

机会社交网络下基于中介市场模型的激励机制*

皇甫深龙, 郭斌, 於志文, 李东生

(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

通讯作者: 皇甫深龙, E-mail: huangfusl@gmail.com

摘要: 智能手机和其他具备短距离无线通信能力设备的普及, 使利用机会社交网络进行社会性活动的组织成为了可能。然而, 机会网络中的消息传递需要代理节点的支持, 代理节点的不协作, 会大大降低消息传递的效率。为了解决消息传递过程中的“丢包”问题, 引入了具有中介的市场模型作为活动组织激励机制。系统将消息发起者、代理节点和消息接收者分别与市场交易中的卖家、中间商和买家进行类比, 分析在不同社会关系与社会属性下的社会福利和收益情况。同时, 提出了代理选择的“流浪者算法”, 选择与多个社区相遇次数较多且与各社区相遇概率较大的用户(流浪者)作为代理, 并基于 MIT Reality Mining 数据集进行实验。以具有中介的市场模型作为激励机制, 比较了该数据集下使用不同代理选择算法时形成的收益与社会福利情况。在上述算法的基础上, 基于 Android 平台初步实现了社会性活动组织的原型系统, 为活动的组织提供服务。

关键词: 机会社交网络; 激励机制; 具有中介的市场模型

中文引用格式: 皇甫深龙, 郭斌, 於志文, 李东生. 机会社交网络下基于中介市场模型的激励机制. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (2)): 53-62. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14023.htm>

英文引用格式: Huang-Fu SL, Guo B, Yu ZW, Li DS. Incentive mechanism for opportunistic social networks: The market model with intermediaries. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (2)): 53-62 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14023.htm>

Incentive Mechanism for Opportunistic Social Networks: The Market Model with Intermediaries

HUANG-FU Shen-Long, GUO Bin, YU Zhi-Wen, LI Dong-Sheng

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Corresponding author: HUANG-FU Shen-Long, E-mail: huangfusl@gmail.com

Abstract: The wide use of smart phones and other intelligent devices equipped for short-range wireless communications makes it possible for people to organize social activities via opportunistic social networks. However, message delivery can be easily disturbed due to the selfishness of nodes. This paper introduces a model of markets with intermediaries as an incentive scheme. On the basis of this model, an agent selection algorithm called “Ranger Algorithm” is proposed. Rangers refer to those users who not only have met with users in other communities for multiple times, but also have a higher probability of meeting those users. Experiments using MIT Reality Mining dataset is implemented and the effects of using market model with intermediaries as an incentive mechanism are analyzed. Results show that this model can effectively serve as an incentive mechanism to assist message delivery. In addition, this paper also finds that Ranger Algorithm outperforms other methods at improving communication performance. Based on the above work, a prototype system is built to help organize social activities.

Key words: opportunistic social networks; incentive mechanism; markets with intermediaries

机会网络是一种不需要源节点和目标节点之间存在完整链路、利用节点移动带来的相遇机会实现通信的

* 基金项目: 国家自然科学基金(61332005, 61373119, 61222209); 国家重点基础研究发展计划(973)(2015CB352400)

收稿时间: 2013-06-15; 定稿时间: 2013-08-21

自组织网络^[1].传统的自组织网络路由协议假设源节点和目标节点之间存在至少一条完整的通信路径,而机会网络则是基于节点的移动性,通过两个节点进入相互通信范围来交换数据,利用节点间的逐跳转发将数据从源节点传输到目标节点.机会网络不要求网络的全连通,更适合实际的自组网需求,因此具有广阔的发展前景.

传统的 Internet 为人们进行线上活动提供了丰富的支持,极大地促进了人与人之间的交流与互动,但人们在线下的交互却缺乏相应的促进方式.当前,随着具备强大感知功能的智能手机等移动设备的普及,利用机会社交网络(opportunistic social networks)^[2]进行社会活动的组织成为可能.机会社交网络可以为物理上临近的人们提供更好的交互方式,同时为具有共同兴趣爱好的人提供交流和帮助.

当前社会性活动的组织方式,如电话通知、张贴海报、广播通知等,通常是高成本或低效率的.例如在大学校园里,同学 A 欲发起一个在下周进行的活动,但由于不知道周围同学当中有哪些愿意参与该活动,给活动的组织带来了困难.机会社交网络的出现为解决这类问题提供了新的思路.但是直接运用机会社交网络解决此类问题,往往会面临一些新的问题和挑战.为了使消息快速、高效地被目标群体接收,必须设计高速、有效的消息传播算法.由于机会网络需要借用中间代理作为消息传输的媒介,中间代理的参与意愿成为一个关键问题.目前已有许多方法激励用户的参与,但当前研究没有很好地将市场与经济学原理引入到激励机制设计之中.

基于上述考虑,本文设计并实现了一个基于机会社交网络的社会性活动组织系统.针对消息传递中的节点参与激励问题,本文从经济学角度出发,引入一种具有中介的市场模型来促进用户的参与意愿.在该模型中,我们将消息发出者作为生产者,将消息接收者作为消费者,代理节点作为中间商,当节点承担代理任务时可获取一定的利益,通过这种经济利益来促进节点间的协作.为了验证该算法的性能,本文基于真实移动电话用户交互数据集(MIT reality mining)^[3]进行实验,对具有不同社会属性的节点作为代理时的性能进行了比较分析.实验结果表明,使用该方法,节点在激励机制下能为获取自身利益而进行协作,同时源节点到目的节点的消息传输也有较高的成功率.

1 相关工作

由于机会网络依靠节点的移动来进行消息转发,因此代理的选择对网络的性能和消息传递的效率均有重大影响.针对机会网络中的代理选择问题,研究人员从传输效率、用户激励等不同方面进行了研究.

在传统的泛洪方法中,携带消息的节点每遇到一个节点便把消息转发出去.此种方法虽然有较快的消息传输速度,但对网络资源的耗费明显偏高.文献[4]提出的 BUBBLE RAP 算法考虑了用户的移动性,采用活跃度(即 Popularity 属性)较高的用户作为代理,用户的移动性从历史移动轨迹中获取.文献[5]提出的 HiBOp 方法通过获取用户的社会情境信息,如用户的行为历史、交互关系等来决定消息转发过程.

上述算法均假设节点是自愿参与消息传递过程的,然而在实际的网络环境中,节点由于受到自身处理能力、存储空间、电池容量等因素的限制,合作性很难保证.由于缺乏集中控制机制来确保协作的实施,自主节点的行为呈现一定的理性化趋势:为了追求自身利益最大化,节点在使用网络资源的同时,拒绝耗费自身有限的资源为其他节点提供转发服务,这种自私性严重影响了网络的性能^[6].研究表明,即使只存在少量的自私节点,网络吞吐性能也会显著下降^[7].如何有效地促进节点协作,从而保障机会网络的可用性,逐渐成为系统设计上一个亟待解决的问题.

目前,针对 Ad Hoc 网络中激励机制的研究大致可分为外在和内在两个方面.前者引入虚拟货币和协作信誉等外部机制来迫使节点协作;后者则通过分析利益驱动对节点决策行为的影响来引导合作,它又可分为机制设计^[8]与博弈论分析两个主要研究领域.然而,当前虽然有部分工作采用了博弈论原理,但缺乏对包含中介的市场模型用作激励机制的研究.本文在现有激励机制的基础上,提出了在机会社交网络中具有中介的市场模型,并将其作为激励机制来促进节点协作.

2 机会网络下具有中介的市场模型

2.1 应用场景

本文所研究问题的应用场景为:在大学校园里,同学 A 欲发起一个在下周进行的活动,如单车旅行、商品交易等,但由于不知道周围同学当中有哪些愿意参与该活动,给活动的组织带来了困难.传统的活动组织方式,如电话通知、校园 BBS 发帖、张贴海报或通知等,由于其覆盖范围较为有限,通常效率较低.因此,同学 A 需要利用该系统进行活动发布,以期有更多的用户接收到该消息.

在该应用场景下,校园中的每个用户都会携带一部具备短距离无线通信能力的智能终端(如智能手机),设备之间可以采用文献[9]中的方式连接成无线自组织网络.随着用户在校园中的不断移动,信息就能够以机会网络的方式传播出去.与我们先前工作^[10]类似,参与消息传递过程的用户分为 3 种角色,其定义如下:

定义 1. 消息发起者:指的是机会网络中信息的初始传递者,传递的消息从发起者开始,消息发起者会一直传递消息,直至时间结束.

定义 2. 代理:指的是消息传递过程中的中继,代理接收并转发消息,帮助消息发起者传递消息,直到任务结束.当代理接收到消息时,由于受到自身处理能力、存储空间、电池容量等因素的限制,代理可能不承担传递任务,此时造成消息“丢包”.

定义 3. 消息消费者:指的是消息的潜在接收者,消息消费者通过代理接收消息,当消息从发起者经过代理传输到消费者时,即完成一次消息传递.

2.2 具有中介的市场模型

为了解决消息传递中由于代理不合作而产生的“丢包”问题,本文引入了具有中介的市场模型^[11].在很多市场中,买方和卖方不能直接见面,而为了达成交易就需要中介的参与.中介,又称中间商,从卖方那里购买商品转而卖给买方.在这里中介既起着促成交易达成的桥梁作用,同时也能通过交易差价来获取利益.这种买卖双方不直接交易,而是通过中间商来达成交易的现象,在市场交易中较为常见.

具有中介的市场模型其结构如图 1 所示.

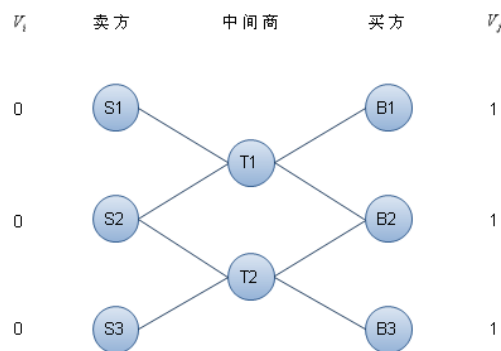


Fig.1 A market with intermediaries

图 1 具有中介的市场模型

该交易模型具有如下特点:

- (1) 卖方对自己要卖出的商品估值为 V_i ,愿意以不低于此价格将其卖出;
- (2) 买方对所购买商品估值为 V_j ,愿以不高于此价格将其买入;
- (3) 交易中的三方(卖方,买方和中介)都知道这些估值,且买方最多只买一份商品;
- (4) 对于中间商违反买卖数量不一致规则将予以严厉惩罚.

在该模型下,买卖双方均只能通过中介进行交易.不同的卖方或买方可以通过同一个中介进行交易,也可以采用不同的中介.同一种商品,由于交易参与者的不同,最终达成的交易价格也可能不一样.详细的交易过程为:

- (1) 中间商分别向卖家和买家宣布自己的买入和卖出价格;

(2) 卖方和买方根据收到的报价以及自己的估值,来决定是否对商品进行买卖.

图 2 给出了通过中间商进行交易的过程示例.

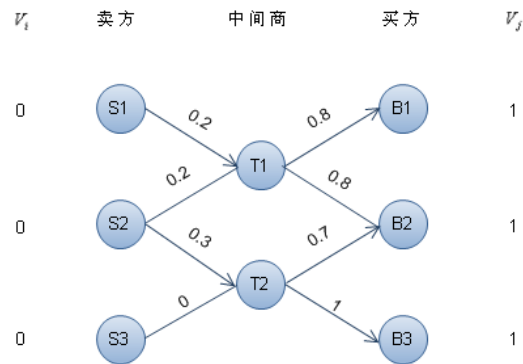


Fig.2 An example of trading through intermediaries

图 2 交易过程示例

本文将具有中介的市场模型引入到机会社交网络中,消息的发出者作为拥有消息的一方,可视为消息的“卖方”,而希望接收到消息的用户则为消息的“买方”,由于受到距离等因素的限制,卖方和买方之间不能直接进行消息“交易”,此时就需要中介的参与来促进交易,而代理节点承担了中介的角色.

2.3 激励节点协作的模型

由于前文提到的代理自私问题,代理可能在消息传递过程中采取不合作的态度.为了使用具有中介的市场模型作为激励机制,我们对该模型进行了一些修改,根据模型的规则制定博弈策略.

传统的中介市场模型主要是真实货币的,在本文中的模型我们对此进行了拓展,所使用的货币不仅可以是真实货币,也可以是虚拟的.在组织物品交易等活动时(如二手物品交易),可以使用实际物品交易中的真实货币进行节点激励.而对于那些不涉及真实货币交换的活动,如前文提到的单车旅行,我们引入了虚拟商品和虚拟货币的概念.我们称节点转发信息为节点提供的服务,该服务即为消息传递过程中的“虚拟商品”.与传统商品一样,该虚拟商品可以交易.为了衡量虚拟商品的价格,我们引入“虚拟货币”的概念.虚拟货币是进行虚拟商品交易的凭据,买入虚拟商品需要支付一定的虚拟货币,而卖出虚拟商品则会得到一部分虚拟货币作为收入.

具体到机会网络中的消息传递过程,消息在传递过程中会遇到代理节点.如果代理节点愿意转发信息,将采用一定的价格购买虚拟商品,源节点因此获得一定的虚拟货币,转发节点得到虚拟商品.目标节点想要获取虚拟商品,就需要以一定的价格购买,即向代理节点支付一定的虚拟货币.消息转发者从交易中利用差价来赚取虚拟货币作为收入,如果转发节点不能得到收益,便会拒绝转发.为了方便对博弈的讨论,我们采用了较为通用的中介市场模型分析方法^[11],设定卖方对商品的估值 V_i 为 0,买方对商品的估值 V_j 为 1.

为了激励节点协作,我们引入非合作博弈机制^[11].在非合作博弈机制中,假设网络中所有的节点都是理性且自私的,即以追求收入最大化为目标.在模型中就表现为:源节点需要以尽量高于 V_i 的价格卖出商品,目标节点以尽量不高于 V_j 的价格买入商品,转发节点则尽量降低商品的买入价格,并提高商品的卖出价格,通过赚取最大差价来获取利益.与传统方法不同的是,在本模型中,参与消息传递的三方(消息发出者,代理,消息接收者)都可以得到一定的收益.在一次交易达成时,源节点和目的节点所得收益如公式(1)所示.

$$\begin{cases} profit_i = V_i' \\ profit_j = V_j - V_j' \end{cases} \quad (1)$$

其中, i 为源节点, j 为目标节点, V_j' 为中间商卖出价格, V_i' 为中间商买入价格.而一个中间商 i 的所得收益为卖出消息所获全部收益减去消息买入的支出,可通过公式(2)计算得到.

$$profit_t = \sum_j^n V_j' - \sum_i^n V_i' \quad (2)$$

其中, n 为中间商 t 达成的总的交易数量.

由于参与消息传递的三方都能够从消息传递过程中获得收益,因此本文所提出的激励节点协作的模型可以促使节点克服自私,主动参与消息转发过程.然而,仅仅是代理节点愿意参与消息转发,并不能保证带来较大的收益.相关研究^[12]表明,在具有中介的市场模型中,丰富的连接网络比稀疏连接网络更能获得更高的社会福利.因此,在买家、卖家和中间商之间形成一个丰富连接的网络成为了研究重点.此外,在网络拓扑(图2即为网络拓扑的一个例子)生成之后,可通过分析三方的收益和社会福利^[11]来判定网络的优劣,并以此作为衡量代理选择算法性能的标准.

2.4 面向活动组织的流浪者算法

由于机会网络中代理节点的移动性,网络拓扑结构是动态变化的,而为了达成交易,需要确保节点之间能够形成连接较为丰富的网络.在卖方和买方确定的情况下,选择什么样的节点作为中间商,会影响最终形成的网络拓扑结构,进而对消息传递的成功率与效率产生影响.由前文可知,我们使用虚拟货币的收益来刺激代理节点转发消息,代理节点获得的收益越多,其愿意承担消息传递任务的概率也就越大.为此,我们需要选择合适的代理来完成物品交易.好的代理更能够形成富连接网络,有利于提高整体的社会福利.

除了现有代理选择方法,本文进一步提出了面向活动组织的流浪者算法.流浪者算法选择流浪者作为代理,流浪者是指那些能够与多个社区进行交互,且具有较高活跃度的用户.在该算法中,流浪者来自于社区.

2.4.1 社区划分

社区结构是在复杂网络中提出来的概念,在复杂网络中对社区结构的划分已经有了大量的研究.在本文的实验部分,我们选择 fastNewMan^[13]算法,采用 Q (模块性衡量值)最大时进行社区划分.划分结果用来对流浪者进行选取.

2.4.2 流浪者算法

本文提出的流浪者算法用于选择与多个社区相遇次数较多且与各社区相遇概率较大的用户,我们称这些用户为流浪者.该算法的步骤如下所示.

算法 1. Ranger Algorithm.

输入:全体用户的集合 U 、全体用户的交互历史数据、系数 λ ;

输出:全部由流浪者构成的集合 R .

- 1: **for each** $u_i \in U$ **do**
- 2: 根据全体用户的交互数据,计算每个用户的如下属性:
- 3: (1) 与各个社区内的各个用户相遇的次数 n_i
- 4: (2) 所遇社区内的用户个数 m_i
- 5: (3) 与社区相遇的概率 p_i
- 6: (4) 所遇到的社区总数 k_i
- 7: **end for**
- 8: 分别按照每个用户的 n_i, m_i, p_i, k_i 属性值对全体用户集合 U 进行排序
- 9: 选取排序后得到的 4 个用户列表中前 λ 的用户作为流浪者候选集合: $\delta_n, \delta_m, \delta_p, \delta_k$
- 10: $R \leftarrow \delta_n \delta_m \delta_p \delta_k$
- 11: **return** R

其中,本文设定 $\lambda=20\%$.依托用户的历史交互信息,流浪者算法可以从全体用户中选择出流浪者,这些流浪者即为该代理选择算法中选择的代理.

然而,由于用户之间时刻都在进行着交互,因此用户之间的相遇关系可能会随着时间发生动态变化,相应的流浪者也可能随之改变.本文提出的流浪者算法基于用户的历史交互数据,并不对流浪者进行实时的计算.其主

要出发点为以下两点:

- (1) 在分布式环境中,进行这种实时性的计算会耗费较多的计算资源;
- (2) 相关的文献^[14]已经证明,用户的行为具有周期性.因此,流浪者的改变也具有周期性的变化规律.频繁地进行计算并不能带来明显的结果提升.

为了能够反映用户交互关系的变化对流浪者造成的影响,可以采取周期性更新的方法对当前用户中的流浪者信息进行更新,更新周期由系统设定.

2.5 讨论

当前,已有的促进节点协作的机制主要包括基于声誉^[15]和基于虚拟货币^[16]两种类型.在基于声誉的激励机制中,节点的行为被邻居节点监视.如果一个节点拒绝转发其他节点的消息,则视该节点不参与协作,该声誉会被传播至网络中的其他节点,从而那些参与度较低的节点会被逐渐地从网络中排除.然而,在基于声誉的激励机制中,传播节点的声誉信息会耗费一定的网络资源,进而对系统性能产生不良影响.在基于虚拟货币的激励机制中,网络中的每个节点都附有一个计数器,节点转发消息会获取一定的收益,节点发送消息则需要支付一定的虚拟货币.但是,为了准确计算节点的支出与收益,需要部署一个能够防止篡改的硬件模块,这在某种程度上增加了网络部署的成本.

针对现有激励机制的不足,本文从经济学的角度出发,提出了具有中介的市场模型作为激励机制.在该机制中,参与消息传递的三方(消息发送者,代理和消息接收者)都能从消息传递的过程中获取收益.这样,为了获取较多的利益,节点会克服自私性,主动参与到消息传递中去.与传统方法不同,本文提出的激励机制运用了市场交易中的原理,综合考虑了消息发送者、代理和消息接收者三方的利益,因此具有较为优异的性能.

3 实验验证

3.1 实验数据集

本文选用 MIT Reality Mining(以下简称 RM)数据集作为实验数据来源.该数据集收集了 100 余名用户 9 个月左右的蓝牙交互记录.通过对该数据进行分析,我们发现该数据集中前 4 个月的数据较为密集,且不同用户的数据量相差较大.为了更好地反映问题,我们提取了从 2004 年 9 月 27 日~2004 年 12 月 21 日 12 个星期的数据,排除其中数据量较少的部分用户,选定其中 83 人的数据作为实验数据.将前 8 周数据作为训练集,后 4 周数据作为测试集.

在实验时间内计算每个用户所遇到的人数,并赋予每周以不同的权重.同时,利用与我们先前工作^[10]中相同的方法计算用户活跃度.其中,大多数人遇到的用户个数位于 10~25 之间.这些用户之间的朋友关系网如图 3 所示.

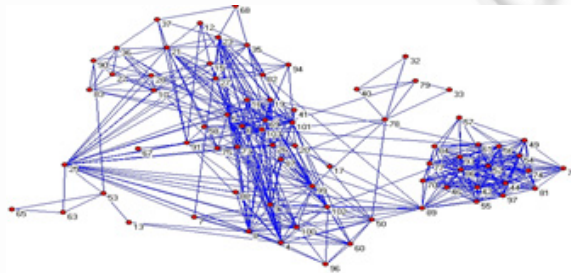


Fig.3 Network of friends

图 3 朋友关系网

此外,我们对用户进行了社区分类,最终将该数据集中的用户分为 6 大社区,除此之外还有部分独立个体及 2~3 人社区,其结果如图 4 所示.从中可以看出,位于中间位置的社区耦合性较强.



Fig.4 Divide users into different communities

图 4 社区划分结果

3.2 实验结果

3.2.1 实验设置

为了比较通过流浪者算法选择出流浪者、并以流浪者作为中间商的性能优劣,我们选择将该算法与随机选取、朋友关系、社区关系、活跃度较高的用户这 4 种方法进行对比,根据结果比较该算法的性能。

为了比较相同条件下不同代理选择方法的优劣,我们首先将买家(buyer)和卖家(seller)设置为固定属性关系,在该关系下通过选择不同的中间商(trader)来生成结果。在本次实验中,我们设置 buyer 和 seller 为 2 名, trader 为 3 名。首先随机选取 buyer 和 seller,在两者选定之后,再分别按照以下 5 种方式选取 trader:

- (1) trader 为随机选取;
- (2) trader 为通过流浪者算法生成的流浪者;
- (3) trader 为 Popularity 属性较高的用户;
- (4) trader 与买卖双方为朋友关系;
- (5) trader 与买卖双方为同一社区。

在每一种情况下,分别进行 100 次实验,最终结果为全部实验结果的平均值。

对于朋友关系,我们统计了数据集中所有强朋友关系(所有人均为朋友关系)和弱朋友关系(朋友关系网为连通图,但非完全连通)。对于同一社区,根据划分出的 6 个社区,本文分别分析了每一种社区的情况。基于 8 周的用户数据,我们计算出了用户的 Popularity 属性,选取排名前 26 的用户作为活跃用户。对于流浪者,我们计算并选择出 22 名用户作为流浪者。实验设置活动的截止时间为 14 天,即 14 天之后,网络的拓扑已经形成,各方依据具有中介的市场模型进行博弈。Seller 首先发起活动,当它遇到 trader 时双方存在一条连线,而 trader 和 buyer 相遇时,双方也存在一条连线,最终形成一个三方的网络拓扑。

3.2.2 仿真结果

由于富连接的网络可以达到较大的社会福利,因此,为了简化分析过程,我们选取 S-T(seller 与 trader 之间的连线数)、S-多 T(即一个 seller 连接多个 trader 时的连接数)、B-T(buyer 与 trader 之间的连线数)、B-多 T(即一个 buyer 连接多个 trader 时的连接数)作为衡量收益的指标,所得结果如图 5 所示。

通过实验可以看出,使用具有中介的市场模型作为激励机制具有一定的效果。通过比较不同条件下的连接数可知,使用流浪者作为代理能够形成较为丰富的网络连接,进而提高从源节点到目的节点消息传递的成功率。相比于其他代理选择方法,该方法的性能更好。

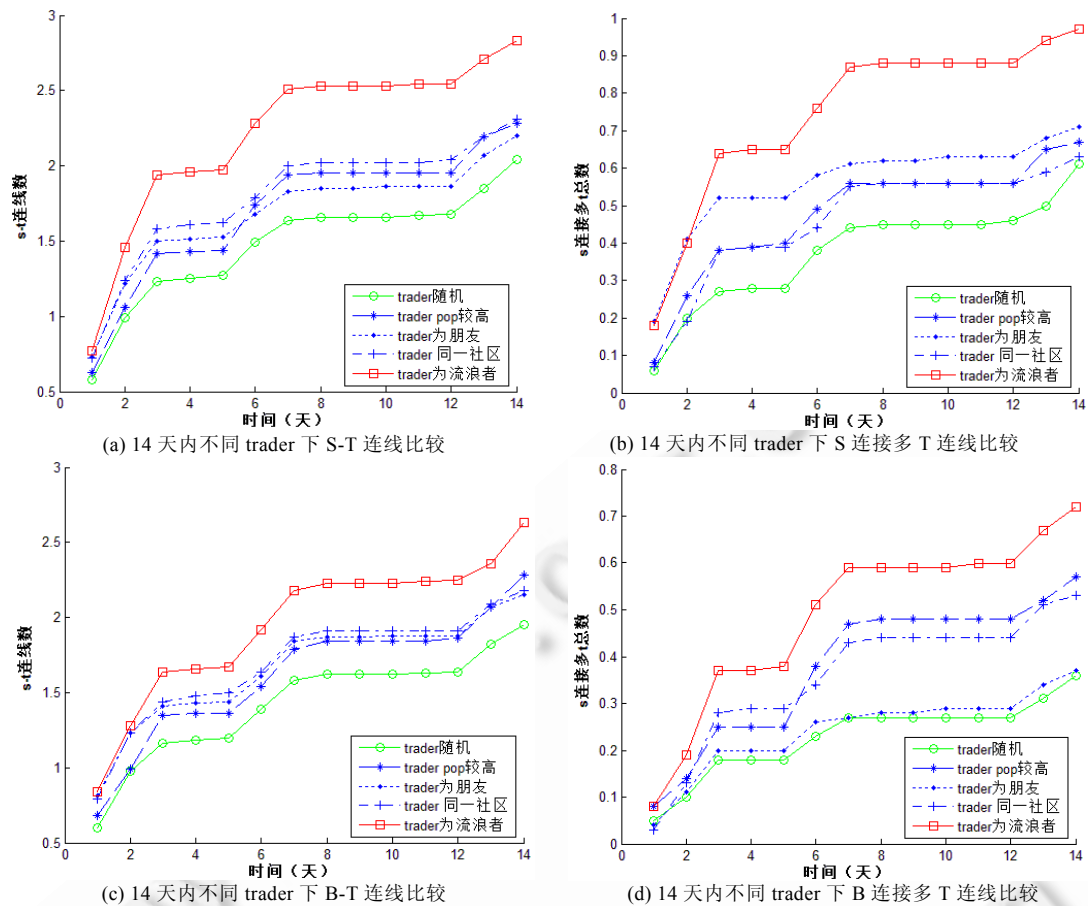


Fig.5 Experimental results under different traders when buyers and sellers are random

图 5 当 buyer/seller 为随机时,不同 trader 下的实验结果

4 原型实现

本系统以 Android 手机作为平台开发客户端程序,系统界面提供了活动发布、设置、系统开关、消息查看等功能.当用户想要通过该系统发起活动组织时,可在图 6(a)所示界面上输入活动内容、活动时间、活动周期、活动类型等信息来发起交易活动.在图 6(b)所示的系统设置界面进行蓝牙扫描周期的设置.设置完成后,如图 6(c)所示,用户点击开启按钮,系统即开始工作,周期性地扫描周围蓝牙设备并进行记录.当其他用户收到交易活动信息时,系统会给出相应的提示,用户可根据相关信息来参与活动或交易.

5 结束语

在利用机会社交网络进行社会性活动组织时,消息传递过程常常因为代理节点的自私行为而降低了效率.为了解决这一问题,本文引入了一种具有中介的市场模型,采用收益和社会福利作为激励条件.为达到较多的收益和较大的社会福利,本文提出了采用流浪者作为代理,所选流浪者为与多个社区相遇次数较多且与各社区相遇概率较大的用户.实验结果表明,该方法可以形成较为丰富的连接,并且代理可以获取较多的收益,从而激励代理主动参与协作.在此基础上,本文基于 Android 手机平台初步实现了社会性活动组织辅助系统,为活动的组织提供服务.然而,将具有中介的市场模型用作激励机制,目前还存在一些局限性,同时,算法没有全部考虑节点的隐私.这将作为下一步工作的重点.



Fig.6 Interfaces of the prototype system

图 6 原型系统界面

References:

- [1] Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2009,20(1):124–137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [2] Guo B, Zhang DQ, Wang Z, Yu ZW, Zhou XS. Opportunistic IoT: Exploring the harmonious interaction between human and the Internet of things. Journal of Network and Computer Applications, 2013. [doi: 10.1016/j.jnca.2012.12.028]
- [3] Eagle N, Pentland A, Lazer D. Inferring friendship network structure by using mobile phone data. Proc. of the National Academy of Sciences, 2009,106(36):15274–15278. [doi: 10.1073/pnas.0900282106]
- [4] Hui P, Crowcroft J, Yoneki E. BUBBLE rap: Social-Based forwarding in delay tolerant networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2011,10:1576–1589. [doi: 10.1109/TMC.2010.246]
- [5] Boldrini C, Conti M, Passarella A. Exploiting users' social relations to forward data in opportunistic networks: The HiBOP solution. Pervasive and Mobile Computing, 2008,4.5:633–657. [doi: 10.1016/j.pmcj.2008.04.003]
- [6] Urpi A, Bonuccelli M, Giordano S. Modelling cooperation in mobile ad hoc networks: A formal description of selfishness. In: Proc. of the WiOpt 2003: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks. Sophia-Antipolis: ACM, 2003.
- [7] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. In: Proc. of the 2003 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Karlsruhe: ACM, 2003. 27–34. [doi: 10.1145/863955.863960]
- [8] Elkind E, Sahai A, Steiglitz K. Frugality in path auctions. In: Proc. of the 15th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms. New Orleans: ACM-SIAM, 2004. 701–709.
- [9] Lenders V, Karlsson G, May M. Wireless ad hoc podcasting. In: Proc. of the 4th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. San Diego: IEEE, 2007. 273–283. [doi: 10.1109/SAHCN.2007.4292839]
- [10] Li DS, Yang ZY, Guo B, He HL, Yu ZW. Delivering social activity formation service over opportunistic networks. Computer Science, 2013,40(2):35–39 (in Chinese with English abstract).
- [11] Easley D, Kleinberg J. Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 325–338.
- [12] Blume L, Easley D, Kleinberg J, Tardos É. Trading networks with price-setting agents. Games and Economic Behavior, 2009,67(1): 36–50. [doi: 10.1016/j.geb.2008.12.002]

- [13] Newman MEJ. Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review E*, 2004,69(6). [doi: 10.1103/PhysRevE.69.066133]
- [14] Zhang DQ, Wang Z, Guo B, Zhou XS, Raychoudhury V. A dynamic community creation mechanism in opportunistic mobile social networks. In: *Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Social Computing*. Boston: IEEE, 2011. 509–514. [doi: 10.1109/PASSAT/Social Com.2011.189]
- [15] Michiardi P, Molva R. Core: A collaborative reputation mechanism to enforce node cooperation in mobile ad hoc networks. *Advanced Communications and Multimedia Security*, 2002,100:107–121. [doi: 10.1007/978-0-387-35612-9_9]
- [16] Buttyán L, Hubaux JP. Stimulating cooperation in self-organizing mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2003,8(5):579–592. [doi: 10.1023/A:1025146013151]

附中文参考文献:

- [1] 熊永平,孙利民,牛建伟,刘燕. 机会网络. *软件学报*, 2009,20(1):124–137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [10] 李东生,杨志义,郭斌,贺会磊,於志文. 基于机会网络的社会性活动组织研究. *计算机科学*, 2013,40(2):35–39.



皇甫深龙(1989—),男,河南商丘人,硕士,主要研究领域为普适计算,移动群智感知.
E-mail: huangfusl@gmail.com



郭斌(1980—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为普适计算,移动群智感知.
E-mail: guob@nwpu.edu.cn



於志文(1977—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为普适计算,人机交互,智能信息技术.
E-mail: zhiwenyu@nwpu.edu.cn



李东生(1986—),男,硕士,主要研究领域为普适计算.
E-mail: ldsxy2@163.com