务提供必需的信息，该子任务为与它的输出相连的子任务提供必需的信息。在后向推理中，高层子任务为与它相连的低层子任务提供“注意重点”。最后，4 种推理框架都是将态势估计问题结构的多角度和多成员特征结合在层次结构中的每一子任务（结构）中，对每一子任务（结构）主要从时间、空间、因果三方面的限制来描述。

2 推理算法

由上面的讨论可以看出，4 种推理框架只是根据知识表示形式的不同，在子任务中对时间、空间以

及因果限制的表示形式不同。以下我们以一阶谓词逻辑系统为形式语言,来讨论推理算法。对于每一子任务,可以用一条产生式规则表示,并且所有的时间、空间、事件属性变量均为不确定的;设 $t = (t_1, \dots, t_n)$ 是时间变量的有序集, $s = (s_1, \dots, s_n)$ 是空间变量的有序集, t_0, s_0, x_0 分别表示一个时间变量、空间变量、属性变量, $x = (x_1, \dots, x_n)$ 是属性变量的有序集, $T(t, t_0)$ 是产生式规则前件中的一个谓词,表示一个时间关系,称为时间谓词;类似地, $S(s, s_0)$ 表示一个空间关系,称为空间谓词; $X(x, x_0)$ 表示各事件之间属性的关系,即对这一子任务其它属性(如数量、类别等)之间关系知识的描述。对 $T(t, t_0)$ 和 $S(s, s_0)$ 的处理构成了时间推理和空间推理算法的内容;对 $X(x, x_0)$ 的处理以及对产生式规则后件真值的计算则构成 SA 中因果推理算法的内容。

° 时间推理算法

目前 SA 中时间知识的表示和推理主要有以下两种:(1)将时间知识用确切的时间点和时间区间的形式表示,并在此基础上定义了时间的先后、同时和重叠等 13 种关系^[9]。具体实现时,有的系统将这种时间关系以规则的形式表示^[2],有的系统将这种时间关系规则结合在描述模板中^[3],然后采用基于规则的推理方法或基于描述的推理方法进行推理。(2)考虑时间的统计不确定性,以(时间,时间方差)的方式表示时间点,以(起始时间,起始时间方差;终止时间,终止时间方差)的方式表示时间区间。在此基础上,定义了时间的预测关系,采用最大似然估计和似然比检验的方法进行推理^[8]。方法 2 和方法 1 本质上不兼容。由于目前对时间推理算法的研究主要集中在方法 1 上,这就造成方法 2 不能利用许多现有成果。方法 2 要求在专家给出的先验知识中,不仅包括时间值,还包括时间的方差值,使得知识获取很困难。方法 1 没有考虑时间知识的不确定性,适应性不强。为解决这些问题,本文提出将模糊理论应用到推理算法的研究中。由于战场上时间知识的不确定性大量表现为模糊性,并且模糊方法可以兼容传统的知识表示方法和推理方法,因此可以利用现有时间推理算法的大量成果,并且可以提高现有算法的性能。近年来,对于模糊时间知识处理的研究,主要集中在人工智能应用和数据库应用两方面。Dubois 和 Prade 提出了一个应用可能性理论处理模糊时间知识的理论框架^[11]。Kuratach 从数据库应用的角度建立了模糊时间点、时间区间的统一表示形式^[10]。然而,所有这些前期研究,仅为 SA 中时间推理算法的构造和专家知识模型的建立提供了一定的思路,离一套完整的算法和模型仍有不小的距离。下面,可以考虑采用如下步骤解决 SA 中时间推理问题:1 建立或选取一种合适的时间变量表示形式及适宜的时间关系的专家知识模型;2 按照这一知识模型对 $T(t, t_0)$ 进行分解,检验分解后模糊时间关系的完备性和一致性;3 构造实现时间推理功能的模糊算法,评价估值的不确定程度,并据此确定时间谓词的真值。

° 空间推理算法

目前尚未见到论及 SA 中空间推理算法的专门文献,只是有个别文献在对作战单位隶属关系或协作关系的推断上,采用空间模板匹配法^[12]。具体的匹配度量和匹配算子建立在领域专家知识的基础上,不同的系统有不同的处理方法,没有正规的处理模型。Randall 定义了空间区域之间的 8 种关系以及空间点与空间区域之间的两种关系,并在此基础上,采用谓词逻辑系统进行推理^[13]。这种方法可以与传统的时间推理方法相结合,来检测事件的发生。目前这种方法,由于没有考虑空间变量和空间关系的不确定性,尚不能直接用于态势估计中。

为了将空间关系的处理正规化,同时考虑不确定性的影响,可以在推理框架共性之下,讨论对空间谓词的处理。对空间谓词的处理与对时间谓词的处理是类似的,只是对时间谓词的处理是在一维时间轴上的处理,而对空间谓词的处理是对三维空间中点、线、面和区域 4 类空间变量之间各种关系的处理,具体地说,对空间谓词的处理是空间变量和空间关系均含有不确定性的情况下,根据已知的空间变量、空间关系对未知空间变量进行不确定性估计的问题。

由于战场上空间知识的表达包含大量语义上的模糊性,有些一层融合结果包含统计不确定性,因此可以考虑通过模糊集理论和统计理论来对未知量进行估值,并检验对未知量估值的不确定性大小。该过程可分为以下三步进行:(1)分别在模糊集理论中和在统计理论中,寻求适宜的空间变量和空间关系的专家知识表示模型。(2)在模糊集理论下,研究空间变量在经过一些较为复杂的函数作用后,不

确定性的传播和变化情况。由于模糊数对连续递增函数的运算一定闭合,而对于其它函数运算则不一定闭合,为克服这一局限性,可采用一套合适的模糊算子,代替 Zadeh 极大扩展原理中的算子,并使推理结果仍能近似符合人脑的推理结果。在统计理论下,主要研究统计不确定性在经过一些较为复杂的函数作用后,不确定性的传播和变化情况,这可通过参数估计理论来解决。(3)构造一个检验最终估值质量的合理算法,以确定空间谓词的真值。

° 因果推理算法

对于 SA 中因果关系推理,已提出的一个推理算法的层次结构如下^{[2][6]}:对于关键线索的推断,在基于规则的推理或基于描述的推理框架下,采用模糊推理、Bayes 推理或 D-S 证据推理等多种方法;由关键线索到态势估计的推理,采用 D-S 证据理论推理方法;对敌方行动计划的识别,在基于模板的推理框架下,采用自定义的匹配算法。这种层次性结构的推理算法存在的突出问题是:(1)不同层次推理算法之间的接口没有建立在严格的理论基础之上;(2)这种推理方法与时间和空间推理方法不能完全兼容。在 1.3 节中提出的推理框架特征下,子任务和消息的表示形式分别得到统一,这在推理框架的不同层次上采用同一种因果推理算法提供了便利,免去了不同层次推理算法之间接口的困难;此外,时间谓词和空间谓词的采用将时间推理和空间推理有效地结合进推理过程中。人工智能的发展,使得可用的因果推理算法种类丰富,如证据理论、可信度理论等。但,也提出了一个推理算法的选择问题。因果推理算法的选择可以考虑以下三方面进行:(1)可以利用的正面和负面信息是否均被利用;(2)算法计算量的大小;(3)不同算法对于同一种态势的分辨能力。

3 结论

本文将战术态势估计问题归结为一个对多层次假设进行动态分类的过程,结合问题结构的特点归纳出推理框架(假设结构)的共同特点,并讨论了 SA 中推理算法的研究现状以及存在的问题,提出在统一的推理框架下,采用模糊理论和统计理论解决 SA 中推理算法所存在问题的步骤。

参考文献

- 1 Linas J. A Survey of techniques for CIS data fusion, Proc. of IEEE Conf. on C³M IS, 1989
- 2 Antonisse H. J. et al. ANALYST II: A Knowledge-Based Intelligence Support System. MITRE Rep. MTR-84W 0020, April 1985
- 3 Laskowski J. S. and Hoffman I. J. Script-Based Reasoning for Situation Monitoring, in Proc. 6th Nat. Conf. Artificial Intelligence, August 1987
- 4 Noble D. F. and Tuelove J. Schema-Based Theory of Information Presentation for Distributed Decision-Making. Tech. Rep. NTIS # ADA 163150, 1985
- 5 Azarewicz J. et al. Template-Based Multi-Agent Plan Recognition For Tactical Situation Assessment, in Proc. of 5th Conf. on Artificial Intelligence Applications, March 1989
- 6 King W. H., et al. A Prototype Expert Assistant for Tactical Intelligence Battlefield Situation Assessment. MIT ONR Workshop on C³I, 1986
- 7 Moshe Ben-Bassat and Amos Freedy. Knowledge Requirements and Management in Expert Decision Support Systems for (Military) Situation Assessment. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1982, SM C12 (4)
- 8 Kirillov V. P. Constructive Stochastic Temporal Reasoning in Situation Assessment. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, August 1994, 21 (7)
- 9 Allen F. Towards a general theory of action and times. AI Magazine, 23, 123-154
- 10 Kurutach W. Modelling Fuzzy Interval-Based Temporal Information: A Temporal Database Perspective, in Proc. of IEEE Int. Conf. on Data Engineering, 1994, 741-748
- 11 Dubois D. and Prade H. Processing Fuzzy Temporal Knowledge. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, July/Aug 1989, 19 (4), 729-744
- 12 Levitt T. S. et al. A Model-Based System for Force Structure Analysis. SPIE 1985, 485
- 13 Randall D. A., et al. A Spatial Logic Based on Regions and Connection, in Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Knowledge Representation and Reasoning, Cambridge, Massachusetts, October 1992, 165-176