

证据推理中局部冲突部分分配策略*

曹洁, 孟兴

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

摘要: 为了解决证据理论中冲突证据合成问题, 提出了一种局部冲突部分分配策略。该策略假设证据具有一致可信度, 设定一个阈值, 将大于该阈值的局部冲突按比例分配给产生该冲突的焦点, 并用标准合成规则对证据进行融合, 使合成的结果更加可靠。仿真结果表明该策略能有效解决冲突证据合成问题。

关键词: 证据理论; 局部冲突; 冲突证据; 部分分配; 阈值

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)09-3289-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.023

Partial distribution strategy of local conflict in evidence theory

CAO Jie, MENG Xing

(College of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to solve the problem of conflict evidence combination in standard evidence theory, this paper proposed a kind of partial distribution strategy of local conflict. Assuming that the evidences had consistent reliability, the method proportionally distributed the local conflicts which was greater than threshold to those focus elements which contributed to the conflict. Then, it used the standard combination rule to achieve evidence fusion and obtained more reliable results. The simulation results demonstrate that the proposed method can effectively solve the problem to conflict evidence combination.

Key words: evidence theory; local conflict; conflict evidence; partial distribution; threshold

0 引言

在音/视频联合说话人跟踪系统中, 单一传感器给出的目标信息是有限的。为了提高目标跟踪精度, 利用多个传感器的互补性和冗余性提供目标信息, 而采用多个传感器所面临的主要问题是选取融合规则, 这关系到最终决策结果是否可信。D-S理论是最常用的多传感器信息融合技术之一, 该理论是由 Dempster^[1] 和 Shafer^[2] 两人共同提出的。

标准证据理论在弱冲突下能得出很好的融合结果, 然而, 当证据出现强冲突时, 该理论可能得到与事实相悖的结果。针对这个问题, 很多学者做了相关的研究, 大致可以归为以下两类^[3]: a) 认为标准合成规则本身没有错, 产生冲突证据的原因是各个传感器提供的信息不是同等重要的, 而标准理论没有区分这种不等性, 因而可以采用证据加权预处理冲突证据, 然后再用标准准则合成; b) 认为不合理的结论是由标准合成规则中的规一化步骤所产生的, 新的组合规则主要是解决如何将冲突进行分配的问题。

本文主要研究了冲突如何分配的问题, 提出了一种新的分配方法——局部冲突部分分配法。通过不同冲突强度的实例仿真比较了本文方法与 Dempster 方法、Yager 方法^[4] 和孙全等人方法^[5] 的合成结果, 结果表明本文方法在处理冲突证据合成时有更好的性能。

1 标准 D-S 组合规则

在证据理论中, 若辨识框架 θ 中的元素满足互不相容的条件, 命题 A 对基本概率赋值函数 m 赋值 $m(A)$ 是集合 2^θ 到 $[0, 1]$ 的映射, 记为若 $m: 2^\theta \rightarrow [0, 1]$, 必须满足下列条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \in 2^\theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $m(A)$ 称为事件 A 的基本概率赋值, 也称质量函数。

证据理论中的组合规则提供了组合两个证据的规则。设 m_1 和 m_2 是 2^U 上的两个相互独立的基本概率赋值, 焦点分别为 A_1, \dots, A_k 和 B_1, \dots, B_r , 组合后的基本概率赋值为 $m = m_1 \oplus m_2$ (\oplus 是正交和)。

标准 D-S 组合规则如下:

$$m(C) = \begin{cases} \frac{\sum_{\substack{A_i \cap B_j = C \\ i,j}} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - K} & C \neq \emptyset \\ 0 & C = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

其中: K 是冲突因子, 反映了证据之间的冲突程度:

$$K = \sum_{\substack{A_i \cap B_j = \emptyset \\ i,j}} m_1(A_i) m_2(B_j) < 1 \quad (3)$$

2 证据推理中几种经典的冲突分配方法

标准证据理论在冲突因子 $k \rightarrow 1$ 时可能得到不合理的结果, 当 $k = 1$ 时该规则无法使用^[6,7]。比较典型的例子如下: 假

收稿日期: 2012-02-27; 修回日期: 2012-03-28 基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(1010RJZA046); 甘肃省财政厅资助项目(0914ZTB148)

作者简介: 曹洁(1966-), 女, 安徽宿州人, 教授, 博导, 主要研究方向为智能信息处理、信息融合、目标跟踪; 孟兴(1987-), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为信息融合、目标跟踪(mx520.520@163.com)。

设有两个证据给出的基本置信指派为

$$\begin{aligned}
 m_1(a) &= 0.99 & m_1(b) &= 0.01 \\
 m_2(b) &= 0.01 & m_2(c) &= 0.99
 \end{aligned}$$

通过计算发现冲突因子 $k = 0.9999$, 运用 Dempster 进行证据组合, 得到最终融合结果为 $m(a) = m(c) = 0, m(b) = 1$ 。这显然是不合理的, 两个证据对 b 的支持度都非常小, 而最终的融合结果却认为 b 是一个必然事件, 这个结果表明标准组合规则不适用于高冲突下证据的组合。为了解决这个问题, Yager 和孙全等人提出了两种不同的冲突分配策略。

2.1 Yager 组合规则

Yager 认为既然无法对冲突的证据作出合理抉择, 就应将其全部赋予未知项。新的组合规则如下:

$$\begin{aligned}
 m(\emptyset) &= 0 \\
 m(A) &= \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j), A \neq \emptyset \text{ 且 } A \neq \Theta \\
 m(\Theta) &= \sum_{A_i \cap B_j = \Theta} m_1(A_i) m_2(B_j) + k \quad (4)
 \end{aligned}$$

虽然 Yager 的合成规则能合成高冲突的证据, 但是由于它完全否定了冲突中包含的目标信息, 将冲突全部赋给未知项, 这会造成不确定性的增大, 不符合推理的目标。将 Yager 的方法用于上例可以得到融合结果:

$$\begin{aligned}
 m(a) &= 0 & m(b) &= 0.0001 \\
 m(c) &= 0 & m(\Theta) &= 0.9999
 \end{aligned}$$

从以上结果可以看出, Yager 规则能在一定程度上消除冲突, 但是带来了不确定性的增大, 不利于最终的决策。

2.2 孙全等人提出的组合规则

针对 Yager 规则在冲突分配中的不合理问题, 孙全等人提出了一种新的冲突分配策略, 它假定证据具有一致可信度, 认为证据间的冲突是部分可用的, 通过计算证据中两两冲突的平均值定义证据的可信度, 将冲突按比例分配给各个合成命题。孙全等人提出的新的合成式如下:

$$\begin{aligned}
 m(\emptyset) &= 0 \\
 m(A) &= p(A) + k \times \varepsilon \times q(A), A \neq \emptyset, X \\
 m(X) &= p(X) + k \times \varepsilon \times q(X) + k(1 - \varepsilon)
 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}
 p(A) &= \sum_{\cap_{i=1}^n A_i = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \cdots m_n(A_n) \\
 q(A) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i(A) \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中: ε 为证据的可信度。

孙全等人的方法通过定义证据的可信度来调节分配给各个合成命题的冲突大小, 与 Yager 的方法相比, 该方法能更有效地处理冲突证据的合成问题。但是从式(5)中不难发现, 当可信度变小时, 推理的不确定性也会增大, 这对最终的决策有一定的影响。将孙全等人的方法用于上例可以得到融合结果:

$$\begin{aligned}
 m(a) &= 0.182 & m(b) &= 0.004 \\
 m(c) &= 0.182 & m(\Theta) &= 0.632
 \end{aligned}$$

从以上结果可以看出, 孙全等人提出的方法在某种程度上也能解决冲突证据的合成问题, 然而也会带来不确定性的增大, 影响最终的决策。

3 局部冲突部分分配法

基于局部冲突分配^[8-11]的思想, 本文提出了一种新的局部冲突分配方法——局部冲突部分分配法。不同于传统局部

分配法的冲突完全分配, 本文方法只对超过某个设定阈值的局部冲突进行分配。本文中该阈值设为 0.1, 即将大于 0.1 的局部冲突分配给产生该冲突的焦点, 小于 0.1 的局部冲突保留不再分配。按照以上规则进行冲突分配后, 证据之间的冲突被减弱, 此时再利用标准证据理论对两个弱冲突的证据进行合成。相比以往的局部冲突分配法, 本文的部分分配法减少了冲突分配的次数, 而冲突分配本身就是一种造成误差的操作, 因而减少冲突分配次数能降低误差, 提高合成结果的可信度。

本文提出的局部冲突部分分配法基本思想来源如下: 标准证据理论能很好地解决低冲突下的证据合成问题, 却不适用于高冲突下的证据合成, 而以往的局部冲突分配法对标准理论的基本结构进行了修整。能否找到一种方法在保留标准证据理论的基本结构下同时能适用于各种冲突下的证据合成? 通过分析标准证据理论的原理不难发现, 标准证据理论之所以不适用于高冲突证据合成, 是因为它在合成证据之前没有考虑冲突强度的大小, 如果在合成证据之前能将冲突控制在标准证据理论的适用范围之内, 那么就可以在保留该理论的基本结构下处理各种冲突的证据合成问题。基于此想法提出了本文的部分分配策略, 在合成证据之前它将局部冲突按阈值分为两个集合, 只有大于阈值的那部分冲突才被分配, 从而降低冲突。具体实现步骤如下:

a) 计算两个证据的局部冲突。若 $A_i \cap B_j = \emptyset$, 令局部冲突为

$$k_{ij} = m_1(A_i) \times m_2(B_j) \quad (7)$$

b) 确定待分配的局部冲突。将各对焦点产生的局部冲突 k_{ij} 与设定的阈值(0.1)相比较, 若大于阈值, 将其归类为待分配集合; 反之亦然。

c) 部分局部冲突重新分配。若 $k_{ij} > 0.1$, 则将该部分冲突按式(8)分配:

$$\begin{aligned}
 m(A_i) &= \sum_{C_i \cap D_j = A_i} m_1(C_i) m_2(D_j) + \frac{m_1(A_i)}{m_1(A_i) + m_2(B_j)} k_{ij} \\
 m(B_j) &= \sum_{C_i \cap D_j = B_j} m_1(C_i) m_2(D_j) + \frac{m_2(B_j)}{m_1(A_i) + m_2(B_j)} k_{ij} \quad (8)
 \end{aligned}$$

按照以上分配原则对每个局部冲突进行判别分配, 最后得到低冲突的证据。

d) 运用 Dempster 规则对证据进行合成输出。

本文方法的实现流程如图 1 所示。

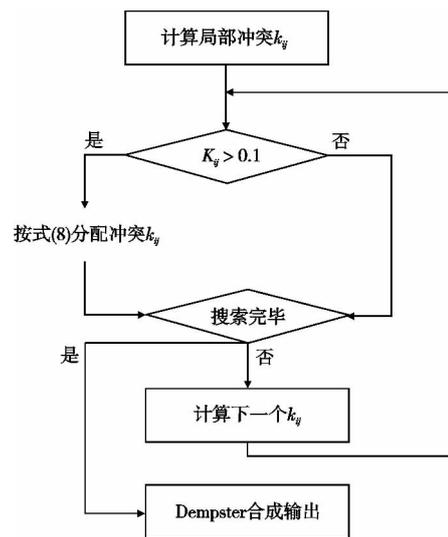


图1 部分冲突分配法实现流程

局部冲突部分分配法合成规则总结如下(以两个证据合成为例):

$$\forall A_i, B_j \quad A_i \cap B_j = \emptyset, k_{ij} = m_1(A_i) \times m_2(B_j) > 0.1$$

$$k_{ji} = m_1(B_j) \times m_2(A_i) > 0.1$$

$$m(A_i) = \sum_{C_i \cap D_j = A_i} m_1(C_i)m_2(D_j) + \frac{m_1(A_i)}{m_1(A_i) + m_2(B_j)} k_{ij} + \frac{m_2(A_i)}{m_1(B_j) + m_2(A_i)} k_{ji}$$

$$m(B_j) = \sum_{C_i \cap D_j = B_j} m_1(C_i)m_2(D_j) + \frac{m_2(B_j)}{m_1(A_i) + m_2(B_j)} k_{ij} + \frac{m_1(B_j)}{m_1(B_j) + m_2(A_i)} k_{ji}$$

$$m_1 \oplus m_2(A_i) = \frac{m(A_i)}{1-k} \text{ 且 } k = \sum_{C_i \cap D_j = \emptyset} m_1(C_i)m_2(D_j) \quad A_i \neq \emptyset$$

$$m_1 \oplus m_2(A_i) = 0 \quad A_i = \emptyset \quad (9)$$

将本文方法用于前面的例子中得到最终融合结果为

$$m(a) = m(c) = 0.4999, m(b) = 0.0002$$

从以上结果不难发现,本文方法能很好地解决冲突证据合成问题,两个证据对 b 的支持度都很小,最终融合输出的支持度也很小,这从某种程度上弥补了 Dempster 规则的不足。

4 算法验证及结果分析

在音/视频联合说话人跟踪系统中,有四个麦克风和—个摄像头收集到五条证据 $m_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 。某个时刻,假设说话人只有三种状态,这三种状态构成识别框架 $\theta = \{a, b, c\}$, 以下分别对证据源在正常情况和受干扰情况下所提供的数据进行各算法的对比分析。

4.1 证据源提供冲突小的证据

在证据弱冲突的情况下,假设各个证据的基本概率指派为

$$m_1(a) = 0.9, m_1(b) = 0, m_1(c) = 0.1;$$

$$m_2(a) = 0.88, m_2(b) = 0.01, m_2(c) = 0.11;$$

$$m_3(a) = 0.5, m_3(b) = 0.2, m_3(c) = 0.3;$$

$$m_4(a) = 0.98, m_4(b) = 0.01, m_4(c) = 0.01;$$

$$m_5(a) = 0.9, m_5(b) = 0.05, m_5(c) = 0.05$$

证据源提供低冲突证据时,四种融合方法的结果比较如表 1 所示。

表 1 证据源提供低冲突证据时融合结果比较

方法	m_1, m_2	m_1, m_2, m_3	m_1, m_2, m_3, m_4	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
Dempster 规则	$m(a) = 0.9863$	$m(a) = 0.9917$	$m(a) = 0.9917$	$m(a) = 1$
	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$
	$m(c) = 0.0137$	$m(c) = 0.0083$	$m(c) = 0.0083$	$m(c) = 0$
Yager 规则	$m(a) = 0.7920$	$m(a) = 0.3960$	$m(a) = 0.3881$	$m(a) = 0.3493$
	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$
	$m(c) = 0.0110$	$m(c) = 0.0033$	$m(c) = 0$	$m(c) = 0$
孙全等人规则	$m(\theta) = 0.1970$	$m(\theta) = 0.6007$	$m(\theta) = 0.6119$	$m(\theta) = 0.6507$
	$m(a) = 0.8930$	$m(a) = 0.6591$	$m(a) = 0.6755$	$m(a) = 0.6613$
	$m(b) = 0.0006$	$m(b) = 0.0242$	$m(b) = 0.0194$	$m(b) = 0.0202$
本文方法	$m(c) = 0.0229$	$m(c) = 0.0622$	$m(c) = 0.0459$	$m(c) = 0.0428$
	$m(\theta) = 0.0835$	$m(\theta) = 0.2545$	$m(\theta) = 0.2592$	$m(\theta) = 0.2757$
	$m(a) = 0.9863$	$m(a) = 0.8927$	$m(a) = 0.9987$	$m(a) = 1$
本文方法	$m(b) = 0$	$m(b) = 0.0336$	$m(b) = 0.0003$	$m(b) = 0$
	$m(c) = 0.0137$	$m(c) = 0.0737$	$m(c) = 0.0010$	$m(c) = 0$

从表 1 可以看出,在弱冲突证据情况下,Dempster 规则和本文方法能很快地收敛,而 Yager 规则和孙全等人规则随着证据的增多,不确定性也随之增大,不利于最终的决策。相比于 Dempster 规则,本文方法有更好的性能,因为 Dempster 规则对 b 的赋值始终为 0,而实际上随着证据的增多,对 b 的信任度也会有所变化,本文方法很好地解决了这个问题,它能根据局部冲突的大小重新分配基本概率赋值,使得分配之后的值更合理,可信度更高。以上结果表明,本文方法能很好地适用于弱冲突证据的合成情况。

4.2 证据源提供冲突大的证据

在证据强冲突情况下,假设各个证据的基本概率指派为

$$m_1(a) = 0.90, m_1(b) = 0, m_1(c) = 0.10;$$

$$m_2(a) = 0, m_2(b) = 0.01, m_2(c) = 0.99;$$

$$m_3(a) = 0.50, m_3(b) = 0.20, m_3(c) = 0.30;$$

$$m_4(a) = 0.98, m_4(b) = 0.01, m_4(c) = 0.01;$$

$$m_5(a) = 0.90, m_5(b) = 0.05, m_5(c) = 0.05$$

证据源提供高冲突证据时,四种融合方法的结果比较如表 2 所示。

表 2 证据源提供高冲突证据时融合结果比较

方法	m_1, m_2	m_1, m_2, m_3	m_1, m_2, m_3, m_4	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
Dempster 规则	$m(a) = 0$	$m(a) = 0$	$m(a) = 0$	$m(a) = 0$
	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$
	$m(c) = 1$	$m(c) = 1$	$m(c) = 1$	$m(c) = 1$
Yager 规则	$m(a) = 0$	$m(a) = 0$	$m(a) = 0$	$m(a) = 0$
	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$	$m(b) = 0$
	$m(c) = 0.099$	$m(c) = 0.0297$	$m(c) = 0.0003$	$m(c) = 0$
孙全等人规则	$m(\theta) = 0.901$	$m(\theta) = 0.9703$	$m(\theta) = 0.9997$	$m(\theta) = 1$
	$m(a) = 0.2337$	$m(a) = 0.2610$	$m(a) = 0.3428$	$m(a) = 0.3781$
	$m(b) = 0.0026$	$m(b) = 0.0391$	$m(b) = 0.0317$	$m(b) = 0.0311$
本文方法	$m(c) = 0.3820$	$m(c) = 0.2888$	$m(c) = 0.2019$	$m(c) = 0.1671$
	$m(\theta) = 0.3817$	$m(\theta) = 0.4111$	$m(\theta) = 0.4236$	$m(\theta) = 0.4237$
	$m(a) = 0.4286$	$m(a) = 0.4629$	$m(a) = 0.8181$	$m(a) = 0.9598$
本文方法	$m(b) = 0$	$m(b) = 0.0324$	$m(b) = 0.0003$	$m(b) = 0$
	$m(c) = 0.5714$	$m(c) = 0.5047$	$m(c) = 0.1816$	$m(c) = 0.0402$

从表 2 可以看出,Dempster 规则和 Yager 规则不能有效地处理冲突证据的合成问题,随着证据数目的增加,可信度基本没有太大变化;孙全等人的规则相比以上两种方法有了一定的进步,但是随着证据的增多,不确定性也随之增大,不利于最终的决策;而本文方法能很好地处理冲突证据的合成问题,它考虑了产生冲突的来源,将冲突只分配给产生冲突的焦元,这种分配更加合理,同时,它也考虑了冲突存在的必然性,因而在某个范围内允许冲突的存在,这种思想与实际情况完全稳合,合成结果也证明了这种方法的有效性。在融合四个证据后就能收敛到最优结果,这个结果也是必然的,因为前两个证据是强冲突的,合成结果的可信度低,而第三个证据并没有明显地支持目标所处的状态,无法抵消存在的冲突,当收集到第四个证据后,该证据对状态 a 基本完全支持,因而能完全消除冲突,得到决策解。

5 结束语

证据理论因其能很好地把握问题的未知性和不确定性,正在受到越来越大的关注。然而强冲突证据下的合成问题限制了该理论的应用领域,针对这个问题,本文提出了一种局部冲突部分分配的方法。该方法最大的创新之处是将局部冲突分配法与标准证据理论有效地结合在一起,先采用局部冲突部分分配法处理强冲突证据,控制冲突的大小在标准证据理论的适用范围之内,之后运用标准证据理论进行合成,它保留了标准证据理论的基本结构。由于本文的阈值选取带有主观因素,这在某种程度上会影响该方法的性能,因此寻求符合要求的客观阈值是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] DEMPSTER A. A generalization of Bayesian inference[M]. 1967.

[2] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976. (下转第 3294 页)

(上接第 3291 页)

- [3] LEFEVRE E, COLOT O, VANNOORENBERGHE P. Belief functions combination and conflict management [J]. *Information Fusion*, 2002, 3(2):149-162.
- [4] YAGER R R. On the D-S framework and new combination rules[J]. *Information Sciences*, 1987, 41(2):93-138.
- [5] 孙全, 叶秀清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式[J]. *电子学报*, 2000, 28(8):117-119.
- [6] 李文立, 郭凯红. D-S 证据理论合成规则及冲突问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(8):1422-1432.
- [7] 戴冠中, 潘泉, 张山鹰, 等. 证据推理的进展及存在的问题[J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(4):465-469.
- [8] 李军伟, 程咏梅, 梁彦, 等. 基于局部冲突分配策略的 DST 算法研究[J]. *控制与决策*, 2000, 25(10):1484-1488.
- [9] 张山鹰, 潘泉, 张洪才. 一种新的证据推理组合规则[J]. *控制与决策*, 2010, 15(5):540-544.
- [10] MARTIN A, OSSWALD C. Toward a combination rule to deal with partial conflict and specificity in belief functions theory[C]//Proc of International Conference on Information Fusion. 2007:1-8.
- [11] 高社生, 倪龙强, 杨凯. 一种新的基于局部冲突分配的证据合成规则[J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(1):43-46.