第6卷第5期　　　　管理科学学报　　　　Vol.6 No.5
2003年10月　　JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCES IN CHINA　　Oct., 2003

组合拍卖竞胜标确定问题的混沌搜索算法①

陈培友[1,2], 汪定伟[1]
(1. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 黑龙江科技学院经济贸易系, 哈尔滨 150027)

摘要:组合拍卖能够提高拍卖的效率,还能降低竞标人的风险.但竞胜标确定问题是一个NP难题.在分析该问题特性的基础上,设计了一种嵌入优先适合启发式规则的混沌搜索算法.与传统算法相比,该算法具有实现方便,寻优效果好的优点.实例计算结果表明了算法在解决该问题的有效性和广阔的应用前景.

关键词:组合拍卖; 竞胜标确定问题; 第一价格密封拍卖; 混沌; 电子商务
中图分类号:TP29　　文献标识码:A　　文章编号:1007-9807(2003)05-0024-05

0　引　言

组合拍卖在电子商务中是一个十分重要的应用领域,它可以使竞标人把多个项目看作一个标的来竞标.与其它拍卖机理比较,组合拍卖不仅能够提高拍卖的效率,而且还能降低竞标人的风险[1],因而这种拍卖方式具有广阔的应用前景.不过,在组合拍卖的机理设计中,组合拍卖竞胜标确定问题是一个NP难题[2],已经引起越来越多人的研究.文献[3～7]分别对这一问题及其传统的精确算法和近似算法做了分析研究,表明:传统的精确算法因求解问题的规模相对较小在实际应用中受到限制,近似算法因求解问题的精度相对不足或耗时相对过多在实际应用中受到限制.文献[8]综述了这一问题优化算法的最新发展,预见了该问题未来的研究方向.为了克服传统的精确算法和近似算法求解该问题的不足,本文在研究该问题的特性基础上,设计了一种嵌入优先适合启发式规则的混沌搜索算法,并以实例计算验证了算法解决该问题的有效性和广阔的应用前景.

1　组合拍卖竞胜标确定问题描述

电子商务中,如果采用第一价格密封拍卖(first-price sealed-bid auction)方式[9],来实现多个项目的拍卖,则非组合拍卖竞胜标确定是一件十分容易的事情,只需将"标的"相同的最高价格的标分别挑出即可.如果有 α个标, m 个待拍项目,则只需用 $O(\alpha m)$ 这么长时间.在同样条件下,组合拍卖竞胜标确定要复杂得多,假设 M 为待拍项目的集合,任意投标人 i 可以对 M 中的单项或其项目的组合 $S\subseteq M$ 投标,标价为 $b_i(S)$.为了问题描述简洁和解决问题清晰,对上述标集先进行预处理.

预处理1　对"标的"相同的单一标,只保留其最高价格的标,即有

$$\bar{b}(S) = \max_{i\in bidders} b_i(S) \tag{1}$$

预处理2　对"标的"相同的组合标,只保留其最高价格的组合标.

这样,其它的标可视为因无"竞争力"而被遗弃掉.预处理1先是淘汰掉"显性"的无竞争力的标;预处理2则是淘汰掉"隐性"的无竞争力的标,这种标具有一定的欺骗性.

本文所述的标均是经过上述处理后剩下的"标的"不同的标,共 n 个.这样就可以得到下面的组合拍卖竞胜标确定问题的一般模型

① 收稿日期:2002-06-13; 修订日期:2003-05-28.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60084003; 70171056).
作者简介:陈培友(1967—),男,黑龙江人,东北大学博士生,现为黑龙江科技学院副教授.

$$\max_{X \in A} \sum_{S \in X} \bar{b}(S) \qquad (2)$$

模型说明:

1) 模型以极大化拍卖商收益为目标;

2) X 为一个可行解,即每个项目至多可以分配给一个标;

3) A 为可行解空间,令 $\Gamma = \{S \subseteq M\}$,因问题特性,有定义如下

$$A = \{W \subseteq \Gamma \mid S \cap S' = \varnothing, \forall S, S' \in W\} \qquad (3)$$

这里,W 是 M 的族集(即 $\bigcup_{S \in W} S = M$).

从上面的模型中,不难看出该问题是一个组合优化问题. 不过,虽然看起来该问题模型较为简单,但求解却是十分复杂的计算问题,是一个 NP 难题.

2　嵌入优先适合启发式的混沌搜索算法

混沌是非线性动力学系统特有的一种运动形式,混沌表现出的随机性是系统内在的随机性,它的一个轨道可以在其吸引子中稠密. 根据混沌吸引子的这种特性,当时间足够长,这种轨道就能以任意精度逼近吸引子中的任意点,因此,近年来人们开始尝试利用混沌吸引子的这种特性来求解最优化问题[10,11]. 然而,对于一个非线性动力学系统,它是否会产生混沌,要取决于系统参数的选择. 众所周知,对于一个非线性方程组,一组不同的参数会产生一个性质不同的动力学系统. 一个非线性动力系统何时产生混沌,产生混沌后如何控制混沌的发展,是一件十分困难的事情. 在本文中,混沌搜索路径序列采用人们熟悉的虫口模型,即一维 Logistic 映射[12]. 动力学系统处在运动状态时,实际上已经多次经历过最优解或近似最优解了,只是系统处于混沌状态,系统在经历最优解或近似最优解后又漂移到了其它地方. 显而易见,只要把系统在混沌状态下经历过的最优解或近似最优解记录下来,就可以不必等到系统稳定后再输出最优解,基于上述想法和实际问题特性,本文提出了嵌入优先适合启发式规则的混沌搜索算法.

算法拟采用一维 Logistic 映射来产生搜索路径序列,一维 Logistic 映射的形式如下

$$f: x(t+1) = \alpha \times x(t) \times (1 - x(t))$$

参数 $\alpha \in (2,4]$, $f: [0,1] \to [0,1]$

Logistic 映射有如下特性:

1) 当 $\alpha \in (2,3)$ 时,映射 f 有稳定的不动点;

2) 当 $\alpha \in [3,3.57]$ 时,映射 f 处于倍周期分岔阶段;

3) 当 $\alpha \in (3.57,4)$ 时,映射 f 失去稳定的周期轨道,出现混沌,但难以确定在哪些点上其混沌集的一维 Lebesgue 测度大于 0;

4) 当 $\alpha = 4$ 时,系统处于混沌状态,$[0,1]$ 是映射 f 的混沌不变集.

在 Logistic 混沌不变集中,当时间足够长,f 的任一轨道在其中稠密,即对于 $\forall \varepsilon > 0$,以及 $\forall x \in [0,1]$,开球 $B(x,\varepsilon)$ 中必包含 f 的一条轨道上的点. 反之,f 的任一轨道能以任意精度逼近 $[0,1]$ 中的所有点.

本文利用 $\alpha = 4$ 时的 Logistic 映射混沌不变集的上述特性搜索问题的最优解. 求解 n 维最优化问题,相当于在 n 维空间中确定一个使目标函数值最大的点,为此需要用 n 个独立的 Logistic 映射来产生该空间中点的 n 个坐标分量. 因为每一个坐标分量都能在 $[0,1]$ 中稠密,所以这样产生的点都能在 n 维单位超立方体中稠密,即这些点的序列能够以任意精度逼近超立方体中所有点,当然也能够以任意精度逼近超立方体中的全局最优解. 根据这样分析,Logistic 混沌模型可以用于求解连续最优化问题.

用 Logistic 混沌模型求解组合拍卖竞胜标确定问题还需要作变换和嵌入优先适合启发式规则[13],其搜索原理如下:

n 维空间中的一个点有 n 个坐标分量,让点的第 i 个坐标对应第 i 个标 b_i $(i = 1,2,\cdots,n)$,对点的 n 个坐标分量排序(升序或降序),相应地会得到 n 个标的一种排列,即一条搜索路径. 再按优先适合启发式规则就可以得到组合拍卖竞胜标确定问题的一条合法搜索路径(一个可行解). 对应一条搜索路径也就对应组合拍卖竞胜标确定问题的一条合法搜索路径.

优先适合启发式规则是指一条搜索路径中排在前面的标具有被选取的"优先权",运用该规则具体步骤如下:

步骤 1 保留排列中的第一个标 $b(S_i)$,令 $U = S_i$;

步骤 2 按照搜索路径顺序选取标 $b(S_j)$,若 $U \cap S_j = \varnothing$,保留 $b(S_j)$,且令 $U = U \cup S_j$;否则,划去 $b(S_j)$;

步骤 3 重复步 2,当 $U = M$ 时停止选取,并划去其余的标.

在标的排列中未被划去的标的子排列就是一条合法搜索路径. 要想得到组合拍卖竞胜标确定问题的一条合法搜索路径,首先要确定这 n 个标的一种排列顺序,得到一条搜索路径,然后再运用优先适合启发式规则就可以实现. 算法中的 n 个标的排列顺序按如下方式产生:首先在(0,1) 区间中产生 n 个随机数 $X(1, n)$ 作为解空间中的一个点的坐标,第 i 个随机数对应第 i 个标 $b_i(i = 1, 2, \cdots, n)$,将这 n 个随机数按升序(或降序) 排列,随机数对应的标也同时获得一个排列,这个排列作为第一条路径,后面新的路径将通过 Logistic 映射产生. 把上阶段的 n 个随机数 $X(1, n)$ 作为初值,按式 $X(t+1) = 4X(t)(1 - X(t))$ 得到新的 n 个值,再对这新的 n 个值排序,得到新的路径,依此类推,除第一条路径随机产生外,后面的路径全部由 Logistic 映射产生. 每得到一条搜索路径,按优先适合启发式规则就得到一条合法搜索路径.

目标函数是使合法路径上的标价之和最大化,算法的步骤如下:

1) 对 $X(i)$ 赋随机初值,$i = 1, 2, \cdots, n$,最优目标函数初值 $opt\_f = 0$,对控制参数 k 赋一个较大的初值;

2) 把 $X(i)$ 的排序结果赋给 $Y(i)$,对照 $X(i)$, $Y(i)$ 求得当前一个搜索路径,再按优先适合启发式规则得到当前一个合法路径;

3) 计算当前合法路径目标值 f;

4) 记忆最大目标值 opt_f:如果 $f > opt\_f$ 则 $opt\_f = f$, $step = 0$,并记忆当前合法路径;

5) 判断是否结束迭代:如果 $step = k$,则停止;

6) 用 Logistic 映射产生下一组 $X(1, n)$:
$X(t+1) = 4X(t)(1 - X(t))$; $step = step + 1$;

7) 返回第 2) 步.

3 计算实例

表 1 给出一个简单的组合拍卖竞胜标确定问题实例中需要的各项数据. 该问题总的投标数经过预处理后剩下的标数为 30 个,用标号 1 ～ 30 分别表示. 待拍卖的项目 10 个,分别用 A ～ J 表示;标书的“标的”中允许投标的最大项目的组合数为 3. 为了简洁,用“标数/ 项目数/ 允许投标的最大项目组合数”描述该问题规模情况,即 30/ 10/ 3. 混沌搜索算法程序用 VC ++ 语言编程,程序运行在 PII/ 166 微机上. 表 2 给出了程序 20 000 次迭代运行的结果.

从表 2 中不难看出,标号为 9、10、15、18、29 的标书为竞胜标,对应的竞标人为买受人,买受人获得的项目分别为 (H, I)、(A, D, E)、(B, J)、(F, G)、(C),拍卖商获得最大收益为 6 216.83.

表 1 30/ 10/ 3 组合拍卖竞胜标确定问题实例

标号	标的	标价	标号	标的	标价	标号	标的	标价
1	(B, D, H)	2 407.19	11	(C, F, J)	1 646.92	21	(I)	840.56
2	(F, H, I)	2 309.00	12	(B, F, G)	1 620.68	22	(D)	827.86
3	(F, H, J)	2 224.43	13	(E, I)	1 518.77	23	(J)	771.94
4	(B, D, E)	2 145.06	14	(F, H)	1 478.81	24	(E)	626.50
5	(G, I, J)	2 067.01	15	(B, J)	1 469.68	25	(B)	607.23
6	(B, D, F)	2 040.48	16	(F, J)	1 410.36	26	(A, G)	566.87
7	(B, F, I)	1 998.80	17	(C, I)	1 135.49	27	(F)	531.89
8	(C, E, H)	1 881.22	18	(F, G)	1 022.73	28	(G)	415.26
9	(H, I)	1 798.28	19	(A, D)	943.72	29	(C)	273.97
10	(A, D, E)	1 652.16	20	(H)	906.36	30	(A)	101.12

表 2　30/10/3 组合拍卖竞胜标确定问题求解结果

问题规模	最优解/近似最优解	目标值
30/10/3	(9,10,15,18,29)	6 216.83

对本实例,表 3 就算法的性能(求解精度和时间复杂度)及算法实现的难易程度,给出了传统精确算法与近似算法和混沌搜索算法的对比分析.

表 3　各种算法性能与算法实现的对比

算法名称	求解结果情况	时间复杂度 (所需计算步数 step)	算法实现
穷举法	最优解	$\Omega(10^5) \le step \le O(10^{10})$	很难
动态规划法	最优解	$\Omega(2^{10}) \le step \le O(3^{10})$	较难
最优任意时间算法	最优解	$step \le O(30^{10})$	较难
混沌搜索算法	最优解	$step \le O(2^{14})$	较易

实例给出的问题规模较小,算法处理问题规模为 100 或与其相近时,都有着很好的达优率. 由于算法本身的特性,在时间足够长的条件下,能以任意精度逼近最优解.

4　结束语

对于组合拍卖竞胜标确定的一般问题,传统的精确算法和近似算法存在不足,前者处理问题的规模较小,后者得到的常是近似解或算法耗时过多. 本文的嵌入优先适合启发式规则的混沌搜索算法,能克服上述两点的不足. 利用混沌搜索产生搜索路径,并根据组合拍卖竞胜标确定问题的特性,嵌入优先适合启发式规则生成合法搜索路径,算法具有实现方便、寻优效果好的优点. 实例计算结果表明算法在解决该问题的有效性和广阔的应用前景.

参 考 文 献:

[1] Rassenti S J, Smith V L, Bulfin R L. A combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation[J]. Bell Journal of Economics, 1982, 13: 402—417

[2] Rothkopf M H, Pekec A, Harstad R M. Computationally manageable combinatorial auctions[J]. Management Science, 1995, 44(8): 1131—1147

[3] Sandholm T. Approaches to winner determination in combinatorial auctions[J]. Decision Support Systems, 2000, 28(1-2): 165—176

[4] Leyton-Brown K, Shoham Y, Tennenholtz M. An Algorithm for Multi-unit Combinatorial Auctions[R]. 17th National Conference on Artificial Intelligence, Austin, TX: 2001. 56—61

[5] Arne Andersson, Mattias Tenhunen, Fredrik Ygge. Integer Programming for Combinatorial Auction Winner Determination[R]. Fourth International Conference on Multi-agent Systems Proceedings, Boston, MA: 2000. 39—46

[6] Stan van Hoesel, Rudolf Miller. Optimization in electronic markets: Examples in combinatorial auctions[J]. Netnomics, 2001, (3): 23—33

[7] Sandolm T W. An Algorithm for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions[R]. Proceedings of Sixteeth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Stockholm, Sweden, 1999. 542—547

[8] CHEN Peiyou, WANG Dingwei. Approaches to Winner Determination in Combinatorial Auctions: A Review[R]. Proceedings of International Conference on Regional Logistics and Supply Chain Manageement, Shenyang: Baishan Press, 2002. 22—30

[9]刘晓君，席酉民．拍卖理论与实务[M]．北京：机械工业出版社，2001．51—59
[10]骆晨钟，邵惠鹤．采用混沌变异的进化算法[J]．控制与决策，2000，(5)：557—560
[11]张国平，王正欧，袁国林．求解一类组合优化问题的混沌搜索法[J]．系统工程理论与实践，2001，(5)：102—105
[12]刘秉正．非线性动力学与混沌基础[M]．长春：东北师范大学出版社，1994．35—42
[13]玄光男，程润伟．遗传算法与工程设计[M]．北京：科学出版社，2000．68—71

Chaotic search algorithm for winner determination in combinatorial auctions

CHEN Pei-you[1,2], *WANG Ding-wei*[1]

1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. Department of Economy and Trade, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

Abstract: Combinatorial auctions, *i. e.*, auction where bidders can bid on combination of items, is a very important application area in the electronic commerce nowadays. It tends to lead to more efficient allocations than traditional auctions in multi-item auctions, while keeping risks for bidders low. However, the winner determination problem in combinatorial auctions is NP-hard. By the description of the problem and analysis of its characteristics, this paper proposes a Fitting-First heuristic embedded chaotic search algorithm. Comparing to the traditional algorithms, it is easy to operate and can get better results. The outcome indicates the efficiency and the wide application promise of the heuristic algorithm for solving this problem.

Key words: combinatorial auction; winner determination problem; first-price sealed-bid auction; chaotic; electronic commerce