

## ◎博士论坛◎

# 基于组合拍卖的多机器人任务死锁解决方法

姜 健, 闫继宏, 臧希喆, 赵 杰

JIANG Jian, YAN Ji-hong, ZANG Xi-zhe, ZHAO Jie

哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150001

Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

JIANG Jian, YAN Ji-hong, ZANG Xi-zhe, et al. Multi-robot systems task deadlock resolution based on combinatorial auction. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(4): 1-3.

**Abstract:** A method based on combinatorial auction is presented to solve the deadlock phenomenon in multi-robot foraging. A method named auction tree is presented to solve the problem of excessive combination strategy computation of combinatorial auction. The simulation results show that the method presented in the paper not only can solve the deadlock of multi-robot task but also can make the multi-robot task allocation optimized.

**Key words:** multi-robot systems; cooperation; deadlock; combinatorial auction

**摘 要:** 针对多机器人搜集任务中可能出现的任务死锁现象, 采用基于组合拍卖的方法来解决这一问题。提出了一种拍卖树方法, 用来解决组合拍卖计算量过大的问题。仿真实验结果表明该方法不仅能够消除多机器人的任务死锁, 而且能够在解决死锁问题的同时优化多机器人任务分配结果。

**关键词:** 多机器人系统; 协作; 死锁; 组合拍卖

**文章编号:** 1002-8331(2008)04-0001-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP24

## 1 引言

多机器人系统已经成为人工智能和机器人领域的一个研究热点。如何提高多机器人系统的任务执行效率是多机器人系统研究的一个主要问题。提高多机器人系统任务执行效率有两个主要途径: 一方面是研究更好的多机器人协作算法; 另一方面是研究避免和解决多机器人冲突和死锁的方法。目前, 国内外的研究主要侧重于前者, 对于后者特别是死锁问题的研究还很不足。

近年来拍卖方法已经成为分布式人工智能的一个重要研究方法<sup>[1]</sup>。被拍卖品的概念已从实体物品扩展到服务及任务。其中的组合拍卖方法由于充分考虑到每个买方对各种“被拍卖品组合”的评价而可以得到较高的总体效用, 因而备受关注。但组合拍卖中, 买方需要将所有“物品组合”的叫价全部通知卖方, 才能刻画出买方的偏好。如有  $n$  个被拍卖物品, 物品组合数为  $2^n - 1$ , 这意味着该问题是一个 NP 问题。在多机器人协作中应用该方法, 所需通信量和计算量对物品数量非常敏感, 甚至难以满足时间要求。为解决这一问题, 本文在将任务死锁问题看作组合拍卖问题的前提下, 提出了一种基于拍卖树的方法来解决

决组合策略计算量过大的问题。仿真实验表明, 该方法不仅可以有效地解决多机器人系统任务死锁, 而且可以实现多机器人任务分配的优化。

## 2 多机器人死锁的相关研究

多机器人死锁问题可以分为空间死锁和任务死锁两种。空间死锁是指多个机器人受空间的限制而相互阻挡, 按照原定路径无法不碰撞地完成的状态。任务死锁是指多个机器人由于存在相互依赖的任务而发生相互等待, 造成任务停滞的状态。在空间死锁方面, Jager<sup>[2]</sup>研究了在没有集中控制端的情况下, 发现和解决多机器人空间死锁的问题。Fukuda<sup>[3]</sup>通过 Hand-to-Hand 策略解决 CEBOT 多机器人系统运送物体时由于空间狭窄而造成的空间死锁问题。在任务死锁方面, Parker<sup>[4]</sup>利用急躁等心理学概念和方法解决多个机器人在执行具有顺序依赖关系的子任务时发生的任务死锁现象。以上多机器人死锁的相关研究都没有考虑在解决死锁的同时如何优化多机器人任务分配的问题。本文以多机器人搜集任务中的任务死锁问题为研究对象, 提出了基于组合拍卖的任务死锁解决方法, 试图将任

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA04Z245); 教育部长江学者和创新团队发展计划(No.IRT0423)。

**作者简介:** 姜健(1976-), 男, 博士生, 主要研究方向: 多机器人协作控制; 闫继宏(1974-), 女, 博士后, 讲师, 主要研究方向: 多机器人协作控制; 臧希喆(1975-), 男, 博士后, 讲师, 主要研究方向: 多传感器系统集成及控制; 赵杰(1968-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向: 多机器人协作控制, 多传感器系统集成及控制。

**收稿日期:** 2007-09-13

**修回日期:** 2007-10-29

务死锁和任务分配两个问题同时加以考虑和解决。

### 3 基于组合拍卖的任务死锁解决方法

#### 3.1 任务描述

多机器人搜集是多机器人系统找到散落在未知环境中的目标物并运送到指定区域的一种典型的多机器人任务,该指定区域一般称为基地区。多机器人搜集任务有着广泛的应用背景,如放射性污染物的清理、灾难现场遇险人员的搜救等<sup>[5]</sup>。

如图1所示,在多机器人系统进行搜集目标物的过程中,几个机器人(不失一般性,此处设为4个)都找到了一个目标物,但是都无法单独推动自己找到的目标物,其它机器人都在执行自己的任务而无法对它们进行帮助。此时的4个机器人处于任务死锁状态,即如果它们都坚持原计划,将无法获得新的任务进展。

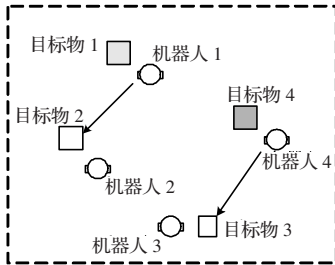


图1 一个组合拍卖方案的示意图

为讨论方便,将处于任务死锁状态的机器人和其对应的任务称为“死锁任务对”,用式 $(O_i, r_i)$ 表示, $r_i$ 表示机器人, $O_i$ 表示 $r_i$ 处于死锁状态时正试图搬运的目标物(Object)。买方(即竞拍者) $O_i$ 是一个虚拟的主体,其真正的计算实体为与 $O_i$ 处于同一“死锁任务对”的 $r_i$ 。卖方为所有处于死锁状态的机器人,卖方是一个虚拟主体,其真正的计算实体为任意一个处于死锁状态的机器人。该卖方虚拟主体将陷于死锁状态的所有机器人作为拍卖品。例如,图1中机器人1代替目标物1对4个机器人进行竞拍,机器人2代替目标物2对4个机器人进行竞拍。这样,死锁问题变为在一个组合拍卖策略集合中,寻找回报尽量大的组合策略的问题。上述拍卖过程与一般的拍卖过程<sup>[6]</sup>有所不同,与文献[7]的思路相近,即将子任务看作竞拍者,而将机器人看作拍卖品。

#### 3.2 数学模型

多机器人的死锁现象是由资源有限及机器人任务分配不当而引发的。多机器人死锁问题至今还没有一个统一的定义。本文尝试给出该问题的一个形式化数学描述。在此之前,首先给出以下几个相关定义。

**定义1** 外助队友组集合 能协助机器人 $R_i$ 完成任务 $M_i$  ( $M_i \in U^*$ ,  $U^*$ 为任务集合)的多个机器人组成一个小组,称为机器人 $R_i$ 的针对任务 $M_j$ 的外助队友组,所有这些外助队友组的集合称为“外助队友组集合”,记为 $PT_{i \rightarrow j}$ 。机器人 $R_i$ 针对任务 $M_j$ 记为 $R_i \rightarrow M_j$ 。

**定义2** 最小外助队友组集合 机器人 $R_i$ 的每一个外助队友组的组成成员都是机器人 $R_i$ 完成任务 $M_i$ 不可缺少的,称这样的“外助队友组集合”为“最小外助队友组集合”,记为 $PT_{i \rightarrow j}^*$ 。

**定义3** 多机器人死锁 如果每个机器人存在于其每一个

“最小外助队友组”中的至少一个机器人的所有“最小外助队友组”中,则该多机器人处于任务死锁状态。多机器人死锁问题的形式化数学描述为:

**前提1**  $PT_{i \rightarrow j}$ 和 $PT_{i \rightarrow j}^*$ 均为机器人集合,且满足 $\forall M_j \in U^*$ ,  
 $\exists PT_i^* \subseteq PT_i, PT_i^* \neq \Phi$ ;

**前提2**  $\forall PT_{i \rightarrow j}^*, \exists R_x \in PT_{i \rightarrow j}^*, \forall PT_{x \rightarrow k}^*$ ,均有 $R_i \in PT_{x \rightarrow k}^* (R_x \rightarrow M_k, R_i \rightarrow M_j, x \neq i, k \neq j, M_j \in U^*, M_k \in U^*)$ ;

**前提3** 每个机器人都不放弃自身任务。

**结论** 多机器人处于任务死锁状态。

#### 3.3 拍卖方法的基本原理

假设一个多机器人系统由 $n$ 个单体机器人构成,系统的整体任务是 $T$ , $T$ 按式(1)分解:

$$T = \{t_1 \cup t_2 \cdots \cup t_i \cup \cdots \cup t_j \cup \cdots \cup t_m\}, t_i \neq t_j \quad (1)$$

$t_i$ 表示由 $T$ 划分出的子任务,每个子任务将由单体机器人来完成。每个单体机器人也定义了两个函数 $f_{irew}(t_j)$ 和 $f_{icost}(t_j)$ ,分别表示机器人 $R_i$ 在完成子任务 $t_j$ 后的收入值(reward)和支出值(cost)。单体机器人的收入支出与整组机器人收入和支出具有式(2)和式(3)的关系。 $F_{Trew}$ 和 $F_{Tcost}$ 分别表示完成任务 $T$ 后的总收入和总支出。基于拍卖方法的目标就是使得机器人系统完成任务 $T$ 时的收益值(Benefit) $F_B$ 最大。通常 $F_B$ 由式(2)表达:

$$F_B = F_{Trew} - F_{Tcost} \quad (2)$$

式(2)中的 $F_{Trew}$ 和 $F_{Tcost}$ 由式(3)和式(4)计算:

$$F_{Trew} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{irew}(t_j) \quad (3)$$

$$F_{Tcost} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{icost}(t_j) \quad (4)$$

#### 3.4 基于拍卖树的组合拍卖方法

组合拍卖指具有一个卖方和多个买方,卖方拍卖的是多个项目或者多个物品,买方可以针对任意多个物品提出价格,卖方根据不同的组合,将物品分给不同的买方,以便获得最大的利益。在本文所讨论的多机器人搜集任务的死锁问题中,卖方为全体处于死锁状态的机器人,可以看作是一个卖方。买方是多个等待搜集的目标物,是多个买方,目标物的真正竞拍行为(包括计算和通信)由与之对应的“死锁任务对”中机器人(执行买方代理角色)来完成。这种卖方与买方“同体”的情况与一般的拍卖中的卖方与买方“分离”的情况本质上是相同的,因为在拍卖过程中同一机器人并不同时执行卖方角色和买方代理角色。

为减少组合拍卖的计算量,我们提出一种称为拍卖树的方法。将组合拍卖的过程类比为树枝生长过程中“强枝”与“弱枝”竞争的过程。如图2所示,每一层最终只有一个“获胜”的强枝,其它“弱枝”遭淘汰。每个“强枝”表示一个买方(一个目标物)的满足自身需要的标的,在一根“树枝”上不允许有重复的拍卖品(即重复的机器人),如图2中灰色表示的一根“树枝”(强枝 $j$ -强枝 $j$ (2)-强枝 $x$ )中三个“强枝”中不允许有机器人的重复。每层“分枝”经过比较只有一个能够“存活”,其它的被“剪掉”,最后得到的一条最粗壮“枝干”为问题的最终解。这一方法的优点在于可以在底层迅速地较弱的可能拍卖策略去掉,极大地减少了计算量,虽然这样可能会损失掉最优策略,但是对于要求实时性而不苛求最优方案的多机器人协作任务来说是合理的。

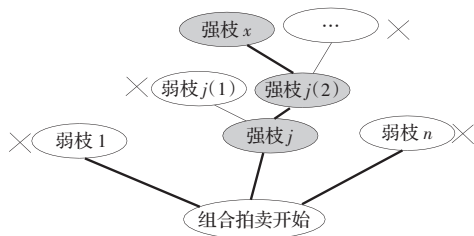


图2 拍卖树方法示意图

下面仅就图2中所示的第一层“强枝”的决策过程进行说明,其它层的“强枝”决策过程与之相同。假设第 $j$ 个目标物为“强枝”,拍卖的收益值可以用式(5)确定:

$$P_j = \alpha_1 M_j - \alpha_2 C_j \quad (5)$$

式中, $M_j$ 是推动的物块的重量总和,即总收入; $C_j$ 是策略的耗费总和,即总支出; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别为 $M_j$ 和 $C_j$ 的重要度系数,用以调节总收入和总支出在收益值 $P_j$ 计算中的比例。 $M_j$ 按照式(6)进行计算:

$$M_j = \sum_{i=0}^n y_i^j m_i^j \quad j=0, \dots, n \quad (6)$$

式中, $m_i^j$ 为第 $i$ 个目标物的质量, $y_i^j$ 为质量计算系数,按式(7)进行计算:

$$y_i^j = \begin{cases} 1, & \text{object was moved} \\ 0, & \text{object was not moved} \end{cases} \quad (7)$$

式(5)中的 $C_j$ 按照式(8)进行计算:

$$C_j = \sum_{i=0}^n x_i^j c_i^j \quad j=0, \dots, n \quad (8)$$

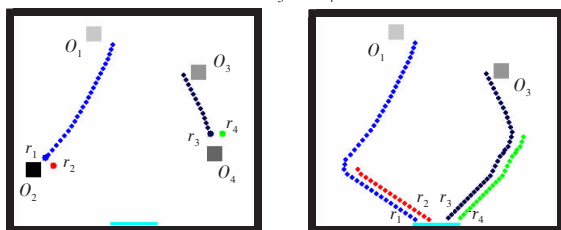
式中, $c_i^j$ 指第 $j$ 个机器人代理为“强枝”时,第 $i$ 个机器人完成策略需要走的路程; $x_i^j$ 是路程计算系数,按式(9)计算:

$$x_i^j = \begin{cases} 1, & \text{robot moved} \\ 0, & \text{robot did not moved} \end{cases} \quad (9)$$

在第一层“强枝/弱枝”竞争中,其它目标物为假设“强枝”时的计算过程与第 $j$ 个目标物为假设“强枝”时相同。对它们的收益值进行比较,收益值最大的目标物为第一层真正的“强枝”,并“存活”,其它“弱枝”被淘汰。其它层的“强枝/弱枝”竞争与第一层所述相同,在此不再赘述。

## 4 仿真实验

如图3所示为多机器人搜集过程中的一个局部场景。多机器人将随机散布的目标物搜集到中下方的基地区中。目标物的重量不同,灰度越大代表重量越大,分别为200、220、260和300(重量的单位与问题研究无关,故省略),机器人结构及功能相同,最大推力为150。图中用比机器人稍小的圆表达机器人轨迹。图3(a)中,左下角的目标物“竞拍”到机器人 $r_1$ 和 $r_2$ ,右下角目标物“竞拍”到机器人 $r_3$ 和 $r_4$ 。图3(b)中,目标物被其



(a)场景截图1

(b)场景截图2

图3 仿真过程截图

“竞拍”到的机器人运送到基地区。

4个机器人被“购买”的一个方案为一个组合策略。例如, $O_2(r_1, r_2)O_1(r_3, r_4)$ 为一个方案,表示机器人1和2被目标物2“购买”,机器人3和4被目标物1“购买”。如表1所示,在第一层“强枝”确定的过程中首先进行一步“假设强枝”的“遴选”。例如,假设目标物1为买方中的“假设强枝”时,分别对策略 $O_1(r_1, r_2)$ 、 $O_1(r_1, r_3)$ 和 $O_1(r_1, r_4)$ 进行比较,最终 $O_1(r_1, r_3)$ 方案获胜,为“假设强枝”,再与其它“假设强枝” $O_2(r_1, r_2)$ 、 $O_3(r_1, r_3)$ 、 $O_4(r_1, r_4)$ 进行对比,找到最终真正的第一层“强枝” $O_2(r_1, r_2)$ ,其它“假设强枝”视为“弱枝”而被淘汰。第二层“强枝”只须在表1中的序号2中的策略中寻找,方法与第一层相同。最终得到优化结果如表2所示。表格中的“—”符号表示该处数据无需计算,即可获得最终需要的评价结果。

表1 部分组合策略比较表

序号	组合策略		收益值
	第1层树枝	第2层树枝	第1层,第2层
1	$O_1(r_1, r_3)$	—	440, —
2	$O_2(r_1, r_2)$	$O_1(r_3, r_4)$	232, 485
		$O_3(r_3, r_4)$	232, 316
3	$O_3(r_1, r_3)$	$O_4(r_3, r_4)$	232, 224
		—	421, —
4	$O_4(r_3, r_4)$	—	299, —

表2 优化结果

序号	最优解/近似最优解	收益值
2	$O_2(r_1, r_2), O_4(r_3, r_4)$	232, 224

## 5 结束语

本文针对多机器人任务死锁问题与经济学中组合拍卖问题的相似性,提出了采用组合拍卖来解决多机器人死锁问题的方法,并提出了拍卖树方法以减少组合拍卖过程中的计算量。仿真实验结果表明本文提出的方法不仅能够解决多机器人任务死锁,而且能够优化多机器人任务分配结果。

## 参考文献:

- [1] 周鑫,包振强,李长仪.基于双方叫价拍卖的多Agent任务报价策略研究[J].计算机工程与应用,2005,41(20):199-201.
- [2] Jager M, Nebel B. Decentralized collision avoidance, deadlock detection, and deadlock resolution for multiple mobile robots[C]//Proceedings IEEE/RSSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.[S.l.]:IEEE Press,2001:1213-1219.
- [3] Fukuda T, Ishihara H, Hiraoka N. Deadlock resolution in distributed autonomous robotic system with hand-to-hand motion[C]//International Conference on Robotics and Automation.[S.l.]:IEEE Press,1996:2049-2054.
- [4] Parker L E. ALLIANCE: an architecture for fault tolerant multi-robot cooperation[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(2):220-240.
- [5] 赵杰,姜健,臧希喆.基于强化学习的未知环境多机器人协作搜集[J].计算机工程与应用,2007,43(10):19-21.
- [6] Lin L, Zheng Z Q. Combinatorial bids based multi-robot task allocation method[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.[S.l.]:IEEE Press,2005:1145-1150.
- [7] Lovekesh V, Adams J A. Market-based multi-robot coalition formation[C]//The 8th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems.[S.l.]:Springer-Verlag Press,2006:1-10.