

## Agent 主观信任的传递性\*

童向荣<sup>+</sup>, 张伟, 龙宇

(烟台大学 计算机学院, 山东 烟台 264005)

### Transitivity of Agent Subjective Trust

TONG Xiang-Rong<sup>+</sup>, ZHANG Wei, LONG Yu

(School of Computer Science, Yantai University, Yantai 264005, China)

+ Corresponding author: E-mail: xr\_tong@163.com

**Tong XR, Zhang W, Long Y. Transitivity of agent subjective trust. Journal of Software, 2012, 23(11): 2862-2870 (in Chinese).** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4303.htm>

**Abstract:** Researches on trust have attracted more and more attentions in multi-agent systems and networks. However, subjective trust generally has no transitivity, which brings much non-determination on delegation, network information propagation, and the construction of subjective trust network. To this end, the paper discusses the binary value of trust relation, and its transitivity in cooperative environment. First, the study gives the definition of objective trust and subjective trust. Next, the paper proposes some useful properties of trust related to the transitivity of trust and demonstrates that objective trust has a relation of equivalence, and subjective trust has a relation of constrained symmetry and transitivity. Finally, a feasible algorithm of subjective trust closure and test algorithms for connectedness are given, and the study has demonstrated that the computational complexities of the above algorithms are polynomial order. The paper made some initial explores on transitivity of subjective trust and gives some useful basic conclusions.

**Key words:** multi-agent system; trust; transitivity; closure

**摘要:** 信任在多 Agent 系统和网络研究中越来越引起重视, 主观信任一般不具备对称性和传递性, 这就为基于信任的委托、信任网络的构建和基于信任的网络信息传播等带来了很大的不确定性。针对此问题, 讨论了合作环境下二值信任关系及其传递性, 给出了客观信任、主观信任的建模方法, 给出了与信任传递性有关的几个性质, 并证明了客观信任具有等价关系, 而主观信任则只具备有条件的对称性和传递性, 研究了构造主观信任传递闭包的可行算法, 讨论了主观信任传递闭包的连通性及其测试算法, 这几种算法的计算复杂度都是多项式级的。为主观信任的传递性研究做了初步的探索, 给出了几个基本结论。

**关键词:** 多 Agent 系统; 信任; 传递性; 闭包

**中图法分类号:** TP18 **文献标识码:** A

信任是合作一方对另一方能否完成所承诺任务的主观评估。直观上, 信任具有主观性, 不具备对称性和传递

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61170224, 60973075); 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB307100); 山东省自然科学基金(ZR2011FL018, ZR2012FL07); 山东省科技发展计划(2012GGB01017); 山东省教育厅科技计划(J11LG35, J10LG27)

收稿时间: 2012-06-09; 修改时间: 2012-08-12; 定稿时间: 2012-08-21

性。“小马过河”的故事说明,老牛和松鼠都是以主观的阈值作为能否过河的判断标准,这是一种主观量,如果老牛告诉小马水深 0.3 米,则这是一种客观量。在信任研究中,同样存在客观信任、主观信任及信任的传递性。若 Agent $a$  与某手机商家  $b$ (如 Amazon)有过多次成功的交易,产生了信任关系,现在  $a$  想从  $b$  处购买某一新款手机(如 iPhone 4s),而  $b$  没有该款手机出售,但是  $b$  给  $a$  推荐商家  $c$  处有该款手机出售,并且  $b$  信任  $c$ ,那么  $a$  是否信任  $c$  就是一个信任传递的问题。

之前的信任研究主要关注于基于统计学的概率论建模或逻辑建模,如 Teacy 等人提出的 TRAVOS 模型<sup>[1]</sup>、Josang 等人提出的采用二项分布的信任管理模型<sup>[2]</sup>、Herzig 等人提出的信任和声誉的逻辑模型<sup>[3]</sup>。这些研究基于以往的历史交互进行统计分析,应用概率统计工具,得到客观统计数据。信任的传递算子研究有了一些进展,如 Hang 等人研究了信任的串联、并联、选择等传播算子<sup>[4]</sup>,这些算子是在保证信任传递性前提下进行数值运算的工具,不同学者根据节点相似性、图结构相似性和距离因素等来选择信任传播路径<sup>[5-7]</sup>。但之前所见对信任的客观性、主观性和传递性等基本性质的研究尚不够充分。国内学者如童向荣等人<sup>[8-11]</sup>、马礼等人<sup>[12]</sup>、田立勤等人<sup>[13]</sup>、李小勇等人<sup>[14]</sup>对网络环境下的信任评估模型和信任预测模型进行了探讨,但学者们对于网络中的信任传递以及基于信任的网络信息传播的研究还不够充分。

为此,本文在以往信任建模研究的基础上<sup>[8-11]</sup>,着重研究信任的客观性、主观性、传递性和连通性。本文与以往信任传递算子研究不同,只研究二值信任,即只有信任和信任两个状态,没有中间状态。在建立了二值主观信任模型的基础上研究了其自反性、对称性和传递性等性质,指出,主观信任具备自反性、有条件的对称性和有条件的传递性。针对主观信任的传递性,本文给出了其传递闭包的可行算法,以及测试信任网络图连通性的算法,这几个算法的计算复杂度都是多项式级的。对于信任的传递算子和传播算子的研究应以满足信任的传递性为前提条件,即如果不满足传递性,则信任的传递算子和传播算子就不能运行。实际上,信任传递性一般是不满足的,前面的工作对于传递性的充分和必要条件都没有进行必要的研究。

本文的研究可应用于网络信息传播中。网络信息传播是一种合作,合作关系可以推出信任。一般来说,如果多次的信息传播构成了一种稳定的合作关系,则可以形成良好的信任关系。同时,信任关系是网络信息传播的基础,理性 Agent 应该只传播其自身认为真实的信息。我们假定信息的传播以参与双方的信任基础,即若双方信任则网络信息能够传递,若不信任则网络信息不能传递,故信息的传播依赖于信任网络图,而信任网络图则需要确定信任的传递性和连通性。通过改变信任网络图,我们可以构造或断开网络信息传播路径,从而起到网络舆情监测与控制的目的。通过对信任传递性的研究,我们希望为网络信息传播提供一条有效的研究途径。

本文对信任的主观性、对称性、传递性和连通性进行了系统的研究,证明了信任的几个性质,为二值信任以后的研究提供了理论基础。另外,本文对主观信任的网络信任图的传递闭包构造算法和连通性测试算法进行了研究,算法的计算复杂度都是多项式级的,为其应用做了基础性工作。

## 1 问题描述

**假设 1.** 本文讨论合作环境下的二值信任关系,即信任关系或为 1,或为 0。因此,在任意 Agent 之间,或者存在信任关系,或者不存在信任关系。合作环境意味着交互结果对参与交互的 Agent 而言相同,或者交互结果是成功的,或者交互结果是失败的,不会出现一方成功而另一方失败的情况。如果参与交互的双方 Agent 都能实现各自的预期目标,或者实现了预期的收益,或者占有了某种资源等,则这次交互结果是成功的。

**假设 2.** 本文只讨论一维信任,不讨论信任的多维属性。信任存在多维性,例如,我信任你能够和我跳舞跳得好,并不意味着我信任你和我合作开公司能够盈利。

假设  $n$  个 Agent 构成了一个 Agent 集合  $Ag, Ag = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。

**定义 1.** Agent 的信息状态:

$$I_i = \langle \xi_i^j, \kappa, P_i^j \rangle,$$

其中,  $I_i$  是 Agent $a_i$  的信息状态,  $\xi_i^j \in (0, 1]$  是 Agent $a_i$  和 Agent $a_j$  之间的交互成功率。一些学者基于统计学的概率论进行信任关系建模,如 Teacy 等人提出的 TRAVOS 模型、Josang 等人提出的采用二项分布的信任管理模型。本

文中,该值的计算引用 Teacy 等人的 Beta 分布算法<sup>[1]</sup>,并对其进行修正,包含了  $Agenta_i$  自身的情况.即

$$\xi_i^j = \begin{cases} \frac{1 + \sum v_i^j}{2 + m_i^j}, & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

其中,  $m_i^j \geq 0$  表示  $Agenta_i$  和  $Agenta_j$  之间的交互次数;  $v_i^j$  是一个向量,存储着  $Agenta_i$  和  $Agenta_j$  之间的  $m_i^j$  次交互结果,如果交互成功,则该结果为 1,其他情况则为 0,即

$$v_i^j = \begin{cases} 1, & \text{if } a_i \text{ and } a_j \text{ realize their own goals} \\ 0, & \text{Others} \end{cases}$$

在合作环境下,  $v_i^j = v_j^i, \xi_i^j = \xi_j^i$ .

$\kappa \in (0.5, 1)$  是客观信任的阈值,该值对所有 Agent 相同,在本文中,该值是一个统一的常数.  $\kappa$  之所以取值大于 0.5,是因为当两个 Agent 无交互历史时,其  $\xi_i^j = (0+1)/(0+2) = 0.5$ ,此时不应该产生信任.所以理性 Agent 的  $\kappa$  值应该大于 0.5.  $P_i^j \in (0, 1)$  是主观信任的阈值,该值对不同 Agent 不同,是常数.不过,该值对于不同 Agent 而言并不一定相同.

**定义 2(客观信任).** 对于集合  $Ag, Ag \times Ag$  的一个子集称为  $Ag$  到  $Ag$  的客观信任关系,本文记作  $O$ . 若  $\langle a_i, a_j \rangle \in O$ , 可记作  $iOj$ , 若  $\langle a_i, a_j \rangle \notin O$ , 可记作  $i\bar{O}j$ , 其定义为

$$O = \{ \langle a_i, a_j \rangle \mid a_i \in Ag \wedge a_j \in Ag \wedge \xi_i^j \geq \kappa \}.$$

**定义 3(主观信任).** 对于集合  $Ag, Ag \times Ag$  的一个子集称为  $Ag$  到  $Ag$  的主观信任关系,本文记作  $S$ . 若  $\langle a_i, a_j \rangle \in S$ , 可记作  $iSj$ , 若  $\langle a_i, a_j \rangle \notin S$ , 可记作  $i\bar{S}j$ , 其定义为

$$S = \{ \langle a_i, a_j \rangle \mid a_i \in Ag \wedge a_j \in Ag \wedge \xi_i^j \geq P_i^j \}.$$

为了以后的叙述方便,先引用自反性、对称性和传递性的定义.

**定义 4(自反性<sup>[15]</sup>).**  $R$  为  $Ag$  上的关系,若对任意的  $x \in Ag$ , 都有  $xRx$ , 则称  $R$  为  $Ag$  上的自反关系.

**定义 5(对称性<sup>[15]</sup>).**  $R$  为  $Ag$  上的关系,对任意的  $x, y \in Ag$ ,

- 若  $xRy \rightarrow yRx$ , 则称  $R$  为  $Ag$  上的对称关系;
- 若  $(xRy \wedge yRx) \rightarrow (x=y)$ , 则称  $R$  为  $Ag$  上的反对称关系.

**定义 6(传递性<sup>[15]</sup>).**  $R$  为  $Ag$  上的关系,对任意的  $x, y, z \in Ag$ , 若  $(xRy \wedge yRz) \rightarrow xRz$ , 则称  $R$  为  $Ag$  上的传递关系.

## 2 信任的性质

本节我们将讨论客观信任和主观信任的一些基本性质.这些性质是后面研究的基础.

**公理 1(委托(delegation)).** 若  $Agenta_i$  信任  $Agenta_j$ , 则  $Agenta_j$  的交互结果被视为  $Agenta_i$  的交互结果,即可认为  $Agenta_j$  被  $Agenta_i$  委托/授权进行交互行为,并且交互结果被  $Agenta_i$  所认可.即

$$(a_i \in Ag \wedge a_j \in Ag \wedge a_k \in Ag \wedge (i \text{ trust } j)) \rightarrow \xi_j^k = \xi_i^k.$$

**性质 1.**  $O$  是  $Ag$  上的自反关系、对称关系、传递关系.

证明:由定义 1 可知,在合作环境下,  $\xi_i^i = 1$ , 由于  $\kappa \in [0, 1]$ , 则  $\xi_i^i \geq \kappa$  恒成立.所以根据定义 2, 可得  $iOi$ , 即  $O$  是  $Ag$  上的自反关系.

由定义 1 可知,  $v_i^j = v_j^i, \xi_i^j = \xi_j^i$ , 因此,若  $\xi_i^j \geq \kappa$ , 可知  $\xi_j^i \geq \kappa$ . 由定义 2 可知,若  $iOj$ , 可得  $jOi$ , 即  $O$  是  $Ag$  上的对称关系.

由公理 1 可知,  $(a_i \in Ag \wedge a_j \in Ag \wedge a_k \in Ag \wedge iOj) \rightarrow \xi_j^k = \xi_i^k$ , 即,若  $iOj \wedge jOk$ , 可知  $(\xi_j^k = \xi_i^k) \wedge (\xi_j^k \geq \kappa)$ , 推理可得  $\xi_i^k \geq \kappa$ , 即  $iOk$ , 即  $O$  是  $Ag$  上的传递关系.  $\square$

**推论 2.**  $O$  是  $Ag$  上的等价关系.

证明:由性质 1 可知,  $O$  是  $Ag$  上的自反关系、对称关系、传递关系.由等价关系定义可知,  $O$  是  $Ag$  上的等价

关系. □

**性质 3.**  $S$  是  $Ag$  上的自反关系.

证明:由定义 1 可知,在合作环境下,  $\xi_i^i=1$ . 由于  $P_i^i \in [0,1]$ , 则  $\xi_i^i \geq P_i^i$  恒成立. 所以根据定义 2, 可得  $iSi$ . 即,  $S$  是  $Ag$  上的自反关系. □

**性质 4.**  $S$  是  $Ag$  上有条件的对称关系.

证明:由定义 1 可知,  $v_i^j = v_j^i, \xi_i^j = \xi_j^i, P_i^j$  可分两种情况来讨论:

(1) 若  $\forall a_i, a_j \in Ag, P_i^j = P_j^i$ , 则由  $\xi_i^j \geq P_i^j$  可知,  $\xi_j^i \geq P_j^i$ . 由定义 2 可知, 若  $\forall a_i, a_j \in Ag, P_i^j = P_j^i$ , 则由  $iSj$  可得  $jSi$ .

即, 若满足条件  $\forall a_i, a_j \in Ag, P_i^j = P_j^i$ , 则  $S$  是  $Ag$  上的对称关系.

(2) 若  $\forall a_i, a_j \in Ag, P_i^j \neq P_j^i$ , 则由  $\xi_i^j \geq P_i^j$  可知,  $\xi_j^i, P_j^i$  的比较结果不一定. 由定义 2 可知, 若  $\forall a_i, a_j \in Ag, P_i^j \neq P_j^i$ , 由  $iSj$  不一定得到  $jSi$ .

即, 若满足条件  $\forall a_i, a_j \in Ag, P_i^j \neq P_j^i$ , 则  $S$  不满足  $Ag$  上的对称关系. □

**性质 5.**  $S$  是  $Ag$  上有条件的传递关系.

证明:由公理 1 可知,  $(a_i \in Ag \wedge a_j \in Ag \wedge a_k \in Ag \wedge (iSj)) \rightarrow \xi_j^k = \xi_i^k$ . 即, 若  $iSj \wedge jSk$ , 可知  $(\xi_j^k = \xi_i^k) \wedge (\xi_j^k \geq P_j^k)$ , 推理可得  $\xi_i^k \geq P_j^k$ . 此时, 若  $P_j^k \geq P_i^k$ , 则  $\xi_i^k \geq P_i^k$ , 即  $iSk$ . 也就是说, 若满足条件:  $\forall a_i, a_j, a_k \in Ag, P_j^k \geq P_i^k$ , 则  $S$  是  $Ag$  上的传递关系. □

例 1: 在亚马逊网络购物中, 已知  $Agent_{a_1, a_2, a_3}$  作为买家和卖家的交互结果, 见表 1. 假设  $a_1$  和  $a_2$  之间有若干次交互,  $a_2$  和  $a_3$  之间有若干次交互. 现  $a_1$  欲从  $a_2$  那里购买一本书, 然而  $a_2$  恰好没有此书, 而  $a_3$  有此书, 于是  $a_2$  向  $a_1$  推荐了  $a_3$ , 而  $a_1$  和  $a_3$  之间没有交互, 那么  $a_1$  是否会信任  $a_3$  就是一个待解决的问题. 该问题如图 1 所示.

设  $\kappa=0.88, P_1^1=0.88, P_2^1=0.87, P_2^3=0.85, P_3^3=0.82, P_1^1=0.87, P_3^1=0.88, m_1^1=m_2^1=28, m_2^3=m_3^3=18, \sum v_1^1=26, \sum v_2^3=16$ .

由定义 1 可得:

$$\begin{aligned}\xi_1^2 &= (1 + \sum v_1^2) / (2 + m_1^2) = (1 + 26) / (2 + 28) = 0.9 = \xi_2^1, \\ \xi_2^3 &= \xi_3^2 = 0.85, \\ \xi_3^1 &= \xi_1^3 = 0.5.\end{aligned}$$

由定义 2 可得:

- 由于  $\xi_1^2 = \xi_2^1 = 0.9 > \kappa = 0.88$ , 可得  $1O2 \wedge 2O1$ ;
- 由于  $\xi_2^3 = \xi_3^2 = 0.85 < \kappa = 0.88$ , 可得  $3O2 \wedge 2O3$ ;
- 由于  $\xi_3^1 = \xi_1^3 = 0.5 < \kappa = 0.88$ , 可得  $1O3 \wedge 3O1$ .

由定义 3 可得:

- 由于  $\xi_1^2 = 0.9 > P_1^2 = 0.88, \xi_2^1 = 0.9 > P_2^1 = 0.87$ , 可得  $1S2 \wedge 2S1$ ;
- 由于  $\xi_2^3 = 0.85 \geq P_2^3 = 0.85, \xi_3^2 = 0.85 > P_3^2 = 0.82$ , 可得  $2S3 \wedge 3S2$ .

由定义 3 和公理 1 可得:

- 已知  $1S2, \xi_2^3 = 0.85$ , 可得  $\xi_1^3 = 0.85$ ;
- 由于  $\xi_1^3 = 0.85 < P_1^3 = 0.87$ , 可得  $1S3$ ;
- 已知  $3S2, \xi_2^1 = 0.9$ , 可得  $\xi_3^1 = 0.9$ ;
- 由于  $\xi_3^1 = 0.9 > P_3^1 = 0.88$ , 可得  $3S1$ .

以上计算结果见表 1.

Table 1 Objective trust and subjective trust ( $\kappa=0.88$ )

表 1 客观信任和主观信任( $\kappa=0.88$ )

Items	$\langle a_1, a_2 \rangle$	$\langle a_2, a_1 \rangle$	$\langle a_2, a_3 \rangle$	$\langle a_3, a_2 \rangle$	$\langle a_1, a_3 \rangle$	$\langle a_3, a_1 \rangle$
$m_i^j$	28	28	18	18	0	0
$\sum v_i^j$	26	26	16	16	0	0
$\xi_i^j$	0.9	0.9	0.85	0.85	0.5	0.5
$P_i^j$	0.88	0.87	0.85	0.82	0.87	0.88
Objective trust	102	201	203	302	103	301
Subjective trust	152	251	253	352	153	351

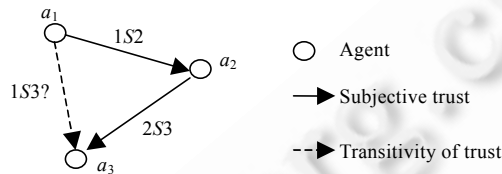


Fig.1 Transitivity of subjective trust

图 1 主观信任传递性

### 3 主观信任的对称闭包和传递闭包

由性质 4 和性质 5,  $S$  是  $Ag$  上有条件的对称关系和传递关系. 一般情况下, 我们期望  $S$  在某个域上甚至是  $Ag$  上至少具有传递性, 这样可以形成信任网络, 同时有助于网络信息沿着信任网络传递. 如图 1 所示, 若 3 个 Agent  $a_1, a_2, a_3$  之间具备传递性, 即使  $a_1$  和  $a_3$  之间没有交互, 那么  $a_1$  依然会信任  $a_3$ , 这 3 个 Agent 之间就更容易形成信任网络. 但是, 主观信任的传递性并不是总能满足的, 那么在何种情况下, 主观信任能够满足传递性可用构造传递闭包的方法来进行. 在某个域上, 主观信任具备传递性等价于为其构造传递闭包. 本节我们将讨论构造主观信任的对称闭包和传递闭包的算法及其计算复杂度问题.

#### 3.1 主观信任的闭包定义

因为  $S$  是  $Ag$  上有条件的对称关系和传递关系, 我们希望给  $S$  增加一些有序对构成新的主观信任关系  $S'$ , 使得  $S'$  具有对称性或传递性, 同时不希望  $S'$  过于大, 希望增加的有序对越少越好, 够用即可, 即为最小超集合, 这是建立主观信任闭包的基本思想.

定义 7(主观信任的对称闭包).  $Ag$  上具有对称性的主观信任的最小超集合称为主观信任的对称闭包, 记为  $s(S)$ .

定义 8(主观信任的传递闭包).  $Ag$  上具有传递性的主观信任的最小超集合称为主观信任的传递闭包, 记为  $t(S)$ .

#### 3.2 构造传递闭包的算法

构造对称闭包的方法比较简单, 而构造传递闭包的方法则不尽然. 当有限集合  $Ag$  的元素较多时, 即使用矩阵运算求  $Ag$  上的主观信任关系  $S$  的传递闭包仍然很复杂. Warshall 提出了一种有效的计算传递闭包的算法<sup>[15]</sup>.

定义 9(主观信任的关系矩阵  $M(S)$ ). 若  $S$  是  $Ag$  上的主观信任关系, 则  $S$  的关系矩阵是  $n \times n$  方阵,  $n=|Ag|$ ,

$$M(S) = (s_{ij})_{n \times n}.$$

矩阵元素是  $s_{ij}$ , 且

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } iSj \\ 0, & \text{if } i \not S j \end{cases}$$

其中,  $i=1:n, j=1:n$ .

我们可以使用 Warshall 算法来求解主观信任的传递闭包,其算法核心是将第  $i$  行向量加到某些行上,这些行的第  $j$  列元素值为 1,其计算复杂度为  $O(n^3)$ ,其中,  $n=|Ag|$ .

我们改进 Warshall 算法的思路如下:首先,求出每一行上元素值为 1 的列号,并进行记录;然后,将以这些列号为行号的向量加到该行上,形成新的矩阵即可.由于我们考虑二值主观信任,同一行再次相加没有效果,可以省略,则只需考虑不同行的元素,因此可以将对角线的元素去掉,再考虑实现方法.也就是说,不考虑关系矩阵的自反性即可.例如,第 1 行的元素值为 1 的列号为 1,3,则只需将第 3 行向量加到第 1 行;若第 2 行的元素值为 1 的列号为 1,2,4,则需要将第 1 行和第 4 行向量加到第 2 行,以此类推.

故改进后的 Warshall 算法的思路如下:首先,将关系矩阵  $M(S)$  进行简化,约简为不具备自反性的矩阵  $B$ ;然后,再对矩阵  $B$  应用 Warshall 算法,这样可以降低部分计算工作量.

**算法 1.** 主观信任传递闭包构造算法( $B[i,j]$ 表示矩阵  $B$  第  $i$  行第  $j$  列的元素,  $M(S)$  是  $S$  的关系矩阵).

- (1) 将  $M(S)$  的对角线元素置 0 后,赋值给矩阵  $B$ .
- (2) 令  $i=1:n, n=|Ag|$ .
- (3) 对  $j=1:n$ ,若  $B[i,j]=1$ ,则对  $1 \leq k \leq n$ ,令  $B[i,k]=B[i,k] \vee B[j,k]$ .
- (4) 将矩阵  $B$  对角线元素置 1 后,输出  $M(t(S))=B(S)$ .

**定理 1.** 算法 1 的计算复杂度是  $O(n^3)$ ,其中,  $n=|Ag|$ .

证明:在最坏情况下,  $M(S)$  是全 1 矩阵,则  $B[i,j]=1$  恒成立.步骤(3)的计算复杂度为  $O(n^2)$ ,外循环  $i$  要循环  $n$  次,则总的计算复杂度为  $O(n^3)$ ,其中,  $n=|Ag|$ .  $\square$

**假设 3.** 我们考虑网络信息传播的一种特定情况,即理性 Agent 的信息传递情况.网络信息传播以 Agent 之间的信任为基础,即信息传播必然隐含着 Agent 之间的信任关系,无信任则无网络信息传播.

假设网络信息的真伪性无法判断,如果两个陌生的 Agent 之间没有基本的信任关系,则 Agent 之间不会传播网络信息;若两个 Agent 之间有多次成功的交互关系,则网络信息有可能传播.假定网络信息传播是沿着信任关系而传递,即信任是信息传递的必要条件:若信任关系存在,则网络信息有可能传播;若信任关系不存在,则网络信息不可能传播.

例 2:已知有 4 个 Agent,  $Ag=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ ,这 4 个 Agent 之间相互有信息传递,我们假设传递真实信息时为成功的交互,传递虚假信息时为不成功的交互,见表 2.  $a_1$  和  $a_2$  之间的信息传递次数是 28 次,其中,26 次传递真实信息,2 次传递虚假信息,其余类似.通过与例 1 相同的计算,得到主观信任关系为

$$S=\{\langle a_1, a_1 \rangle, \langle a_1, a_2 \rangle, \langle a_2, a_1 \rangle, \langle a_2, a_2 \rangle, \langle a_2, a_3 \rangle, \langle a_3, a_2 \rangle, \langle a_3, a_3 \rangle, \langle a_4, a_3 \rangle, \langle a_4, a_4 \rangle\}.$$

**Table 2** Subjective trust and transitive trust

**表 2** 主观信任和传递信任

Items	$\langle a_1, a_2 \rangle$	$\langle a_2, a_1 \rangle$	$\langle a_2, a_3 \rangle$	$\langle a_3, a_2 \rangle$	$\langle a_3, a_3 \rangle$	$\langle a_3, a_4 \rangle$
$m_i^j$	28	28	18	18	24	24
$\sum v_i^j$	26	26	16	16	22	22
$\xi_i^j$	0.9	0.9	0.85	0.85	0.8846	0.8846
$P_i^j$	0.88	0.87	0.85	0.82	0.88	0.89
Trust	1S2	2S1	2S3	3S2	4S3	3S4

现在我们知道该信任网络是否具备传递性,即网络信息能否在该 Agent 群体内传递.通过传递闭包的构造,我们可以知道哪些信任关系是构成信任传递性的关键关系,从而可以在网络舆情监测时进行有针对性的动作,包括构造或断开信任关系.

解:

$$M(S) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

首先,由于第1行的第2列元素值为1,需要将第2行加到第1行上;其次,第2行的第1列和第3列元素值均为1,则需要将第1行和第3行加到第2行;再次,由于第3行第2列元素值为1,则需要将第2行加到第3行;最后,由于第4行第3列元素值为1,则需要将第3行加到第4行.最终形成

$$B' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B(S) = M(t(s)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

将最后得到的  $B(S)$  与  $M(S)$  相比较可知,若要保证该信任网络具备传递性,则需要  $\langle a_1, a_3 \rangle \in S, \langle a_3, a_1 \rangle \in S, \langle a_4, a_1 \rangle \in S, \langle a_4, a_2 \rangle \in S$ , 即  $1S3, 3S1, 4S1, 4S2$ . 以上4个关系即为构成该  $Ag$  信任传递性的关键关系.在网络舆情监测时,通过构造或断开以上4个关键信任关系来保证信任是否能够在该  $Ag$  上传递,从而保证信任是否传递.

### 3.3 主观信任的连通性

在某些情况下,我们不仅要求信任的传递性,还要求信任具有连通性.如图2所示,该问题虽然具备传递性,但是其本身以及其传递闭包都不具有连通性.为此,我们给出连通性的定义.

**定义 10.**  $S$  在  $Ag$  上弱连通,当且仅当在其传递闭包  $t(S)$  中,

$$(\forall a_i)(\forall a_j)(a_i, a_j \in Ag \wedge a_i \neq a_j \rightarrow a_i Sa_j \vee a_j Sa_i).$$

**定义 11.**  $S$  在  $Ag$  上强连通,当且仅当在其传递闭包  $t(S)$  中,

$$(\forall a_i)(\forall a_j)(a_i, a_j \in Ag \wedge a_i \neq a_j \rightarrow a_i Sa_j \wedge a_j Sa_i).$$

假设矩阵  $t(S)$  是主观信任的传递闭包,我们希望测试该传递闭包是否具备连通性,以判断该主观信任是否能够形成信任网络.我们分别讨论弱连通和强连通的情况.

若矩阵  $t(S)$  有零元素,说明  $S$  在  $Ag$  上不符合定义10的要求;否则,若矩阵  $t(S)$  不出现零元素,说明  $S$  在  $Ag$  上符合定义10的要求,能够保证  $S$  在  $Ag$  上连通.

**算法 2.** 弱连通性测试算法.

- (1) 令矩阵  $B=M(t(S))$ .
- (2) 令  $n=|Ag|$ .
- (3) 对  $i=1:n, j=1:n$ ,若  $B[i,j]=0$  且  $B[j,i]=0$ ,则停止,输出主观信任弱连通不成立;
- (4) 否则,输出主观信任弱连通.

**定理 2.** 算法2的计算复杂度为  $O(n^2)$ .

证明:在最坏情况下,  $M(t(S))$  是全1矩阵,则  $B[i,j]=1$  恒成立.步骤(3)的计算复杂度为  $O(n^2)$ ,则计算复杂度为  $O(n^2)$ ,其中,  $n=|Ag|$ . □

**算法 3.** 强连通性测试算法.

- (1) 令矩阵  $B=M(t(S))$ .
- (2) 令  $n=|Ag|$ .
- (3) 对  $i=1:n, j=1:n$ ,若  $B[i,j]=0$  或  $B[j,i]=0$ ,则停止,输出主观信任强连通不成立;
- (4) 否则,输出主观信任强连通.

**定理 3.** 算法3的计算复杂度为  $O(n^2)$ .

证明:在最坏情况下,  $M(t(S))$  是全1矩阵,则  $B[i,j]=1$  恒成立.步骤(3)的计算复杂度为  $O(n^2)$ ,则计算复杂度为  $O(n^2)$ ,其中,  $n=|Ag|$ . □

## 4 结 语

本文提出的主观信任和客观信任考虑了 Agent 的主观性因素,符合多 Agent 系统的特性.依据以上两个定义例证了主观信任和客观信任的形成过程,并证明了客观信任具备自反性、对称性、传递性,以及具备等价关系;主观信任具备自反性、有条件的对称性和有条件的传递性.本文还讨论了主观信任的传递闭包的可行算法以及测试主观信任网络是否具备连通性的可行算法,其计算复杂度都是多项式级的.

本文的研究为主观信任的研究打下了理论基础.由于主观信任一般不具备传递性,本文讨论了传递闭包的可行算法,这就为基于信任的委托、信任网络的构建、基于信任的网络信息传播和基于信任的网络结构提供了一条有效的研究路径.

未来更进一步的工作可以关注于传递闭包的具体实现方法,即由非传递性到传递性的具体转换方法;如何实现由不信任到信任的转换,以及如何选择转换路径的问题等.

### References:

- [1] Luke Teacy WT, Patel J, Jennings NR, Luck M. TRAVOS: Trust and reputation in the context of inaccurate information sources. *Journal of Autonomous Agent Multi-Agent System*, 2006,12(2):183–198. [doi: 10.1007/s10458-006-5952-x]
- [2] Josang A, Ismail R, Boyd C. A survey of trust and reputation systems for online service provision. *Decision Support Systems*, 2007, 43(2):618–644. [doi: 10.1016/j.dss.2005.05.019]
- [3] Herzig A, Lorini E, Hübner JF, Vercouter L. A logic of trust and reputation. *Logic Journal of the IGPL*, 2010,18(1):214–244. [doi: 10.1093/jigpal/jzp077]
- [4] Hang CW, Wang YH, Singh MP. Operators for propagating trust and their evaluation in social networks. In: *Proc. of the 8th Int'l Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009)*. 2009. 1025–1032.
- [5] Tavakolifard M. Similarity-Based techniques for trust management. In: *Usmani ZUH, ed. Web Intelligence and Intelligent Agents. InTech*, 2010. 233–250. [doi: 10.5772/8386]
- [6] Hang CW, Singh MP. Generalized framework for personalized recommendations in agent networks. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2012,25(3):475–498. [doi: 10.1007/s10458-011-9186-1]
- [7] Liu GF, Wang Y, Orgun MA. Trust transitivity in complex social networks. In: *Burgard W, Roth D, eds. Proc. of the 25th AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI 2011)*. San Francisco: AAAI Press, 2011. 1222–1229.
- [8] Tong XR, Huang HK, Zhang W. Agent long-term coalition credit. *Expert Systems with Applications*, 2009,36(5):9457–9465. [doi: 10.1016/j.eswa.2008.12.048]
- [9] Tong XR, Zhang W. Group trust and group reputation. In: *Wang HY, Low KS, Wei KX, Sun JQ, eds. Proc. of the 2009 5th Int'l Conf. on Natural Computation (ICNC 2009)*. Washington: IEEE Computer Society, 2009. 561–565. [doi: 10.1109/ICNC.2009.738]
- [10] Tong XR, Zhang W. Long-Term MAS coalition based on fuzzy relation. *Journal of Computer Research and Development*, 2006,43(8):1445–1449 (in Chinese with English abstract).
- [11] Tong XR, Huang HK, Zhang W. Prediction and abnormal behavior detection of agent dynamic interaction trust. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(8):1364–1370 (in Chinese with English abstract).
- [12] Ma L, Zheng WM. Synthesize trust degree evaluating model for an information grid environment. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 2009,49(4):599–603 (in Chinese with English abstract).
- [13] Tian LQ, Lin C. A kind of game-theoretic control mechanism of user behavior trust based on prediction in trustworthy network. *Chinese Journal of Computers*, 2007,30(11):1930–1938 (in Chinese with English abstract).
- [14] Li XY, Gui XL. Cognitive model of dynamic trust forecasting. *Journal of Software*, 2010,21(1):163–176 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3558.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03558]
- [15] Shi CY, Wang JQ. *Mathematical Logic and Set Theory*. 2nd ed., Beijing: Tsinghua University Press, 2000 (in Chinese).

### 附中文参考文献:

- [10] 童向荣,张伟.基于模糊盟友关系的多 Agent 系统长期联盟. *计算机研究与发展*,2006,43(8):1445–1449.
- [11] 童向荣,黄厚宽,张伟.Agent 动态交互信任预测与行为异常检测模型. *计算机研究与发展*,2009,46(8):1364–1370.



- [12] 马礼,郑纬民.信息网格环境下的综合信任度评价模型.清华大学学报(自然科学版),2009,49(4):599-603.
- [13] 田立勤,林闯.可信网络中一种基于行为信任预测的博弈控制机制.计算机学报,2007,30(11):1930-1938.
- [14] 李小勇,桂小林.动态信任预测的认知模型.软件学报,2010,21(1):163-176. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3558.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03558]
- [15] 石纯一,王家斌.数理逻辑与集合论.第2版,北京:清华大学出版社,2000.



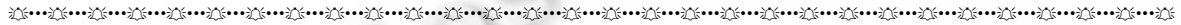
童向荣(1975-),男,山东招远人,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为多 Agent 系统,数据挖掘.



龙宇(1991-),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究领域为人工智能.



张伟(1961-),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为多 Agent 系统,软件工程.



## 计算机科学国家重点实验室招聘启事

计算机科学国家重点实验室于 1994 年 12 月经中国科学院批准正式对外开放,2005 年 1 月经科技部批准开始建设国家重点实验室,2007 年 9 月通过验收。实验室依托于中国科学院软件研究所,从事计算机科学理论与软件技术的基础研究。实验室现有固定人员 44 名,其中,中国科学院院士 3 名,国家杰出青年基金获得者 2 名,“百人计划”研究员 5 名。实验室在国内外学术界拥有广泛的联系和良好的声誉。实验室研究人员曾获得国家自然科学奖一等奖 1 项、二等奖 2 项,国家科技进步奖二等奖 5 项。

根据《国家重点实验室建设与运行管理办法》以及中国科学院《关于 2012 年信息领域国家重点实验室换届工作的通知》的有关规定,现向国内外公开招聘实验室主任。具体事项如下:

### 一、应聘条件

1. 本领域高水平的学术带头人,具有开阔的战略视野,较深的学术造诣和较高的国内外知名度;
2. 具有主持科研项目的经验和较强的组织管理与协调能力;
3. 具有广泛的国内外学术联系与较强的国际学术交流能力;
4. 学风正派、身体健康,具有高度的敬业精神;
5. 年龄一般不超过 60 岁,每年在实验室工作时间不少于 9 个月。

### 二、应聘程序

1. 自本公告公布之日起开始报名,报名截止日期为 2012 年 11 月 30 日。
2. 应聘者报名时需提供以下材料:
  - (1) 个人学习、工作简历;
  - (2) 主要研究成果简述(1000 字以内);
  - (3) 主要学术论文和成果清单;
  - (4) 对实验室的管理设想和预期目标;
  - (5) 3 名推荐人的推荐信及其联系信息。

我们将根据报名情况择优通知参加答辩。

### 三、联系方式

联系人:刘亚君,张晓刚

联系电话:62661017, 62661009

传真:62562533

电子邮件:yajun@iscas.ac.cn, xiaogang@iscas.ac.cn

通信地址:北京中关村南四街 4 号中国科学院软件研究所

邮政编码:100190