协同演化计算的迭代多属性拍卖机制

聂兰顺,徐晓飞,战德臣

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院,哈尔滨 150001,nls@hit.edu.cn)

摘 要: 为了克服多属性反向拍卖中偏好信息提取困难、提取成本高的影响,提出一种迭代多属性拍卖机制,支持买卖双方增量式的按需偏好确定和揭示,引入协同演化计算方法作为卖方的学习工具和投标策略工具.在买方采取坦诚策略的前提下,协同演化计算方法为卖方提供的策略是其事后的近似纳什均衡策略,且拍卖机制以近似有效率的交易结束.实例分析和实验结果验证了该机制的有效性.

关键词: 多属性拍卖;协同演化计算;策略;迭代拍卖机制

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)02-0272-05

An iterative multi-attribute auction mechanism based on co-evolutionary computation

NIE Lan-shun, XU Xiao-fei, ZHAN De-chen

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, nls@hit.edu.cn)

Abstract: Aimed at the problem that preference elicitation is time-consuming and costly in multi-attribute auctions, a novel iterative multi-attribute auction mechanism for reverse auction settings with one buyer and many sellers is proposed. The auctions support incremental preference elicitation and revelation for the buyer and the sellers. Co-evolutionary computation method is incorporated into the mechanism to support economic learning and strategies for the sellers. The strategy provided by it is in *ex*-post Nash equilibrium for sellers, assumed that the buyer takes a truthful strategy. Experimental results show that the co-evolutionary computation based iterative multi-attribute auction is a practical and nearly efficient mechanism.

Key words: multi-attribute auction; co-evolutionary computation; strategy; iterative auction mechanism

拍卖是市场参与者根据报价按照一系列规则决定资源的分配和价格的一种市场机制[1].多属性拍卖允许买卖双方就物品的价格和其他非价格属性,如交货期、质量等进行协商,因而能够发现更有价值的匹配和交易,提高市场效率和社会福利,实现双赢.目前,多属性(反向)拍卖在企业采购、B2B交易方面正受到越来越多地重视和应用.多属性拍卖的复杂性之一在于属性组合的数量呈指数,对其精确的确定偏好成本高昂,某些情况下甚至不可行,导致买卖双方常常缺少完整的、精确的(分析形式的)效用函数.因此,在不要求买卖双方确定所有属性组合的偏好、提供精确效用函数的前提下,为其提供拍卖机制和拍卖工具,支持其进行多属性拍卖并获得近似有效率的拍卖结果是一种重要而有现实意义的问题.目前国内外有关多属性拍卖方法的研究多基于买卖双方具有完整的偏好信息和效用函数这一假设,获得了一定的理论成果[2-9].本文研究买卖双方不具备完整的偏好信息、缺少完整效用函数的多属性反向拍卖问题.

收稿日期: 2008-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60904080);国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA040804,2008AA04Z101).

作者简介: 聂兰顺(1979—),男,讲师;
徐晓飞(1962—),男,教授,博士生导师;
战德臣(1965—),男,教授,博士生导师.

1 多属性拍卖问题模型

设:多属性反向拍卖问题中,有 $N(N \geqslant 2)$ 个

卖方,一个买方, M 个属性. I 为卖方的集合, J 为属性的集合,每个属性 $j \in J$ 的值域为 Θ_j ,所有属性的联合值域构成属性空间 $\Theta = \Theta_1 \times \Theta_2 \times \cdots \times \Theta_j$. 每个卖方 i 有属性成本函数 $c_i: \Theta \to R$,即卖方 i 提供属性为 $\theta \in \Theta$ 的物品的成本为 $c_i(\theta)$, $c_i(\theta) \geqslant 0$. 唯一的买方有估价函数 $v: \Theta \to R$,即买方对属性为 $\theta \in \Theta$ 的物品的估价为 $v(\theta)$, $v(\theta) \geqslant 0$. 假定买方最终从单一卖方处购买单一物品,拍卖各方具有准线性效用函数(quasilinear utility functions),则卖方 i 以价格 p 卖出属性为 θ 的物品所获得的效用为价格与其成本的差,即 $u_i(p,\theta) = p - c_i(\theta)$;买方以价格 p 买入属性为 θ 的物品所获得的效用为其对物品的估价与价格的差,即 $u^B(p,\theta) = v(\theta) - p$. 应用于 B2B 交易、企业采购的多属性反向拍卖其目标一般是"市场分配效率最大化",多属性拍卖机制是有效率的,当且仅当拍卖机制能够产生最大化所有买方和卖方总效用的解,即

$$V(I) = \max_{\theta \in \Theta, i \in I} v(\theta) - c_i(\theta).$$

2　迭代多属性拍卖机制

针对买卖双方不具备完整的偏好信息、缺少完整效用函数的多属性反向拍卖问题,提出迭代拍卖机制 IMA.

Step 1　买方发布对投标的基本要求,特别是有关非价格属性的要求,同时发布最大拍卖轮数 MAX_R 、每个回合投标方的投标机会数 OPT、退出回合数 QUIT_R ,并为每个卖方分配一个唯一编号,初始化卖方 i 的失败回合数 FAIL_R_i = 0;

Step 2　每个卖方提交一个投标,竞标开始,当前轮数 CUR_R =1;

Step 3　买方从投标集合中选择对自己最佳的投标,作为本轮的临时性中标,进入下一轮, CUR_R = CUR_R +1;

Step 4　买方按编号次序与上一轮临时中标提供者之外的卖方进行交互,执行 Step 5;

Step 5　买方向卖方 i 公布上一轮临时性中标 $\text{bid}_{\text{CUR_}R-1}$,卖方 i (最多)有 OPT 次投标机会,每当卖方 i 提出一个投标,买方向卖方 i 公布该投标是否击败 $\text{bid}_{\text{CUR_}R-1}$. 结果有如果卖方 i 提出了击败 $\text{bid}_{\text{CUR_}R-1}$ 的投标(可能有多个),则卖方 i 可以从中选择某个投标作为本轮投标,否则,即卖方 i 不能提供击败 $\text{bid}_{\text{CUR_}R-1}$ 的投标,则 FAIL_R_i = FAIL_R_i +1,如果 FAIL_$R_i \geqslant$ QUIT_R ,则卖方 i 以失败退出拍卖.

Step 6　如果只剩一个卖方,则该卖方中标,成交方案为 $\text{bid}_{\text{CUR_}R-1}$,拍卖成功结束;

Step 7　如果当前轮数 < MAX_R,转 Step 3;否则,拍卖以失败结束.

该机制具有:

1)迭代拍卖机制 IMA 是一个多轮迭代拍卖过程,在此过程中,卖方通过不断提出新的、对买方更具吸引力的投标来竞争,以期中标,从这一点上来说,IMA 的思想与英式拍卖是一致的.

2)由于买卖双方不具备完整的偏好信息、缺少完整的效用函数,卖方无法提出定量的评标准则,买方也无法计算出针对当前局势的最优策略,因此,买卖双方必须通过多次"卖方投标,买方告知是否获胜"的交互寻找新的、更具效率的投标(交易方案),为此,IMA 机制中每轮允许每个卖方有多次投标机会.

3)由于多属性拍卖中只能有一个卖方获胜,因而卖方之间是完全竞争的关系,卖方在保证不亏损的前提下必须尽可能为买方提供更高的效用以获得中标.

假定 IMA 拍卖机制中,买方采取坦诚策略,即对于卖方提供的方案,买方进行比较并将比较的真实结果告诉卖方,换言之,买方仅通过卖方之间的自然竞争来获得对自己最有价值的交易方案,这种假设对于 B2B 交易市场是合理的. 对于卖方来说,在拍卖过程中如何能够不断地提出更能吸引买方的投标,同时又尽可能保证和提高自身效用是其关键问题.

3　协同演化计算的多属性拍卖

Agent 的计算经济学(Agent-based computational economics, ACE)[10]将经济/市场建模为自治交互 Agent 构成的演化系统,Agent 之间不断地交互并从交互中学习,进而不断演化,达到竞争均衡状态. ACE 因其对经济个体行为和市场行为的良好建模能力、分析能力成为分析市场未来行为、进行经济机制设计的重要工具,其中,协同演化计算(Co-evolutionary computation)是 ACE 的一种重要方法. 本文将 ACE 方法引入多属性拍卖问题,提出一个基于协同演化计算的多属性拍卖市场模型,一方面为 IMA 拍卖机制下卖方的投标策略提供(学习能力和策略能力方面的)工具支持,另一方面仿真和验证 IMA 拍卖机制的性能.

协同演化计算方法是从传统的遗传算法发展而来,采用生态系统的术语并模拟自然界的协同进化机制. 协同演化计算方法中,每个 Agent 模拟

生态系统中的一个物种,多个物种之间互相交互、协同进化,进而使整个生态系统不断演化. 物种之间从基因角度是独立的,即个体只能与相同物种的其他个体形成配偶、繁殖后代. 协同演化计算是演化计算的一个新的研究领域,目前其理论和应用正处于快速发展中[11-12]. IMA 机制的协同演化计算模型 IMA-CGA 如图 1 所示.

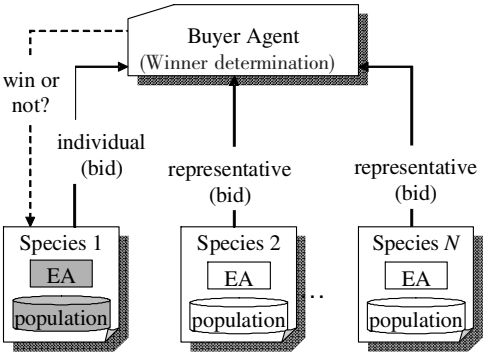

图 1 IMA 拍卖机制的协同演化计算框架

该模型中拍卖市场的每个卖方由生态系统中的一个物种表示,每个物种包括一个种群和一个演化算法,种群中的每个个体代表了卖方的一个投标策略,物种利用演化算法对种群不断演化以适应环境. 拍卖市场中的买方由买方 Agent 表达,买方 Agent 的行为是判断卖方 Agent 的投标是否获胜(win or not),即是否能击败上一轮所有其他物种的投标代表. 图 1 从物种 1 的角度展示了演化算法的适应度评价过程,其他物种与之相似. 物种 1 在对每个个体(投标策略)进行适应度评价时,需要与其他物种的代表(投标策略,对应于 IMA 机制中上一轮投标)形成一次交互,由买方 Agent 判断物种 1 的投标策略是否能够击败其他物种代表,其后买方 Agent 向物种 1 发送结果,物种 1 利用这一结果评价该个体的适应度. 本模型中卖方个体的适应度是卖方对该策略的偏好,这种偏好不需要是精确的效用值,只需能够近似反映偏好的相对程度即可.

协同演化过程中,种群代表的选择(即本轮的投标)是一个重要的问题,对应于 IMA 机制 Step 4 中的投标选择,有多种选择策略,选择物种的最好个体更为符合卖方在获胜的前提下最大化自身效用的本质特征,且有利于快速演化达到稳定状态,为此,本文采用此种策略. 此外,算法的终止条件也是协同演化算法的重要问题,常用的方法是演化固定的代数. 文中基于 IMA 机制的特点提出:某个种群如果连续若干代(对应于退出回合数 QUIT_R)所有个体的效用均为零,即无法提出击败其他卖方的投标策略,则该物种/卖方退出演化过程. 当最后一个竞争者退出时,所剩的唯一的卖方获胜,成交方案是该卖方种群上一代的代表. 当然,如果演化到最大代数(对应于 IMA 中的最大轮数 MAX_R)仍未成功结束,则演化过程失败.

协同演化计算模型完整的仿真了多属性拍卖市场和 IMA 机制,包括买方、卖方、卖方之间的竞争、买方和卖方之间的信息交互以及迭代拍卖过程. 与此同时,从理论上讲,物种的演化过程为卖方 Agent 提供了经济学习能力和策略能力,从而为其投标策略提供了工具支持.

4 仿真实验与分析

4.1 计算实例

目前,有关多属性拍卖问题尚未有公认的实验问题集,本文参考 Beil 等的多属性反向拍卖实例. 虽然该实例只有 $N=2$ 个卖方和唯一的非价格属性质量 q,但买方估价函数和卖方的成本函数是非线性函数,因而适合于关于偏好提取困难的问题假设,适合于检验所提出机制和协同演化计算过程的有效性. 在该实例中,卖方 1 的成本函数为 q^3+4q^{15},卖方 2 的成本函数为 $2q+q^3$,买方的估价函数为 $5q^{0.9}$.

利用 Microsoft Visual C++ 基于 GALib[14] 实现了协同演化计算过程 IMA-CGA,对价格和质量属性采用实数编码,每个种群中有 50 个体,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,最大代数为 100,个体获胜情况下其为卖方提供的效用值作为个体的适应度,某个卖方连续 4 代个体适应度均为零则该卖方以失败退出. 当某个投标提供的效用比另一投标的效用≥0.1 时,买方认为该投标获胜. 利用该算法对实例进行了求解,过程和结果如图 2所示.

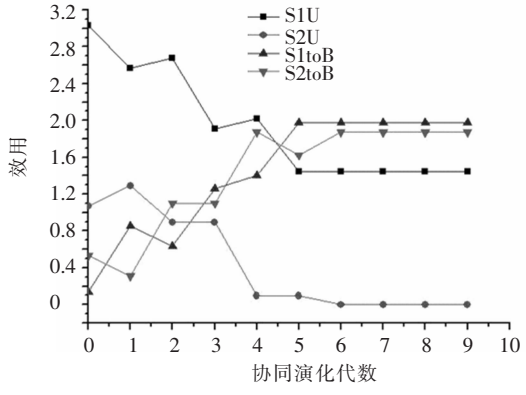

图 2 多属性反向拍卖问题实例的协同演化过程

图 2 中 S1U 和 S1toB 分别为卖方 1 的每代最好个体(投标)为其自身和买方提供的效用,S2U 和 S2toB 分别为卖方 2 的每代最好个体(投标)为

其自身和买方提供的效用. 种群之间的竞争和交互主要反映在 S1toB 和 S2toB 的变化,宏观上,与对手之间的交互和竞争迫使卖方 Agent 不断提高对买方的效用以击败竞争对手,这一过程也伴随着自身效用的下降. 从第 6 代开始,卖方 2 为买方提供的效用 S2toB = 1.87,已无法击败竞争对手为买方提供的效用 S1toB = 1.98,自身效用降为零,且经过 4 代的演化这种均衡仍然没有打破,演化过程结束,卖方 1 获胜,成交方案为价格 p = 2.21,质量 q = 0.82,其自身获得的效用为 1.45. 微观上,演化算法为物种提供了较强的适应性,这不仅表现在激烈的竞争条件下提高适应能力以争取中标,同时也表现在当来自对手的竞争压力较弱时,物种能够灵活的降低出价以提高自身的效用,如卖方物种 1 从第 1 代到第 2 代的演化.

对协同演化计算过程达成的结果进行均衡性分析.

1)基于完全信息假设建立下列模型,目标函数是卖方 i 为买方提供的效用最大化,约束是卖方 i 的个体理性,即自身效用不小于零(不亏损).

$$u_i^B = \max_{\theta\in\Theta} v(\theta) - p,$$
$$\text{s.t. } p - c_i(\theta) \geqslant 0. \qquad (1)$$

利用 Lingo 8 优化软件求解,得到卖方 2 能够为买方提供的最大效用为 2.02,与卖方 1 获胜方案提供的效用(1.98)之差低于获胜阀值 0.1,因此对卖方 2 来说不存在使自己更好(获胜)的策略. 考查卖方 1 当其为买方提供的效用不低于 1.98 时,是否存在其它策略使自己获得更大的效用,模型为

$$\max_{\theta\in\Theta} p - c_i(\theta),$$
$$\text{s.t. } v(\theta) - p > 1.98. \qquad (2)$$

最优解为 1.46,协同演化过程达成的成交方案为卖方 1 提供的效用(1.45)与之偏差仅为 0.8%,因此对卖方 1 来说,协同演化过程达成的结果是其近似最优策略. 综上,假定买方采取坦诚策略,协同演化过程 IMA-CGA 为卖方提供的策略是其近似事后纳什均衡(*ex* -post Nash equilibrium)策略.

2)如果拍卖方将自己的真实效用函数作为评分规则发布给投标方,则 Vickrey 拍卖机制的多属性版本是有效的,因此,将其作为 IMA 机制效率分析的基准. 利用 Vickrey 机制对问题实例进行拍卖,结果是卖方 1 获胜,买方获得的效用为 2.02,卖方 1 的效用为 1.42,IMA 与之的偏差为 2%. Vickrey 机制下市场总效用为 3.44,协同演化计算支持的 IMA 机制市场总效用为 3.43,两者偏差仅为 0.3%. 因此,基于协同演化计算过程的 IMA 机制是近似有效率的.

4.2　仿真实验

假定有 N = 2 个卖方,单一买方,除价格属性外拍卖中还要考虑质量属性 q. 设买方的估价函数为 $50 * q^{0.9}$,卖方的成本函数为 $a_{s1}q + a_{s2}q^3 + a_{s3}q^{15}$,$s$ 为卖方的编号,$s \in \{1,2\}$. 应用随机方法产生50个问题实例,即50组卖方成本函数,其中,$a_{s1} \in (0,10)$,$a_{s2} \in (0,5)$,$a_{s3} \in (0,2)$. 利用 IMA-CGA 过程对这些问题实例进行了求解,算法相关参数的设置同计算实例. 以多属性 Vickrey 拍卖机制作为基准,对 IMA 机制和 IMA-CGA 算法进行分析.

1) 是否选择了最具效率的卖方. 50 个拍卖问题实例中,有 48 个问题实例的结果选择了最具效率的卖方,占问题总数的百分比为 96%. 另外两个问题实例中,两个卖方能够为买方提供的最高效用非常接近,二者自身的效用也非常接近,IMA 机制和 IMA-CGA 过程仍然是有效的.

2) 均衡性分析. 实验结果分析可知,失败卖方策略最优性的平均值为 96%,说明失败卖方在 IMA - CGA 过程的支持下已经向买方提出了具有近似最高效用的投标,因此,对失败卖方来说协同演化过程达成的结果是其近似最优策略. 获胜卖方策略最优性的平均值为 81%,这意味着:① 获胜卖方在 IMA-CGA 过程的支持下,提出了对买方来说比对手投标具有更高效用的投标,赢得拍卖并对自身效用提供了较好的保证;② 卖方能够为自身提供的效用还有改善的空间,这一改善可以在拍卖结束后通过与买方的进一步协商获得. 总体上,协同演化过程 IMA-CGA 为卖方提供的策略是其近似事后纳什均衡策略.

3) 效率. 实验结果分析可知,IMA 机制的结果与 Vickrey 机制的结果相比效率偏差平均值为 1.7%,因此,IMA 机制和 IMA-CGA 过程是近似有效率的. 对效率偏差的分布进行统计,约 50% 问题实例结果的效率偏差 <1%,96% 问题实例结果的效率偏差 <4%,因此,IMA 机制不仅具有较高的有效性,同时具有较好的鲁棒性.

实验结果表明,应用 IMA 机制进行多属性拍卖,在买方采取坦诚策略的前提下,协同演化计算为卖方提供的策略是其近似事后纳什均衡策略,拍卖以近似有效率的市场交易成功结束.

5　结　论

1) 提出迭代式多属性拍卖机制 IMA.

2）提出基于协同演化计算的迭代多属性拍卖过程IMA-CGA，为卖方提供策略支持.

3）实验结果表明，IMA和IMA-CGA能够使多属性拍卖快速达到竞争均衡状态，且拍卖结果兼具近似有效性和鲁棒性.

参考文献：

[1] MCAFEE R P, MCMILLAN J. Auctions and bidding [J]. Journal of Economic Literature, 1987, 25(2): 699－738.

[2] CHE Y K. Design competition through multidimensional auctions [J]. RAND Journal of Economics, 1993, 24(4): 668－680.

[3] TEICH J E, WALLENIUS H, WALLENIUS J, *et al.* Emerging multiple issue e-auctions[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 159(1): 1－16.

[4] MYERSON R B. Optimal auction design[J]. Mathematics of Operations Research, 1981, 6(1): 58－73.

[5] BRANCO F. The design of multidimensional auctions[J]. RAND Journal of Economics, 1997, 28(1): 63－81.

[6] MILGROM P. An economist's vision of the B-to-B marketplace [EB/OL]. Executive white paper, http://www.perfect.com.

[7] 金淳，石纯一. 一种暗标叫价的多属性拍卖方法[J]. 计算机学报，2006，29(1)：145－152.

[8] DAVID E, AZOULAY-SCHWARTZ R, KRAUS S. Protocols and strategies for automated multi-attribute auctions[C]//Proc of the ACM International Joint Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (AAMAS02). New York: ACM, 2002: 77－85.

[9] 金淳，石纯一. 一种递增叫价的多属性拍卖方法[J]. 计算机研究与发展，2006，43(7)：1135－1141.

[10] TESFATSION L. Agent-based computational economics: Growing economics from the bottom up[J]. Artificial Life, 2002, 8(1): 55－82.

[11] POTTER M A, JONG de K A. Cooperative coevolution: An architecture for evolving coadapted subcomponents [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(1): 1－29.

[12] WIEGAND R P. An Analysis of Cooperative Coevolutionary Algorithms[D]. University Dr Fairfax: George Mason Univ, 2003.

[13] BEIL D R, WEIN L M. An inverse-optimization-based auction mechanism to support a multi-attribute RFQ process[J]. Management Science, 2003, 49(11): 1529－1545.

[14] MATTHEW W. GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components[R]. version 2.4, MIT, 1996.

（编辑 张 红）

（上接第271页）

[5] WU V, MANMATHA R, RISEMAN E M. Text finder: An automatic system to detect and recognize text in images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(11): 1224－1229.

[6] OTSU N. A threshold selection method from grey-level histograms[J]. IEEE Trans System Man Cybernet, 1979, SMC－9(1): 62－66.

[7] ROSS T J. Fuzzy Logic with Engineering Applications [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.

[8] PAL S K, MAJUMDER D K D. Fuzzy Mathematical Approach to Pattern Recognition[M]. New York: Wiley, 1986.

[9] WU Z Y, LEAHY R. An optimal graph theoretic approach to data clustering: Theory and its application to image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1993, 15(11): 1101－1113.

[10] SHI Jianbo, MALIK J. Normalized cuts and image segmentation[J]. IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intellence, 2000, 22(8): 888－905.

[11] HE X, CAI Deng, WEN Jirong, *et al.* Clustering and searching WWW images using link and page layout analysis[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications, 2007, 3(2): 1－10.

[12] HIGHAM D J, KALNA G, KIBBLE M. Spectral clustering and its use in bioinformatics[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007, 204(1): 25－37.

[13] FIEDLER M. Algebraic connectivity of graphs[J]. Czech, Math J, 1973, 23(98): 298－305.

[14] NG A Y, JORDAN M I, WEISS Y. On spectral clustering: Analysis and an algorithm[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 2002: 849－856.

[15] 陶文兵，金海. 一种新的基于图谱理论的图像阈值分割方法[J]. 计算机学报，2007，30(1)：110－118.

[16] LUCAS S M, PANARETOS A, SOSA L, *et al.* ICDAR 2003 robust reading competition[C]//Proc of 7th International Conference on Document Analysis and Recognition. [s. n.]: [s. l.], 2003: 682－687.

（编辑 张 红）