

态势估计的目标编群问题研究^{*})

李伟生 王宝树

(西安电子科技大学计算机学院 西安710071)

Study of Target Classification in Situation Assessment

LI Wei-Sheng WANG Bao-Shu

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, 710071)

Abstract Problems about target classification in situation assessment are analyzed. This paper presents a synthetic method for fulfilling target classification by using the nearest-neighbor method and field knowledge. The graphical structure formed by target classification is shown by the adjacency list. Based on the structure, breadth-first search algorithm is used for the implementation of dynamic maintenance. The output of target classification is helpful to determine the interaction among situation elements, thus interprets actions related to problem field.

Keywords Situation assessment, Target classification, Breadth-first search

1 引言

态势估计是军事智能决策过程中重要的环节。在C⁴ISR数据融合系统中,态势估计是对战场上战斗力量部署及其动态变化情况的评价过程。数据融合分为目标精炼、态势估计、威胁估计和处理精炼等四级,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。

在敌我编队对抗中,不同态势中的目标实体有不同的组织和空间结构,结构中不同的组成部分起着不同的作用,我们把形成这一结构的过程称为目标编群或聚类。目标编群也称为群形成(Group formation)过程,它是态势估计需要实现的一个重要功能,其基本思想是根据一级融合输入的诸威胁单元信息,按照一定的知识采用自底向上逐层分解的方式对描述威胁单元的信息进行抽象和划分,形成关系级别上的军事体系单元假设,以便揭示可以帮助确定态势元素之间的相互关系,确定相互合作的功能,从而解释问题领域的各种行为。在战役对象多,协同关系复杂、机动频繁、战场态势变化快的真实环境下,目标编群是整个态势评估的基础,是一级数据融合的延伸和高级融合阶段的切合点。

2 态势估计的目标编群问题描述

态势估计接受一级融合的输出,其输入为该时刻当前战场环境下的诸威胁单元(如舰艇、飞机、武器平台等)信息,可表示为:

$$S = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (1)$$

其中, $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是第 i 个威胁单元在该时刻的状态信息集合,以七元组形式给出:

$$P_i = \{T, N, Y, L, S_i, E, W\} \quad (2)$$

其中, T 表示时间, N : 批号, Y : 实体类型, L : 位置, S_i : 状态, E : 辐射源, W : 武器载荷。

态势估计的目标编群根据诸威胁单元信息,按照战役、战术条例、通信拓扑关系、几何近邻关系、功能依赖关系等,采用自底向上逐层分解的方式对描述威胁单元的信息进行抽象和划分,以形成关系级别上的军事体系单元假设,即:

$$S = \{\dots, P_i \cup P_j \cup P_k, \dots, P_r \cup P_m, \dots\} \quad (3)$$

这些分级是自下朝上的,从而形成军事单元的多分类假设,表明该单元下面各级的目标能形成相关的作战单位。同时对状态集 S 进行参数扩展,形成新的状态集:

$$S' = \{\dots, P_i \cup P_j \cup P_k, \dots, P_r \cup P_m, \dots, R_1, R_2\} \quad (4)$$

其中, $R_1, R_2, \dots$ 是对多军事体系单元假设关系的描述,指事件发生的时间、空间及逻辑上的关系,从而涉及到态势判断时对时间、空间以及因果关系的推理。编群按低级到高级顺序分为五个层次,如图1所示。

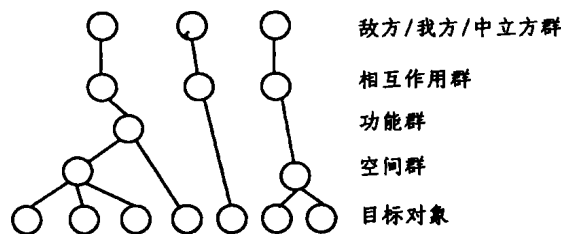


图1 态势估计抽象层次

从低到高各个层次的定义如下:

目标对象——各个威胁单元;

空间群(SG)——按空间一维或多维簇分类分析而划分的群,同一群中的成员空间位置相近、行为相似;

功能群(FG)——实施类似功能的空间组成或相关威胁单元形成的群;

相互作用群(IG)——具有类似目的(如攻击或防御同一目标)的功能群;

敌方/我方/中立方群(EG/OG/NG)——敌、我、中立方各自的所有相互作用群分别形成敌群、我群和中立方群,从而形成战场的三个阵营。敌方群和我方群存在一定的对抗关系,这些敌对的相互作用关系集构成当前战术世界的全部状态,即可能发生的冲突状态,对所有相互作用关系的识别和推导形成最终的当前战术态势模型。

由此,完成基于军事知识基础上的目标编群,这样就用完全的时空关系状态集表示出当前战术世界的全部实体状态的

^{*}) 本课题得到国防科技预研基金项目(00J6. 6. 1 DZ0103)资助。李伟生 博士研究生,主要研究方向为计算机应用、信息融合高层处理。王宝树 教授,博士生导师,主要研究领域为智能信息处理与模式识别。

高层规划、战术信息。这是一个将实时到达的数据结合领域知识进行处理的过程。

由上面的分析可见,群形成过程需要表示领域元素逐级分群的层次数据结构,以及确定群和成员的方法。因此,目标编群过程是一个逐步求精的推理过程,问题的求解主要包括两个方面:群的递增建立和群结构的动态维护。根据输入信息的类型,求解过程分为以下方面:

发现新目标:加入到现有群中或产生新的群;

跟踪目标移动:检查群的成员是否有效,并根据目标移动的最新状态信息修正群结构中的有关参数;

更新目标:对先前传感器信息进行精确说明或错误更正,重新审核和维护群结构及有关参数,比如目标的分批和合批。

3 基于知识和最近邻法的目标编群策略

目标编群的形成过程是一个数据驱动的前向推理过程,即将规则应用于有效数据以产生一个可推理的假设结构。因此,基于一定的规则是目标编群的主要特征。目标或群之间的空间距离是用于编群的最重要的一个属性,我们考虑使用最近邻法对空间位置相近的目标或群进行划分,如果这些目标再满足一定的规则,则把它们形成更高层次的群。

设在时间片 t 上经过一级融合采集到了 m 个威胁单元 $o_1, o_2, \dots, o_m$ 的数据,每个威胁单元 $o_i (1 \leq i \leq m)$ 的位置属性表示为 $\{x_i, y_i, z_i\}$,速度表示为 $\{v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}\}$,方向角为 A_i ,类型为 Y_i 。

3.1 空间距离度量

由于速度不同的目标平台,它们在不同时刻在空间的距离不同。因此,为了有效地进行编群,在考虑目标某时刻在空间的距离时,还应考虑它们的速度。为此,给定同一时刻目标 $o_i (1 \leq i \leq m)$ 和目标 $o_j (1 \leq j \leq m)$ 之间的距离(欧氏距离)为:

$$d_{o_i o_j} = \text{Sqrt}((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 + (v_{xi} - v_{xj})^2 + (v_{yi} - v_{yj})^2 + (v_{zi} - v_{zj})^2) \quad (5)$$

其中,函数 $\text{Sqrt}()$ 表示开平方。

3.2 基于最近邻原则的编群方法

最近邻(NN)法是一种近似方法,该方法简单,便于实现,计算量小,在工程中有着广泛的应用。由于目标编群从目标向空间群的聚类开始,由低级到高级逐渐形成编群的层次结构,因此,我们应用最近邻法的思想是:如果目标(或群)与其更高层的群结构的重心在预定义的距离范围内,且其属性与该高层群结构中的成员的属性相似,则把目标(或群)聚类到该群。为了形成编群的分层表示,针对不同的编群层次,应该选取不同的距离精度。

设定编群的距离精度为 ϵ ,现对上述的 m 个目标进行聚类,采用按最近邻规则的试探法:

第一步:设目标集合 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$, O_i 为聚类后的目标集合,令 $O_i = \Phi$ (空集), $i = 1, 2, \dots, m$ 。任取 $o \in O$,令聚类重心 $o'_1 = o$; $O_1 = O_1 + \{o\}$; $O = O - \{o\}$; 聚类数目 $r = 1$; 类中目标数目 $k_1 = 1$;

第二步:若 $O = \Phi$,则 $n = r$; 将 $O_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 中的所有目标均聚为一类,共聚出 n 类,聚类结束。若 $O \neq \Phi$,转到第三步;

第三步:任取 $o \in O$,若对于 $i = 1, 2, \dots, r$,如果目标 o 与 o'_i 满足预先给定的规则,则计算 o 与各个聚类重心 o'_i 的距离,令 $d = \min(d_{o o'_i})$,只要有 $d < \epsilon$,则取 $O_i = O_i + \{o\}$; $O = O - \{o\}$; k_i

$= k_i + 1$; 计算第 i 个类的参数:

平均位置:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} x_k \quad (6)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} y_k \quad (7)$$

$$\bar{z}_i = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} z_k \quad (8)$$

平均速度:

$$\bar{v}_{xi} = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} v_{xk} \quad (9)$$

$$\bar{v}_{yi} = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} v_{yk} \quad (10)$$

$$\bar{v}_{zi} = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} v_{zk} \quad (11)$$

方位角:

$$\bar{A}_i = \frac{1}{k_i} \sum_{k=1}^{k_i} A_k \quad (12)$$

武器载荷:取各目标对应值的累加和。

利用(5)式,在第 i 类中重新取与 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, \bar{v}_{xi}, \bar{v}_{yi}, \bar{v}_{zi})$ 距离最小的目标为聚类重心。若对于 $i = 1, 2, \dots, r$,如果目标 o 与 o'_i 不满足预先给定的规则,或者找不到满足上式的 o'_i ,则令 $r = r + 1, o'_r = o, O_r = O_r + \{o\}; O = O - \{o\}$,转第二步。

3.3 编群规则

上面的步骤表示了目标(平台)向空间群的聚类,空间群向功能群聚类、功能群向相互作用群的聚类与以上步骤相似,我们只需要把上面的目标集合分别变成空间群和功能群的结点集合。不同聚类层次采用的规则有所不同,我们采用如下的规则:

(1)空间群 设空间群的距离精度为 ϵ_s ,如果目标 o_i 与某一空间群 S 的聚类重心 o_c 的距离小于 ϵ_s ,且目标与该空间群成员的类型一致(如同为 F-16 战斗机),则将目标聚类到该群,重新求该群的平均参数。该规则可使用 If-Then 规则描述为:

If $d_{o_i o_c} < \epsilon_s$ And $Y_i = Y_c$ Then $S = S + \{o_i\}$

(2)功能群 设功能群的距离精度为 ϵ_f ,如果一个空间群与某一功能群的聚类重心的距离小于 ϵ_f 、方位角差小于给定的精度 A_f ,且空间群成员的类型与该功能群成员的类型相似(如同为战斗机),则将空间群聚类到该功能群,重新求该功能群的平均参数。

(3)相互作用群 设相互作用群的距离精度为 ϵ_l ,如果一个功能群与某一相互作用群的聚类重心的距离小于 ϵ_l ,且功能群成员携带的辐射源的波段与该相互作用群成员携带的波段一致(如同为 VHF),则将功能群聚类到该相互作用群,重新求该相互作用群的平均参数。

3.4 群结构的存储方式

群结构是一个随时序动态变化的过程,为了对形成的结构进行维护,采用什么样的方式来存储这种结构是至关重要的。实现目标编群后形成的层次结构实质上是一种图形结构,图是一种比较复杂的数据结构,它没有顺序映像的存储方式,但可以借助于数组的数据类型或多重链表来表示图的元素之间的关系。

图的数组表示法也叫邻接矩阵存储表示,它用两个数组分别存储数据元素(结点,在本文即目标对象或群)的信息和数据元素之间的关系(边或弧)的信息。若有向图中有 n 个结

点,则其邻接矩阵可表示为 $E_{n \times n}$,设图中存在结点 $v_i (i=1,2,\dots,n)$ 指向结点 $v_j (j=1,2,\dots,n)$ 的弧,则 $E_{ij}=1$,否则 $E_{ij}=0$ 。借助于邻接矩阵容易判定两个结点之间是否有边弧相连,并容易求得各个结点的度。例如,第 i 行的元素之和为结点 v_i 的出度,第 j 列的元素之和为结点 v_j 的出度。对于本文的研究领域,某一结点的入度表示了与该结点相连接的高层结点,出度表示了与之相连的低层结点。显然,如果图中某个结点的出度为0,则这个结点是在群的层次中处于最底层的目标对象;反之,如果图中某个结点的入度为0,则这个结点是位于层次中最高层的敌/我/中立方群结点。

邻接表(Adjacency List)是图的最常用的一种链式存储结构。在邻接表中,对图的每一个结点建立一个单链表,第 i 个单链表中的结点表示以结点 v_i 为尾的弧。每个结点由三个域组成,其中邻接点域指示与结点 v_i 邻接的点在图中的位置;链域指示下一条弧的结点;数据域存储和弧相关的信息。每个链表上附设一个表头结点,在表头结点中除了设有链域指向链表中第一个结点之外,还设有存储结点 v_i 的名称和其它有关信息的数据域。若有向图中有 n 个结点、 e 条弧,则它的邻接表需 n 个头结点和 e 个表结点。显然,在弧稀疏($e \ll n(n-1)/2$)的情况下,用邻接表表示图比邻接矩阵节省存储空间。在邻接表上容易找到任一结点的第一个邻接点和下一个邻接点,但要判定任意两个结点间是否有弧连接,则需搜索第 i 个或第 j 个链表,因此,不及邻接矩阵方便。

针对不同的应用领域,图的表示可以根据实际情况选取不同的存储方式,本文研究对象的作战空间了解包括对敌、友、中立各方位置、运动、行为等各方面信息的获取和吸取能力,编群后形成的图的结构中结点数较大,为了节省存储空间,我们采用邻接表的存储结构。

4 编群结构的动态维护

目标编群是一个周期性的形成过程,在每一个决策周期,系统都接受一级融合的输出,并使用新接收到的数据对目标的位置、状态等信息进行更新。此外,在每一周期传感器可能发现新的目标,也可能失去目标的跟踪,目标或群之间也可能因空间位置变化而发生分批或合批等事件。因此,群结构是一个随时序动态变化的过程,为了对态势元素及其之间的关系进行合理的解释,必须实现群结构的动态维护。

目标编群形成的结构是一种图形结构,群结构的动态维护实际上是对群结构进行搜索,即图的遍历的过程,并在给定的规则下对图进行一系列的操作。

4.1 图的遍历

图的遍历是从图中某一结点出发访问图中其余结点,且使每一个结点只被访问一次的过程。通常有两种遍历图的路径:深度优先搜索(DFS)和广度优先搜索(BFS)。图的深度优先搜索遍历类似于树的先根遍历,而图的广度优先搜索遍历类似于树的按层次遍历的过程。目标编群形成的是一种逐层递增的图形结构,图中的各个结点之间有着明显的层次关系。因此,本文的研究领域适合采用广度优先搜索算法。

设有图 $G=(V, \{E\})$,其中 V 是图中结点的集合,并设图的结点数为 n ; E 是图中弧的集合。为了在遍历过程中区分顶点是否被访问,广度优先搜索需附设一个访问标志数组,且将其初值设为假,一旦某个结点被访问,则将其相应分量置为真。算法描述为:

1)初始化图中每个结点的访问标志数组;

2)设置空的辅助队列 Q 。

3)对图中每一个结点 v

①如果 v 尚未访问,则 v 入队列 Q ;

②只要 Q 不为空,执行循环

a. 队头元素出队列并置为 u ;

b. 访问 u ,并将其相应访问标志数组设为真;

c. 对于 u 的每一个邻接点 w ,如果 w 是尚未访问的邻接点,则 w 入队列 Q 。

分析上述算法,其时间复杂度取决于所采用的存储结构。当用邻接矩阵作图的存储结构时,查找每个结点所需时间为 $O(n^2)$;而用邻接表作图的存储结构时,所需时间为 $O(n+e)$,其中 e 是图中弧的数目。显然,在 n 较大时,使用邻接表表示图能节省较多的存储空间。

4.2 群结构的维护

群结构的动态维护包括发现新目标、目标消失、目标分批和合批等事件。表示这些事件即要在遍历编群形成图形的过程中,采用一些规则对图结构进行一定的操作。分别描述如下:

(1)发现新目标 遍历编群形成的图形结构,使新检测到的目标与已存在的空间群相比较,如果该目标与一个空间群的重心在预定义的距离范围内,且其类型与该群成员的类型一致,则把此目标聚类到该群,重新求该群的平均参数,遍历结束;如果这样的聚类没有发生,则产生一个新的空间群。

(2)目标消失 遍历编群形成的图形结构,找到消失目标的结点,删除该结点,重新求该群的平均参数;如果该目标所处的空间群只有该目标结点,则删除该空间群结点,依次类推。

(3)目标分批 遍历编群形成的图形结构,如果某目标结点与其所处的空间群的重心超出了预定义的距离范围,则把该结点从空间群中删除,重新求此空间群的参数;把删除的目标结点看作发现的新目标加入到编群结构中。

(4)目标合批 遍历编群形成的图形结构,计算各个目标结点之间的距离,如果有某两个或多个结点处于不同的空间群,结点间的距离小于给定的阈值,且目标的类型一致,则把这些目标划分到与之距离最小的空间群,并重新求变化了的该空间群的平均参数;如果两个空间群重心间的距离小于给定的阈值,且空间群成员的类型一致,则把这两个空间群合为一个空间群,并求新形成群的平均参数。

结论 目标编群是态势估计需要解决的一个重要问题,我们提出一种使用知识和最近邻相结合的方法来实现目标编群策略,并采用邻接表来表示编群后形成的图形结构,在此基础上,使用广度优先搜索算法来实现群结构的动态维护。目标编群的结果有助于确定态势元素之间的相互关系,并据此解释感兴趣的元素的特性,辅助指挥决策。

参考文献

- 1 Waltz E, Linas J. Multisensor Data Fusion. Artech House, 1990
- 2 Zhang W, Hill R W. A Template-Based and Pattern-Driven Approach to Situation Awareness and Assessment in Virtual Humans. In: Proc. of the 4th Intl. Conf. on Autonomous Agents, Barcelona, Spain, June 2000
- 3 Canamero D. Plan Recognition for Decision Support. IEEE Expert, 1996, 11
- 4 Ford W, Topp W. Data Structure with C++, Prentice-Hall International, Inc., 1997
- 5 孟章荣. D-S 证据理论在空中目标分类中的应用. 现代防御技术, 2001, 29(5)