

基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型

田俊峰, 吴丽娟

(河北大学 数学与计算机学院, 河北 保定 071000)

摘要: 为了提高信任评价的准确性和主观逻辑的适用性, 提出了基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型, 该模型由信任融合和信任传递 2 部分组成。基于信誉的多项式观点的融合方法考虑信誉与观察环境对融合操作的影响, 提高了信任评价的准确性, 更符合人的直觉评判; 信任传递把多项式观点的传递理解为传递过程是二项逻辑观点, 而传递信息是多项式观点, 给出了多项式观点的信任传递公式, 并对相关定理进行了证明。最后, 通过实例分析验证了模型的准确性和适应性。

关键词: 主观逻辑扩展; 多项式观点; 信任传播; 信任融合; 信任传递

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)05-0012-08

Multinomial subjective logic based extended trust propagation model

TIAN Jun-feng, WU Li-juan

(College of Mathematics and Computer, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract: In order to improve the accurateness of trust evaluation and the applicability of subjective logic, a multinomial subjective logic based extended trust propagation model (MSL-ETPM) was presented, which was composed of trust fusion and trust transitivity. Making the fused opinion more accurate and more in line with the intuitive judgment of human, reputation-based fusion operator of multinomial opinions takes effects of the reputation value and observation circumstance into consideration. Trust transitivity interprets multinomial opinion transitivity as meaning that transitivity process is binomial logical opinion and transitivity information is multinomial opinion, giving trust transitivity formula of multinomial opinion and proving related theorem. Finally, the accuracy and adaptability of the model are put to the proof by example analysis.

Key words: extended subjective logic; multinomial opinion; trust propagation; trust fusion; trust transitivity

1 引言

随着网络技术和普及, 网络环境中实体之间的信任已成为影响各种应用系统健康发展的关键性问题之一。信任是人类的认知现象^[1], 是对实体行为的主观判断, 是包含实体主观性和复杂性的多维信任^[2]。关于信任模型的研究虽然已经取得了一些成绩, 但是随着 P2P、云计算、物联网等大规模系统的出现和发展, 对信任模型又提出了新的要求。信任传播^[3]是信任模型的主要内容, 因此研

究信任传播对信任模型的发展具有重要意义。

2 相关工作

Blaze 等人^[4]首先提出了信任管理的概念, 其基本思想是承认开放系统中安全信息的不完整性, 系统的安全决策需要依靠可信任的第三方提供附加安全信息, 因此, 将信任与分布式系统的安全结合在一起, 为分布式系统提供了一个安全的决策框架。在此之后, 不同的学者从不同的角度、在不同的应用环境下对信任管理和信任模型进行了深入的研究。

收稿日期: 2012-08-06; 修回日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60873203, 61170254); 河北省杰出青年基金资助项目(F2010000317); 河北省自然科学基金资助项目(F2012201145); 河北省高等学校科学技术研究重点基金资助项目 (ZH2012029)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60873203, 61170254); Hebei Province Outstanding Youth Fund Projects(F2010000317); The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2012201145); Hebei Province Higher School Scientific and Technological Research of Key Projects (ZH2012029)

Beth 等人^[5]提出了基于概率的信任模型，将信任分为直接信任和推荐信任，以肯定经验和否定经验计算出的概率作为实体信任度的度量，并给出了信任合成方法。在推荐信任合成时采用简单的算术平均法，无法真实地反映实体间的信任关系。Rahman 等人^[6]从信任的主观性入手将信任关系分为直接信任和推荐信任，强调了信任度传递的条件性，给出了信任度的传递协议和计算公式，信任合成采用的也是算术平均法。Wang Yao 等人^[7]使用贝叶斯网络对推荐信任进行推理，但这种方法过于依赖专家经验，致使信任传递和合并中的应用受限。R.Guha 等人^[8]提出了一种基于权重的信任传递方法，但权重是人为确定的，没有量化依据，在实际应用中很难确定。Yu Bin 等人^[9,10]提出了基于 Dempster-shafer 证据理论来研究信任的传递问题，但该方法当证据高度冲突时会产生不合理的结果。上述模型在信任传递和合并时，都存在一个问题：没有考虑人认识事物的主观性。因为信任评价是人给出的，无论信任传递和合并操作如何准确，都不能不考虑人的主观因素影响。所以 Jøsang 等人提出并利用主观逻辑对信任关系进行建模。

Jøsang^[11]认为信任具有不确定性和主观性，通过引入证据空间和观点空间的概念来描述和度量信任关系，并定义了一套主观逻辑运算符进行信任的推导和计算，但 Jøsang 在信任的传递问题中只给出了二项式观点的传递公式；对于融合操作，没有对信任源的可靠性作任何假设，也没有考虑环境的影响。脱离开具体的环境讨论信任问题没有意义^[12]。

针对现有信任融合和信任传递的现状以及 Jøsang 信任模型的不足，本文对主观逻辑理论进行扩展，提出了基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型(MSL-ETPM, multinomial subjective logic based extended trust propagation model)，重点对多项式观点融合和传递问题展开研究。主要解决了以下问题：1) 当证据冲突时如何对观点进行融合，即基于信誉的多项式观点的融合；2) 多项式观点的表达和传递。

3 基于多项式主观逻辑的信任融合与传递

假设 X 是包含 k 个互不相交命题 $x_i (i=1, 2, \dots, k)$ 的辨识框架。首先构建对辨识框架 X 的信任关系。如图 1 所示，假如实体 A 想获知对辨识框架 X 的信任观点，那么 A 会向与自己有过交互的实体 B

发出请求，询问 B 是否对辨识框架 X 有信任观点。为了获得对 X 的准确信任观点，B 还会向与自己有过交互的其他 l 个实体 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l$ 分别发出请求，询问是否对 X 有信任观点，然后实体 B 对询问获得的 l 个实体的观点和自己对 X 的观点进行融合，结果推荐给实体 A。

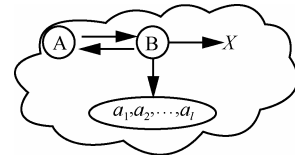


图 1 构建一个信任关系

在现实世界中，信任评价很难精确到取值为“相信”或“不相信”的二值逻辑上，对信任实体的评价很可能介于相信和不相信之间，即信任评价结果可能是多维的。主观逻辑可以建立在多值逻辑上，所形成的观点即为多项式观点。

3.1 多项式观点

多项式观点是二项式观点的一般化，是包含信任向量、不确定量和基率向量的复合函数，定义如下。

定义 1 (多项式观点): 2^X 是辨识框架 X 的幂集， $m_X(x)$ 是辨识框架的信任量函数，实体 A 对辨识框架 X 的观点为 $\omega_X^A = (\vec{b}, u, \vec{a})$ ，其中， \vec{b} 是关于命题 x_i 的信任函数， u 是不确定量， \vec{a} 是关于命题 x_i 的基率值^[13,14]，根据文献[15]中信任函数和不确定函数的定义，辨识框架中各个命题 x_i 的信任值以及对 X 的不确定值如下。

$$\begin{cases} b(x_i) = \sum_{y \in \{x_i\}} m(y) = m(x_i) \\ u = \sum_{y \in 2^X} m(y) \end{cases}, y \in 2^X, i=1, 2, \dots, k \quad (1)$$

根据信任量函数的特点 $\sum_{x \in 2^X} m_X(x) = 1$ ，得到 $u + \sum_{i=1}^k b(x_i) = 1$ ，其中， $0 \leq u \leq 1, 0 \leq b(x_i) \leq 1$ 。

根据文献[16,17]，得到多项式观点所对应的 Dirichlet 分布函数

$$\varphi(p|\vec{r}, \vec{a}) = \frac{\Gamma\left(\sum_{i=1}^k (r(x_i) + Ca(x_i))\right)}{\prod_{i=1}^k \Gamma(r(x_i) + Ca(x_i))} \prod_{i=1}^k p(x_i)^{(r(x_i) + Ca(x_i) - 1)} \quad (2)$$

其中， \vec{r} 表示辨识框架 X 中互不相交命题的证据向量， \vec{a} 表示相同命题上的基率向量。 $r(x_1), \dots, r(x_k) \geq 0$,

$$a(x_1), \dots, a(x_k) \in [0, 1], \sum_{i=1}^k a(x_i) = 1.$$

3.2 基于信誉的多项式观点的融合

在 Jøsang 提出的信任融合中, 当证据高度冲突时会产生不合理的结果。以二项式独立观点的融合为例, 实体 A、B 对同一二项式命题 x 进行观察, 如果实体 A 观察的肯定次数为 11, 否定次数为 1, 即 $(r, s) = (11, 1)$, 而实体 B 的观察情况为 $(r, s) = (1, 11)$, 根据 Jøsang 提出的信任融合操作, 融合后虚拟实体 [A,B] 的 $(r, s) = (12, 12)$, 对应的观点 $\omega_X^{A \odot B} = (0.462, 0.462, 0.076)$, 此时, 对二项式命题 x 的信任度和不信任度相同。这是由于 Jøsang 提出的信任融合中并没有对信任源^[2]的可靠性做任何假设, 导致出现无用数据的输入和输出^[18]。

下面给出信誉和信誉值的概念。

信誉: 基于对某个实体历史行为的观察所得出的对该实体的可信程度。

信誉值: 所有邻居节点^[2]对某一特定实体评价的定量表示, 用 rep 来表示。

3.2.1 基于信誉的独立观点的融合

假设 2 个实体在不同的时间段对辨识框架 X 进行观察所获得的观点为相互独立的观点。

2 个独立的 Dirichlet 密度函数的基于信誉的融合操作。

令 $\varphi(\bar{r}_X^A, \bar{a}_X^A)$ 和 $\varphi(\bar{r}_X^B, \bar{a}_X^B)$ 分别代表实体 A 和实体 B 对 X 的多项式 Dirichlet 密度函数, rep^A 为实体 A 的信誉值, rep^B 为实体 B 的信誉值, 融合后的 Dirichlet 密度函数为 $\varphi(\bar{r}_X^{A \odot B}, \bar{a}_X^{A \odot B})$, 定义如下

$$\left\{ \begin{aligned} r_{(x_i)}^{A \odot B} &= R^A r_{(x_i)}^A + R^B r_{(x_i)}^B \\ a_{(x_i)}^{A \odot B} &= \frac{R^A \sum_{i=1}^k r_{(x_i)}^A}{R^B \sum_{i=1}^k r_{(x_i)}^B + R^A \sum_{i=1}^k r_{(x_i)}^A} a_{(x_i)}^A + \frac{R^B \sum_{i=1}^k r_{(x_i)}^B}{R^B \sum_{i=1}^k r_{(x_i)}^B + R^A \sum_{i=1}^k r_{(x_i)}^A} a_{(x_i)}^B \end{aligned} \right. \quad (3)$$

其中, $R^A = \frac{rep^A}{R}$, $R^B = \frac{rep^B}{R}$, Dirichlet 密度函数 $\varphi(\bar{r}_X^{A \odot B}, \bar{a}_X^{A \odot B})$ 的虚拟实体 [A,B] 的信誉值为 R 。 R 值的选择是根据在初始情况下, 每个实体的信誉值

为所有实体相同的基率信誉值^[19], 在此 R 取 0.5 或 2 个信誉值的平均。式(3)的求解更倾向于信誉高的实体的观察结果。

根据证据空间和观念空间的映射, 以及 Dirichlet 函数的融合操作, 可以得到独立观点的基于信誉的融合操作。

对于独立观点的基于信誉的融合操作: 令 $\omega_X^A = (\bar{b}_X^A, u_X^A, \bar{a}_X^A)$ 和 $\omega_X^B = (\bar{b}_X^B, u_X^B, \bar{a}_X^B)$ 分别表示实体 A 和实体 B 关于 X 的信任观点, 观点 $\omega_X^{A \odot B} = (\bar{b}_X^{A \odot B}, u_X^{A \odot B}, \bar{a}_X^{A \odot B})$ 代表 ω_X^A 和 ω_X^B 的基于信誉的融合, 可以把它看作是虚拟实体 [A,B] 关于 X 的多项式观点。

$$\left\{ \begin{aligned} b_{(x_i)}^{A \odot B} &= \frac{R^A b_{(x_i)}^A u_X^B + R^B b_{(x_i)}^B u_X^A}{K} \\ u_X^{A \odot B} &= \frac{u_X^A u_X^B}{K} \\ a_{(x_i)}^{A \odot B} &= \frac{R^B a_{(x_i)}^B u_X^A + R^A a_{(x_i)}^A u_X^B - (R^A a_{(x_i)}^A + R^B a_{(x_i)}^B) u_X^A u_X^B}{R^B u_X^A + R^A u_X^B - (R^A + R^B) u_X^A u_X^B} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中, $K = R^B u_X^A + R^A u_X^B + (1 - R^A - R^B) u_X^A u_X^B$, 且 $K \neq 0$ 。

当 $K = 0$ 时, 即 ω_X^A 和 ω_X^B 是完全确定的观点。

$$\left\{ \begin{aligned} b_{(x_i)}^{A \odot B} &= \gamma^A b_{(x_i)}^A + \gamma^B b_{(x_i)}^B \\ u_X^{A \odot B} &= 0 \\ a_{(x_i)}^{A \odot B} &= \gamma^B a_{(x_i)}^B + \gamma^A a_{(x_i)}^A \end{aligned} \right.$$

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma^A &= \lim_{\substack{u_X^A \rightarrow 0 \\ u_X^B \rightarrow 0}} \frac{R^A u_X^B}{R^B u_X^A + R^A u_X^B + (1 - R^A - R^B) u_X^A u_X^B} \\ \gamma^B &= \lim_{\substack{u_X^A \rightarrow 0 \\ u_X^B \rightarrow 0}} \frac{R^B u_X^A}{R^B u_X^A + R^A u_X^B + (1 - R^A - R^B) u_X^A u_X^B} \end{aligned} \right.$$

3.2.2 基于信誉的完全依赖观点的融合

假设 2 个实体在相同的时间段对辨识框架 X 观察所获得的观点为相互依赖的观点。

对于 2 个完全依赖的 Dirichlet 密度函数的基于信誉的融合操作。

令 $\varphi(\bar{r}_X^A, \bar{a}_X^A)$ 和 $\varphi(\bar{r}_X^B, \bar{a}_X^B)$ 分别代表实体 A 和实体 B 对 X 的 Dirichlet 密度函数, 这 2 个概率密度函数完全依赖, 融合后的 Dirichlet 密度函数为 $\varphi(\bar{r}_X^{A \odot B}, \bar{a}_X^{A \odot B})$, 定义如下

$$\begin{cases} r_{(x_i)}^{A \odot B} = \frac{(R^A r_{(x_i)}^A + R^B r_{(x_i)}^B)}{2} \\ a_{(x_i)}^{A \odot B} = \frac{(a_{(x_i)}^A + a_{(x_i)}^B)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

运用上面定义及观点空间和事实空间的映射可以获得如下操作。

对于完全依赖观点的基于信誉的融合操作。

令 $\omega_X^A = (\bar{b}_X^A, u_X^A, \bar{a}_X^A)$ 和 $\omega_X^B = (\bar{b}_X^B, u_X^B, \bar{a}_X^B)$ 分别表示实体 A 和实体 B 在同一时间段观察辨识框架 X 所得到的观点，观点 $\omega_X^{A \odot B} = (\bar{b}_X^{A \odot B}, u_X^{A \odot B}, \bar{a}_X^{A \odot B})$ 代表 ω_X^A 和 ω_X^B 的基于信誉的融合，可以把它看作是虚拟实体 [A,B] 关于 X 的多项式观点。

$$\begin{cases} b_{(x_i)}^{A \odot B} = (R^A b_{(x_i)}^A u_X^B + R^B b_{(x_i)}^B u_X^A) / K \\ u_X^{A \odot B} = 2u_X^A u_X^B / K \\ a_{(x_i)}^{A \odot B} = (a_{(x_i)}^B + a_{(x_i)}^A) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

其中， $K = R^B u_X^A + R^A u_X^B + (2 - R^A - R^B) u_X^A u_X^B$ ，且 $K \neq 0$ 。

当 $K = 0$ 时，即 ω_X^A 和 ω_X^B 是完全确定的观点。

$$\begin{cases} b_{(x_i)}^{A \odot B} = \gamma^A b_{(x_i)}^A + \gamma^B b_{(x_i)}^B \\ u_X^{A \odot B} = 0 \\ a_{(x_i)}^{A \odot B} = \gamma^B a_{(x_i)}^B + \gamma^A a_{(x_i)}^A \end{cases}$$

其中，

$$\begin{cases} \gamma^A = \lim_{\substack{u_X^A \rightarrow 0 \\ u_X^B \rightarrow 0}} \frac{R^A u_X^B}{R^B u_X^A + R^A u_X^B + (2 - R^A - R^B) u_X^A u_X^B} \\ \gamma^B = \lim_{\substack{u_X^A \rightarrow 0 \\ u_X^B \rightarrow 0}} \frac{R^B u_X^A}{R^B u_X^A + R^A u_X^B + (2 - R^A - R^B) u_X^A u_X^B} \end{cases}$$

3.2.3 基于信誉的部分依赖观点的融合

假设 2 个实体在 2 个交错的时间段观察辨识框架 X 所得到的观点为 2 个部分依赖的观点，同时在交错的时间段中实体的观察环境也有所不同。

定义 3 (时间依赖度)：如果 2 个观点的观察时间重叠，则这 2 个观点在观察时间上相互依赖，用符号 η_i 来表示。

t^{AB} 表示重叠时间， t^A 表示实体 A 的观察时间， t^B 表示实体 B 的观察时间，则实体 A 对实体 B 的时间依赖度为 $\eta_i^{AB} = \frac{t^{AB}}{t^A}$ ，实体 B 对实体 A 的时间依赖度为 $\eta_i^{BA} = \frac{t^{AB}}{t^B}$ 。

定义 4 (环境依赖度)：2 个观察环境相互依赖的程度，用符号 η_e 表示。

e^{AB} 表示观察信息重叠部分的信息量， e^A 表示实体 A 的观察信息量， e^B 表示实体 B 的观察信息量，则实体 A 对实体 B 的环境依赖度为 $\eta_e^{AB} = \frac{e^{AB}}{e^A}$ ，

实体 B 对实体 A 的环境依赖度为 $\eta_e^{BA} = \frac{e^{AB}}{e^B}$ 。当观察到的信息有重叠时，重叠部分所获得的观点为依赖观点，其余部分为独立观点。

定义 5 (依赖度)：表示 2 个观点相互依赖的程度，用符号 η 来表示，是时间依赖度和环境依赖度的加权平均，为 $\eta^{AB} = \delta \eta_i^{AB} + (1 - \delta) \eta_e^{AB}$ ， $\eta^{BA} = \delta \eta_i^{BA} + (1 - \delta) \eta_e^{BA}$ ，其中， δ 为权重，可取 0.5。

图 2 代表部分依赖观察的一种情况。图中 $\varphi_X^{Ai(B)}$ 表示实体 A 对实体 B 完全独立部分的概率密度函数， $\varphi_X^{Bi(A)}$ 表示实体 B 对实体 A 完全独立部分的概率密度函数， $\varphi_X^{Ad(B)}$ 表示实体 A 对实体 B 依赖部分的概率密度函数， $\varphi_X^{Bd(A)}$ 表示实体 B 对实体 A 依赖部分的概率密度函数。所对应的 $\omega_X^{Ai(B)}$ 和 $\omega_X^{Bi(A)}$ 代表 A 和 B 观点的独立部分， $\omega_X^{Ad(B)}$ 和 $\omega_X^{Bd(A)}$ 代表 A 和 B 观点的依赖部分。

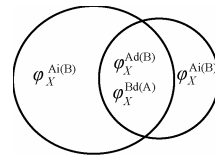


图 2 基于部分依赖观察的 Dirichlet 概率密度函数

独立部分、依赖部分的 Dirichlet 分布可以定义为依赖度 η^{AB} 和 η^{BA} 的函数。

$$\varphi_X^{Ai(B)} : r_{(x_i)}^{Ai(B)} = R^A r_{(x_i)}^A (1 - \eta^{AB})$$

$$\varphi_X^{Bi(A)} : r_{(x_i)}^{Bi(A)} = R^B r_{(x_i)}^B (1 - \eta^{BA})$$

$$\varphi_X^{Ad(B)} : r_{(x_i)}^{Ad(B)} = R^A r_{(x_i)}^A \eta^{AB}$$

$$\varphi_X^{Bd(A)} : r_{(x_i)}^{Bd(A)} = R^B r_{(x_i)}^B \eta^{BA}$$

2 个部分依赖的 Dirichlet 密度函数的融合可以定义成独立部分、依赖部分的累加融合。其中，完全依赖部分使用平均融合。

对于 2 个部分依赖的 Dirichlet 密度函数的基于信誉的融合操作如下。

令 $\varphi(\bar{r}_X^A, \bar{a}_X^A)$ 和 $\varphi(\bar{r}_X^B, \bar{a}_X^B)$ 分别代表实体 A 和实体 B 对 X 的多项式 Dirichlet 密度函数，这 2 个 Dirichlet 密度函数部分依赖，A 对 B 的依赖度为

η^{AB} , B 对 A 的依赖度为 η^{BA} , 融合后的 Dirichlet 密度函数为 $\varphi(\vec{r}_X^{A\delta^B}, \vec{a}_X^{A\delta^B})$, 定义如下

$$\begin{cases} r_{(x_i)}^{A\delta^B} = r_{(x_i)}^{Ai(B)} + r_{(x_i)}^{Bi(A)} + \frac{(r_{(x_i)}^{Ad(B)} + r_{(x_i)}^{Bd(A)})}{2} \\ a_{(x_i)}^{A\delta^B} = \frac{(a_{(x_i)}^A + a_{(x_i)}^B)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

根据证据空间和观念空间的映射, 以及 Dirichlet 函数的融合操作, 可以得到部分依赖观点的融合操作。

对于部分依赖观点的基于信誉的融合操作。

令 $\omega_X^A = (\vec{b}_X^A, u_X^A, \vec{a}_X^A)$ 和 $\omega_X^B = (\vec{b}_X^B, u_X^B, \vec{a}_X^B)$ 分别表示实体 A 和实体 B 关于 X 的观点, 这 2 个观点部分依赖, 观点 $\omega_X^{A\delta^B} = (\vec{b}_X^{A\delta^B}, u_X^{A\delta^B}, \vec{a}_X^{A\delta^B})$ 代表部分依赖观点 ω_X^A 和 ω_X^B 基于信誉的融合, 可以把它看作是虚拟实体 [A, B] 关于 X 的多项式观点。实际上表示的是独立部分观点 ($\omega_X^{Ai(B)}$ 和 $\omega_X^{Bi(A)}$)、依赖部分观点 ($\omega_X^{Ad(B)}$ 和 $\omega_X^{Bd(A)}$) 的累加融合。

$$\begin{cases} b_{(x_i)}^{A\delta^B} = \frac{(\lambda^{AB} R^A b_{(x_i)}^A u_X^B + \lambda^{BA} R^B b_{(x_i)}^B u_X^A)}{K} \\ u_X^{A\delta^B} = \frac{u_X^A u_X^B}{K} \\ a_{(x_i)}^{A\delta^B} = \frac{(a_{(x_i)}^B + a_{(x_i)}^A)}{2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $K = \lambda^{BA} R^B u_X^A + \lambda^{AB} R^A u_X^B + (1 - R^A \lambda^{AB} - R^B \lambda^{BA}) u_X^A u_X^B$,

$\lambda^{AB} = \left(1 - \frac{1}{2} \eta^{AB}\right)$, $\lambda^{BA} = \left(1 - \frac{1}{2} \eta^{BA}\right)$, 且 $K \neq 0$ 。

当 $K = 0$ 时, 即 ω_X^A 和 ω_X^B 是完全确定的观点。

$$\begin{cases} b_{(x_i)}^{A\delta^B} = \gamma^A b_{(x_i)}^A + \gamma^B b_{(x_i)}^B \\ u_X^{A\delta^B} = 0 \\ a_{(x_i)}^{A\delta^B} = \gamma^B a_{(x_i)}^B + \gamma^A a_{(x_i)}^A \end{cases}$$

其中,

$$\begin{cases} \gamma^A = \lim_{\substack{u_X^A \rightarrow 0 \\ u_X^B \rightarrow 0}} \frac{\lambda^{AB} R^A u_X^B}{\lambda^{BA} R^B u_X^A + \lambda^{AB} R^A u_X^B + (1 - R^A \lambda^{AB} - R^B \lambda^{BA}) u_X^A u_X^B} \\ \gamma^B = \lim_{\substack{u_X^A \rightarrow 0 \\ u_X^B \rightarrow 0}} \frac{\lambda^{BA} R^B u_X^A}{\lambda^{BA} R^B u_X^A + \lambda^{AB} R^A u_X^B + (1 - R^A \lambda^{AB} - R^B \lambda^{BA}) u_X^A u_X^B} \end{cases}$$

3.3 多项式观点的传递

A 关于 B 的观点为 $\omega_B^A = (b_B^A, d_B^A, u_B^A, a_B^A)$ 。B 关于框架 X 的观点是一个多项式观点, 表示为 $\omega_X^B = (\vec{b}, u, \vec{a})$, A 通过实体 B 的推荐可以获得关于

辨识框架 X 的观点。在传递的过程中, A 对 B 的观点要么相信要么不相信, 仍然是关于二项逻辑的观点, 与二项观点的传递一样, 唯一不同的是 B 所推荐的观点为多项式观点。

信任的传递是主观传递, 因此在信任传递过程中对 A 不相信 B 的理解会不同, 在这里解释为 A 认为 B 忽视了辨识框架 X 中各个命题的真实性, 因此, A 也忽视了辨识框架 X 中各个命题的真实性^[20]。

定理 1 多项式观点的传递

A 对 B 的推荐所执有的观点是 $\omega_B^A = (b_B^A, d_B^A, u_B^A, a_B^A)$, B 推荐的内容即 B 关于辨识框架 X 的观点为 $\omega_X^B = (\vec{b}_X^B, u_X^B, \vec{a}_X^B)$, 让 $\omega_X^{A:B} = (\vec{b}_X^{A:B}, u_X^{A:B}, \vec{a}_X^{A:B})$ 表示 A 经过 B 的推荐获得的关于辨识框架 X 的观点, 定义如下

$$\begin{cases} b_{(x_i)}^{A:B} = b_B^A b_{(x_i)}^B \\ u_X^{A:B} = d_B^A + u_B^A + b_B^A u_X^B \\ a_{(x_i)}^{A:B} = a_{(x_i)}^B \end{cases} \quad (9)$$

$\omega_X^{A:B}$ 为经过 B 的推荐获得的 A 关于 X 的多项式观点, 用 \otimes' 来表示不确定优先的多项式观点的传递操作, 得到: $\omega_X^{A:B} = \omega_B^A \otimes' \omega_X^B$, 其中, $\omega_X^{A:B}$ 和 ω_X^B 都是多项式观点。

证明 因为多项式观点中只显示“信任”和“不确定”, 因此可以转化为 k 个二项式观点。实体 B 关于辨识框架 X 的观点 $\omega_X^B = (\vec{b}_X^B, u_X^B, \vec{a}_X^B)$ 转化成 k 个二项式观点, 分别为

$$\begin{cases} \omega_{(x_1)}^B = (b_{(x_1)}^B, d_{(x_1)}^B, u_{(x_1)}^B, a_{(x_1)}^B) \\ \omega_{(x_2)}^B = (b_{(x_2)}^B, d_{(x_2)}^B, u_{(x_2)}^B, a_{(x_2)}^B) \\ \vdots \\ \omega_{(x_k)}^B = (b_{(x_k)}^B, d_{(x_k)}^B, u_{(x_k)}^B, a_{(x_k)}^B) \end{cases}$$

这 k 个二项式观点分别和实体 A 关于 B 的观点运用主观逻辑的 discounting 算子获得 A 关于 k 个命题 x_i 的二项式观点, 分别为

$$\begin{cases} \omega_{(x_1)}^{A:B} = (b_{(x_1)}^{A:B}, d_{(x_1)}^{A:B}, u_{(x_1)}^{A:B}, a_{(x_1)}^{A:B}) \\ = (b_B^A b_{(x_1)}^B, b_B^A d_{(x_1)}^B, d_B^A + u_B^A + b_B^A u_{(x_1)}^B, a_{(x_1)}^B) \\ \omega_{(x_2)}^{A:B} = (b_{(x_2)}^{A:B}, d_{(x_2)}^{A:B}, u_{(x_2)}^{A:B}, a_{(x_2)}^{A:B}) \\ = (b_B^A b_{(x_2)}^B, b_B^A d_{(x_2)}^B, d_B^A + u_B^A + b_B^A u_{(x_2)}^B, a_{(x_2)}^B) \\ \vdots \\ \omega_{(x_k)}^{A:B} = (b_{(x_k)}^{A:B}, d_{(x_k)}^{A:B}, u_{(x_k)}^{A:B}, a_{(x_k)}^{A:B}) \\ = (b_B^A b_{(x_k)}^B, b_B^A d_{(x_k)}^B, d_B^A + u_B^A + b_B^A u_{(x_k)}^B, a_{(x_k)}^B) \end{cases}$$

因为多项式观点中只显示“信任”和“不确定”，所以 A 经过 B 的推荐对辩识框架 X 的观点 $\omega_X^{A:B} = (\vec{b}_X^{A:B}, u_X^{A:B}, \vec{a}_X^{A:B})$ 表示为

$$\begin{cases} b_{(x_1)}^{A:B} = b_B^A b_{(x_1)}^B, & a_{(x_1)}^{A:B} = a_{(x_1)}^B, \\ b_{(x_2)}^{A:B} = b_B^A b_{(x_2)}^B, & a_{(x_2)}^{A:B} = a_{(x_2)}^B, \\ \vdots & \vdots \\ b_{(x_k)}^{A:B} = b_B^A b_{(x_k)}^B, & a_{(x_k)}^{A:B} = a_{(x_k)}^B, \\ u_X^{A:B} = d_B^A + u_B^A + b_B^A u_X^B \end{cases}$$

即为式 (9)，证毕。

4 实例分析

下面将通过实例对 MSL-ETPM 在不同条件下进行信任评价的适应性和准确性进行验证，并与 Jøsang 的主观逻辑理论进行比较分析。

使用 Zadeh 1984 年为了评价 Dempster 理论 (Dempster's rule) 使用过的例子^[21]。Smets 1988 年也使用过这个例子为 Dempster 理论的非规格化版本 (the non-normalised version of Dempster's rule) 进行了辩护^[22]，例子如下。

一个谋杀案有 3 个嫌疑犯 Peter、Paul、Mary 和 2 个证人 W_1 和 W_2 ，这 2 个证人有高度冲突的证词。2 个证人的观点分别用 MSL-ETPM 的基于信誉的信任融合操作和主观逻辑的融合操作进行融合。

表 1 给出了 Zadeh 例子中的信任量，从表 1 给出的 W_1 和 W_2 的观点来看，证人 W_1 和 W_2 的证词高度冲突， W_1 倾向于相信 Peter 为罪犯，而 W_2 倾向于相信 Mary 为罪犯。

证人	Peter	Paul	Mary	θ
W_1	0.98	0.01	0.00	0.01
W_2	0.00	0.01	0.98	0.01

如表 2 所示，应用 Dempster 规则所得到的结果对 Peter 为罪犯和 Mary 为罪犯的相信程度都为 0.490，应用非正规化规则所得到的结果认为 3 个嫌疑犯都不是罪犯，而是在已知的辩识框架之外还有未知的可能状态^[22]，即罪犯可能是这 3 个嫌疑犯之外的其他人。

表 3 为在不同情况下 Zadeh 例子分别应用 Jøsang 的信任融合操作和 MSL-ETPM 的信任融合操作所

得结果的比较。以 R 值取 0.5 为例，下面将分别进行分析，分析中用数据对 $c(x, y)$ 表示表 3 中第 x 行与第 y 行进行比较。例如， $c(17, 18)$ 表示表 3 中第 17 行和第 18 行进行比较。

表 2 应用 Dempster 规则和非正规化规则所得到的结果

规则	Peter	Paul	Mary	θ
Dempster's 规则	0.490	0.015	0.490	0.005
非正规化规则	0.009 8	0.000 3	0.009 8	0.000 1

1) 信誉相同，观察环境相同

由 $c(5,1)$ 、 $c(6,2)$ 、 $c(7,3)$ 、 $c(8,4)$ 可知，当证人 W_1 和 W_2 信誉相同，观察环境相同时，MSL-ETPM 的基于信誉的信任融合结果和 Jøsang 的信任融合结果相差非常小，基本一致。

2) 信誉相同，观察环境不同

由 $c(9,1)$ 、 $c(10,2)$ 、 $c(11,3)$ 、 $c(12,4)$ 可知，当证人 W_1 和 W_2 信誉相同，观察环境不同时，MSL-ETPM 模型的基于信誉的信任融合结果倾向于相信观察环境好的实体的观点，比较准确。

3) 信誉不同，观察环境相同

取 2 组信誉值，一组为 W_1 的信誉值为 0.45， W_2 的信誉值为 0.65，一组为 W_1 的信誉值为 0.2， W_2 的信誉值为 0.9。由 $c(13,1)$ 、 $c(14,1)$ 、 $c(15,2)$ 、 $c(16,2)$ 、 $c(17,3)$ 、 $c(18,3)$ 、 $c(19,4)$ 、 $c(20,4)$ 、 $c(13,14)$ 、 $c(15,16)$ 、 $c(17,18)$ 、 $c(19,20)$ 可知，当信誉不同，观察环境相同时，MSL-ETPM 的基于信誉的信任融合结果倾向于相信信誉值高的一方的观点，比较准确，且 2 个证人的信誉值相差越大，结果对信誉值高的实体观点的倾向程度越明显。

4) 信誉不同，观察环境不同

仍然取上面 2 组信誉值。由 $c(21,1)$ 、 $c(22,1)$ 、 $c(23,2)$ 、 $c(24,2)$ 、 $c(25,3)$ 、 $c(26,3)$ 、 $c(27,4)$ 、 $c(28,4)$ 、 $c(21,22)$ 、 $c(23,24)$ 、 $c(25,26)$ 、 $c(27,28)$ 可知，当信誉不同，观察环境不同时，MSL-ETPM 的基于信誉的信任融合结果倾向于相信信誉值高观察环境好的实体的观点，比较准确，且 2 个证人的信誉值相差越大，结果对信誉值高的实体观点的倾向程度越明显。由 $c(21,9)$ 、 $c(22,9)$ 、 $c(23,10)$ 、 $c(24,10)$ 、 $c(25,11)$ 、 $c(26,11)$ 、 $c(27,12)$ 、 $c(28,12)$ 、 $c(21,13)$ 、 $c(22,14)$ 、 $c(23,15)$ 、 $c(24,16)$ 、 $c(25,17)$ 、 $c(26,18)$ 、 $c(27,19)$ 、 $c(28,20)$ 可知，结果对信誉值高观察环境也好的实体观点的倾向程度高于对一方面好的实体观点的倾向程度。

表 3 在不同情况下 Zadeh 例子应用不同融合操作所得结果的比较

模型	实体关系	依赖类型	信赖度/信誉值	Peter	Paul	Mary	θ	序号
Jøsang		观点独立	$\eta_i^{w_1w_2} = 0, \eta_i^{w_2w_1} = 0$	0.492 5	0.010 0	0.492 5	0.005 0	1
		观点依赖	$\eta_i^{w_1w_2} = 1, \eta_i^{w_2w_1} = 1$	0.49	0.01	0.49	0.01	2
		部分依赖	$\eta_i^{w_1w_2} = 0.8, \eta_i^{w_2w_1} = 0.4$	0.421 2	0.010 0	0.561 6	0.007 2	3
			$\eta_i^{w_1w_2} = 0.4, \eta_i^{w_2w_1} = 0.8$	0.561 6	0.010 0	0.421 2	0.007 2	4
MSL-ETPM	信誉相同, 环境相同	观点独立	$\eta_i^{w_1w_2} = 0, \eta_i^{w_2w_1} = 0$	0.493 7	0.010 1	0.493 7	0.002 5	5
		观点依赖	$\eta_i^{w_1w_2} = 1, \eta_i^{w_2w_1} = 1$	0.492 5	0.010 0	0.492 5	0.005 0	6
	$rep^{w_1} = rep^{w_2} = 1,$ $\eta_e^{w_1w_2} = \eta_e^{w_2w_1} = 1$	部分依赖	$\eta_i^{w_1w_2} = 0.8, \eta_i^{w_2w_1} = 0.4$	0.422 7	0.010 1	0.563 6	0.003 6	7
			$\eta_i^{w_1w_2} = 0.4, \eta_i^{w_2w_1} = 0.8$	0.563 6	0.010 1	0.422 7	0.003 6	8
	信誉相同, 环境不同	观点独立	$\eta_i^{w_1w_2} = 0, \eta_i^{w_2w_1} = 0$	0.441 9	0.010 1	0.545 0	0.003 0	9
		观点依赖	$\eta_i^{w_1w_2} = 1, \eta_i^{w_2w_1} = 1$	0.419 4	0.010 1	0.566 2	0.004 3	10
	$rep^{w_1} = rep^{w_2} = 1,$ $\eta_e^{w_1w_2} = 1, \eta_e^{w_2w_1} = 0.3$	部分依赖	$\eta_i^{w_1w_2} = 0.8, \eta_i^{w_2w_1} = 0.4$	0.394 5	0.010 1	0.591 8	0.003 6	11
			$\eta_i^{w_1w_2} = 0.4, \eta_i^{w_2w_1} = 0.8$	0.466 2	0.010 1	0.520 0	0.003 7	12
		观点独立	$rep^{w_1} = 0.45, rep^{w_2} = 0.65$	0.402 5	0.010 0	0.581 4	0.006 1	13
		$\eta_i^{w_1w_2} = 0, \eta_i^{w_2w_1} = 0$	$rep^{w_1} = 0.2, rep^{w_2} = 0.9$	0.178 9	0.010 0	0.805 0	0.006 1	14
	信誉不同, 环境相同	观点依赖	$rep^{w_1} = 0.45, rep^{w_2} = 0.65$	0.401 6	0.010 0	0.579 6	0.009 1	15
			$rep^{w_1} = 0.2, rep^{w_2} = 0.9$	0.178 3	0.010 0	0.802 6	0.009 1	16
		部分依赖	$rep^{w_1} = 0.45, rep^{w_2} = 0.65$	0.362 9	0.010 0	0.619 6	0.007 5	17
			$\eta_i^{w_1w_2} = 0.8, \eta_i^{w_2w_1} = 0.4$	0.155 6	0.010 0	0.827 2	0.007 2	18
	信誉不同, 环境不同	部分依赖	$rep^{w_1} = 0.2, rep^{w_2} = 0.9$	0.442 0	0.010 0	0.540 3	0.007 7	19
			$\eta_i^{w_1w_2} = 0.8, \eta_i^{w_2w_1} = 0.4$	0.204 3	0.010 0	0.777 7	0.008 0	20
观点独立		$rep^{w_1} = 0.45, rep^{w_2} = 0.65$	0.354 0	0.010 0	0.630 6	0.005 4	21	
		$\eta_i^{w_1w_2} = 0, \eta_i^{w_2w_1} = 0$	$rep^{w_1} = 0.2, rep^{w_2} = 0.9$	0.150 4	0.010 0	0.834 5	0.005 1	22
观点依赖		$rep^{w_1} = 0.45, rep^{w_2} = 0.65$	0.333 0	0.010 0	0.649 4	0.007 6	23	
		$rep^{w_1} = 0.2, rep^{w_2} = 0.9$	0.138 9	0.010 0	0.844 0	0.007 1	24	
部分依赖		$rep^{w_1} = 0.45, rep^{w_2} = 0.65$	0.310 6	0.010 0	0.673 0	0.006 4	25	
		$\eta_i^{w_1w_2} = 0.8, \eta_i^{w_2w_1} = 0.4$	0.127 0	0.010 0	0.857 1	0.005 9	26	
	$rep^{w_1} = 0.2, rep^{w_2} = 0.9$	0.376 6	0.010 0	0.606 8	0.006 6	27		
	$\eta_i^{w_1w_2} = 0.4, \eta_i^{w_2w_1} = 0.8$	0.127 0	0.010 0	0.857 1	0.005 9	28		

综上所述, 当 2 个冲突的观点进行融合时, MSL-ETPM 的基于信誉的信任融合操作充分考虑了实体信誉、观察所处环境。当 2 个实体信誉相同、观察环境相同时, 和 Jøsang 的信任融合结果相差非

常小; 当 2 个实体的信誉相同、观察环境不同时, 倾向于相信观察环境好的实体的观点; 当 2 个实体的信誉不同、观察环境相同时, 倾向于相信信誉值高的实体的观点, 且 2 个实体信誉值相差越大, 倾

向程度越明显; 当2个实体信誉不同、观察环境也不同时, 倾向于相信信誉高观察环境也好的实体的观点, 且倾向程度高于一方面高的情况(信誉值高或环境好)。

上述结论恰好与认知一致性理论^[23,24]的观点相符, 认知一致性理论是一种重要的社会认知理论, 该理论认为人的认知有一致性倾向, 当2个实体对同一事物给出不同的观点时出现认知失调, 减少认知失调的一个方法是改变认知的相对重要性, 一致和不一致的认知必须根据其重要性加权; 增加新的认知; 认知-感情一致论认为人们的认识在一定程度上受其感情偏爱所决定。

由此也证明 MSL-ETPM 较之 Jøsang 模型具有更好的适应性和准确性。

5 结束语

本模型基于主观逻辑理论, 考虑到实体的信誉和观察环境对信任融合操作的影响, 提出了基于信誉的信任融合操作方法, 同时给出了多项式观点的传递公式和证明。实例分析表明, MSL-ETPM 模型的基于信誉的信任融合操作比主观逻辑的信任融合操作更符合人的直觉评判, 更准确。下一步将进一步扩展主观逻辑, 如对先验常量 C 的动态化使其更符合实际。假设2个实体在不同的时间段对辩识框架 X 进行观察所获得的观点为相互独立的观点。

参考文献:

- [1] 唐文, 陈钟. 基于模糊集合理论的主观信任管理模型研究[J]. 软件学报, 2003, 14(8): 1401-1408.
TANG W, CHEN Z. Research of subjective trust management model based on the fuzzy set theory[J]. Journal of Software, 2003, 14(8):1401-1408.
- [2] 田俊峰, 杜瑞忠, 刘玉玲. 基于结点行为特征的可信性度量模型[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(6): 934-944.
TIAN J, DU R, LIU Y. Trust evaluation model based on node behavior character[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(6):934-944.
- [3] AUDUN J, STEPHEN M, SIMON P. Exploring different types of trust propagation[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Trust Management(iTrust)[C]. Pisa, Italy, 2006. 179-192.
- [4] BLAZE M, FEIGENBAUM J. Decentralized trust management[A]. Proceedings of the 17th Symposium on Security and Privacy[C]. Okaland, USA, 1996. 164-173.
- [5] THOMAS B, MALTE B, BIRGIT K. Valuation of trust in open networks. GOLLMANN D[A]. Proceedings of the 3rd European Symposium on Research in Computer Security[C]. Brighton: Springer-Verlag, 1994. 3-18.
- [6] ALFAREZ A, STEPHEN H. A distributed trust model[A]. Proceedings of the 1997 Workshop on New Security Paradigms[C]. 1997.48-60.
- [7] WANG Y, VASSILEVA J. Bayesian network-based trust model[A]. Proceedings of the IEEE Computer Society WIC International Conference on Web Intelligence[C]. 2003. 372-378.
- [8] GUHA R, KUMAR R, RAGHAVAN P, et al. Propagation of trust and distrust[A]. Proceedings of the 13th International Conference on World Wide Web[C]. 2004. 17-22.
- [9] YU B, SINGH P. An evidential model of distributed reputation management[A]. Proceedings of the 1st international joint conference on autonomous agents and multi agent systems: part 1[C]. 2002. 294-301.
- [10] YU B, SINGH P. Searching social networks[A]. Proceedings of the Second Intl Joint Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems[C]. 2003.
- [11] AUDUN J. A subjective metric of authentication[A]. Proceedings of the 5th European Symposium on Research in Computer Security[C]. 1998. 329-444
- [12] 张喜征. 虚拟企业信任机制研究—网络环境下信任管理模式创新[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 2005.
ZHANG X Z. Trust Mechanism of the Virtual Enterprise—the Trust Management Model Innovation Under the Network Environment[M]. Changsha: Hunan People's Publishing House, 2005.
- [13] AUDUN J. Fission of opinions in subjective logic[A]. Proceedings of the 12th International Conference on Information Fusion (FUSION 2009)[C]. Seattle, USA, 2009.
- [14] AUDUN J, O'Hara S. Multiplication of multinomial subjective opinions[A]. Proceedings of the 13th International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty (IPMU2010)[C]. Dortmund, Germany, 2010. 248-257.
- [15] AUDUN J. A logic for uncertain probabilities[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2001, 9(3): 1-31.
- [16] AUDUN J, ZIED E. Interpreting belief functions as dirichlet distributions[A]. Proceedings of the 9th European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty (EC-SQARU)[C]. Hammamet, Tunisia, 2007. 393-404.
- [17] AUDUN J, JAVIER D, MARIA R. Cumulative and averaging fusion of beliefs[J]. Information Fusion, 2010, 11(2): 192-200.
- [18] AUDUN J. The consensus operator for combining beliefs[J]. Artificial Intelligence Journal, 2002, 142(1-2): 157-170.
- [19] AUDUN J, TOUHID B, XU Y, et al. Combining trust and reputation management for Web-based services[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Trust, Privacy & Security in Digital Business(TrustBus2008)[C]. Turin, Italy, 2008. 90-99.
- [20] JφSANG A, POPE S. Semantic constraints for trust transitivity[A]. Proc Second Asia-Pacific Conference on Conceptual Modeling (APCCM2005)[C]. Newcastle, Australia, 2005. 59-68.
- [21] LOTFI Z. Review of Shafer's a mathematical theory of evidence[J]. AI Magazine, 1984, 5:81-83.
- [22] SMETS P. Belief functions[A]. Non Standard Logics for Automated Reasoning[C]. London, UK, 1988. 253-286.
- [23] FESTINGER L. A Theory of Cognitive Dissonance[M]. Stanford: Stanford University Press, 1957.
- [24] ARONSON E. Back to the future: retrospective review of Leon Festinger's: a theory of cognitive dissonance[J]. The American Journal of Psychology, 1997, 110(1): 127-137.

作者简介:



田俊峰 (1965-), 男, 河北保定人, 博士, 河北大学教授, 主要研究方向为可信计算、信息安全和网络应用技术。

吴丽娟 (1985-), 女, 山西运城人, 河北大学硕士生, 主要研究方向为可信计算与信息安全。