

文章编号: 1001-0920(2008)05-0541-05

基于焦虑概念和拍卖方法的多机器人协作搜集

姜 健, 臧希喆, 赵 杰

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对目前应用于多机器人搜集任务的拍卖方法很少考虑机器人参与拍卖的时机是否适当这一问题, 在拍卖方法中引入了心理学的焦虑概念, 提出了基于焦虑/拍卖的多机器人协作搜集方法. 通过对机器人焦虑程度的量化反映其对环境、队友及自身状况的评价, 进而反映其对自己独立完成任务的不自信程度和对队友提出的拍卖邀请的主观接受程度. 实验结果表明, 与单纯的拍卖方法相比, 该方法能提高多机器人协作搜集任务的执行效率.

关键词: 多机器人系统; 协作; 拍卖方法; 焦虑概念; 搜集

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Cooperative multi-robot foraging based on anxiety conception and auction method

J I A N G J i a n , Z A N G X i - z h e , Z H A O J i e

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: J I A N G J i a n, E-mail: jiangjianhit@sina.com)

Abstract: Few is taken into account about the application occasion problem of the auction method for the cooperative multi-robot foraging. To solve the problem, anxiety conception is introduced. A algorithm, anxiety and auction cooperation foraging algorithms, combined anxiety conception with auction method, is presented. The quantification of its anxiety degree reflects the robot's evaluation about the condition of the environment, its teammates and itself. The anxiety degree also reflects the robot's unconfidence about its foraging with its own strength and reflects the robot's acceptability to the auction proposed by its teammates. Experiment results show that, compared with the only auction method, the proposed method can improve the efficiency of performing multi-robot foraging.

Key words: Multi-robot system; Cooperation; Auction method; Anxiety concept; Foraging

1 引 言

多机器人协作是目前国内外机器人及人工智能领域的一个研究热点. 拍卖方法是已有多机器人协作方法中研究得较为深入, 应用得较为普遍的一种方法. Dias 等人^[1,2]将拍卖方法用于多机器人协作探测和协作地图构建; Mataric 等人^[3]将拍卖方法用于推箱子, 清理地面和目标跟踪等多机器人协作任务.

目前拍卖方法主要用于多机器人任务分配中最佳机器人选择的决策问题, 很少有文献对参与拍卖的时机是否恰当这一问题进行讨论. 例如当环境中目标物稠密时, 机器人自己搜寻目标要比接受队友提供的拍卖物更为恰当. 一方面, 队友发现的这个目

标物可能距离较远; 另一方面, 参与拍卖时消耗在通信和计算上的时间可能导致搜集效率较靠自己搜集时更低. 神经生理学家 Damasio^[4]研究发现, 人脑中控制情感的部分影响着人的决策能力. 近年来, 许多学者已开始将心理学概念应用于多机器人协作领域. Murphy 等人^[5]构建情绪认知模型来打破发生在多机器人协作任务中由于循环依赖现象引起的死锁状态. 丁滢颖等人^[6]将心理学中的“个性”概念用于多机器人协作, 以解决冲突消解问题. Parker^[7]提出了一种焦躁模型, 当机器人等待队友时间过长时, 会变得“焦躁”, 该情绪促使其不再继续等待, 而是取代队友的任务. 该模型有效地解决了多机器人任务“再分配”问题, 并避免了“任务死锁”现象的产生.

收稿日期: 2007-02-28; 修回日期: 2007-05-29.

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA04Z245); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IR T0423).

作者简介: 姜健(1976—), 男, 浙江瑞安人, 博士生, 从事多机器人协作的研究; 赵杰(1968—), 男, 河北卢龙人, 教授, 博士生导师, 从事多机器人协作、多传感器集成及控制的研究.

本文将焦虑这一心理学概念引入多机器人搜集任务的协作策略研究中,提出了基于焦虑/拍卖的协作搜集方法.当机器人对独立寻找目标物不自信时,其焦虑程度增加,机器人会对队友提供的帮助更加依赖,更倾向于接受队友提出的拍卖邀请.本文对该方法进行了多机器人协作搜集任务实验,实验结果表明,该方法可有效地提高多机器人协作搜集任务的执行效率.

2 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. Mataric^[8]和 Balch^[9]等研究了机器人数量等因素对搜集任务效率的影响,然而并没有针对这些影响因素提出提高搜集效率的策略.

表1所示各项的不同组合为不同搜集任务类型.如 (a) + (a) + (a) + (a) 情况称为基本搜集^[8], (b) + (a) + (a) + (a) 称为多样化搜集^[9].本文研究的多机器人搜集类型为 (b) + (b) + (a) + (b), 机器人尽量多地搜集自己负载范围内的多种类型目标物,再回到基地区.在能量耗尽之前,机器人可从基地区再次回到搜索区进行搜集.环境中不存在单个机器人无法拿动的目标物.

表1 多机器人搜集任务分类

类型	由左到右为复杂性增加方向	
(a) 只有一种目标物	(a) 有多种目标物	(b) 有多种目标物
(a) 每次机器人只取回一个目标物	(b) 每次机器人取回多个目标物	(b) 每次机器人取回多个目标物
(a) 不存在单个机器人无法拿动的目标物	(b) 存在单个机器人无法拿动的目标物	(b) 存在单个机器人无法拿动的目标物
(a) 每个机器人只进行一次搜集	(b) 能量允许情况下,机器人可循环搜集	(b) 能量允许情况下,机器人可循环搜集

3 基于拍卖的多机器人协作

3.1 拍卖的基本步骤

拍卖是一种适合于多机器人动态任务分配的多机器人协作方法.多机器人搜集任务中的动态任务即是机器人随机发现的目标物.发现目标物并提出拍卖邀请的机器人称为拍卖机器人,同意参与拍卖并进行投标的机器人称为投标机器人.一轮拍卖的具体步骤如下:

Step1: 任务声明.拍卖机器人通过广播方式发布一个关于任务的声明,信息由该目标的重量和位置组成.收到广播消息的机器人采用下文所述基于焦虑度的方法决定是否参与拍卖,同意参与拍卖的

机器人将成为投标机器人.

Step2: 投标.每个投标机器人计算自己的投标值并进行广播.其中只有拍卖机器人存储并处理所有投标机器人的投标信息,投标机器人收到其他投标机器人的投标信息后并不存储和处理.

Step3: 标的评估.拍卖机器人将各投标机器人的投标值进行比较,确定最终中标者.

3.2 投标值的计算方法

当某机器人发现一个自己不需要而队友可能需要的目标物时,发出拍卖邀请.投标机器人投标值的计算分为收入值(t_{rev})和消耗值(t_{cost})两部分,分别用下式进行计算:

$$t_{rev} = \frac{1}{\sqrt{N - F} + \epsilon}, \quad (1)$$

$$t_{cost} = L. \quad (2)$$

其中: N 为某投标机器人的载荷余量; F 为拍卖机器人发现的目标物的重量; ϵ 为一个小正数,其作用是保证最大收入值(t_{rev})为的倒数,而不是无穷大; L 为某投标机器人与拍卖机器人发现的目标物之间的距离; ϵ 为一个正常数.

设在第 k 次拍卖中,所有投标机器人组成的集合为

$$R = I \cup \bar{I}. \quad (3)$$

其中

$$I = \{i \mid N_i - F_k > 0\}, \quad (4)$$

$$\bar{I} = \{i \mid N_i - F_k < 0\}. \quad (5)$$

这里: N_i 为投标机器人 i 的载荷余量, F_k 为第 k 次拍卖的目标物的重量.集合 R 中的机器人按照如下规则进行竞拍:

- 1) 集合 \bar{I} 中的投标机器人放弃此次投标行为;
- 2) 集合 I 中的投标机器人 t_{rev} 最大的机器人 i^* 获得标的,即

$$i^* = \arg \max_i \left(\frac{1}{\sqrt{N_i - F_k}} \right); \quad (6)$$

- 3) 当出现两个或两个以上投标机器人具有相同的 t_{rev} 最高值时,则比较它们的 t_{cost} 值, t_{cost} 值最小的投标者获得标的.在此,称基于 t_{rev} 值的竞拍为基于 P 值竞拍,称基于 t_{cost} 值的竞拍为基于 C 值的竞拍.

4 基于焦虑/拍卖方法的多机器人协作

4.1 焦虑度的基本思想

上文所述拍卖的基本步骤中,位于拍卖机器人通信范围内的机器人要对是否参与投标进行自我判断.目前已有文献中很少考虑参与拍卖时机是否适当的问题.本文提出了机器人以焦虑程度为标准决定是否成为投标机器人的方法.根据心理学原理^[10],

焦虑是指个体由于不能达到目标,导致自信心受挫,形成一种担忧和焦急的情绪状态.本文所提的焦虑量指机器人对环境、队友及自身的情况进行评价产生的焦虑程度的量化结果.而焦虑度是机器人当前焦虑量与一个基准焦虑量的比值.

机器人在响应队友的拍卖邀请之前,应先对包括环境、自身及队友的情况进行判断,形成一定的情绪量;然后用基于对客观现实判断产生的主观反应来决定是否成为投标机器人.这样做是因为机器人在目标物很多时,即使不响应队友的拍卖邀请,自己也可能很容易找到需要的目标物,此时“理性”机器人的焦虑度应该很低,可将没有必要的投标行为在开始前就取消,从而避免了资源的浪费.

4.2 焦虑度的计算

在搜集任务中,机器人的焦虑程度主要是由对自身剩余能量和对目标物稠密程度两方面的判断决定的.用以衡量 t 时刻机器人焦虑程度的焦虑量可表示为

$$A(t) = \frac{1}{(W_0 - W_t) V_t} \quad (7)$$

其中: W_0 为机器人初始能量, W_t 为 t 时刻已消耗的能量, $W_0 - W_t$ 为机器人的剩余能量.焦虑量的计算可采用文献[11]中较为精确的方法,本文则采用一种简化的方法,即用降到临界电压之前机器人左右轮转数的和作为 W_0 的估算值,用 t 时刻机器人左右轮转数的和作为 W_t 的估算值. V_t 是 t 时刻机器人系统的搜集速率,用以衡量当前目标物的稠密程度.当 V_t 较大时,说明目标物分布稠密;否则,说明目标物分布稀疏.

$$V_t = \frac{dN}{dt} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^r N_i \quad (8)$$

其中: r 为所有参与搜集的机器人的总数, N_i 为第 i 个机器人在 t 时刻之前搜集到目标物的数量, T 为整个机器人系统从开始搜集到 t 时刻所经历的时间跨度.

将式(8)代入(7)得

$$A(t) = \frac{T}{(W_0 - W_t) \sum_{i=1}^r N_i} \quad (9)$$

即为焦虑量的计算公式.

为更加方便直观地衡量机器人的焦虑程度,本文引入焦虑度的概念,即

$$a(t) = \frac{A(t)}{A_c} \quad (10)$$

其中 A_c 为基准焦虑量,是规定的一个机器人处于焦虑程度最高状态下的焦虑量取值,即

$$A_c = \frac{1}{W_{\min} V_t} \quad (11)$$

这里: W_{\min} 为剩余能量最小允许值,低于此值时机器人必须结束当前任务进行充电; V_t 为目标物最稀疏状态下整个机器人系统的搜集速率经验取值.

将式(9)和(11)代入(10),得到焦虑度的计算公式为

$$a(t) = \frac{T \cdot W_{\min} V_t}{(W_0 - W_t) \sum_{i=1}^r N_i} \quad (12)$$

式(12)计算得到的焦虑度是 t 时刻机器人的焦虑量与基准焦虑量的比值,是一个介于 0 和 1 之间的百分比.由于 V_t 是一个经验取值,为防止因取值不当而造成 $a(t)$ 的计算值超过 1,令 $a(t)$ 满足

$$a(t) = \begin{cases} A(t)/A_c, & A(t) < A_c; \\ 1, & A(t) \geq A_c. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)的含义为:如果目标物比预设最稀疏的情况还要差而可能导致实际焦虑量比基准焦虑量还要高时,焦虑度限定为 1.这样满足 $a(t) \in [0, 1]$,设 $0 < \alpha < \beta < 1$,使得机器人根据焦虑度 $a(t)$ 的取值,按下式进行判断:

$$B_i = \begin{cases} 1, & a(t) \in [0, \alpha); \\ \{B_i | P(B_i = 1) = 1 - a(t)\}, & a(t) \in [\alpha, \beta); \\ 0, & a(t) \in [\beta, 1]. \end{cases} \quad (14)$$

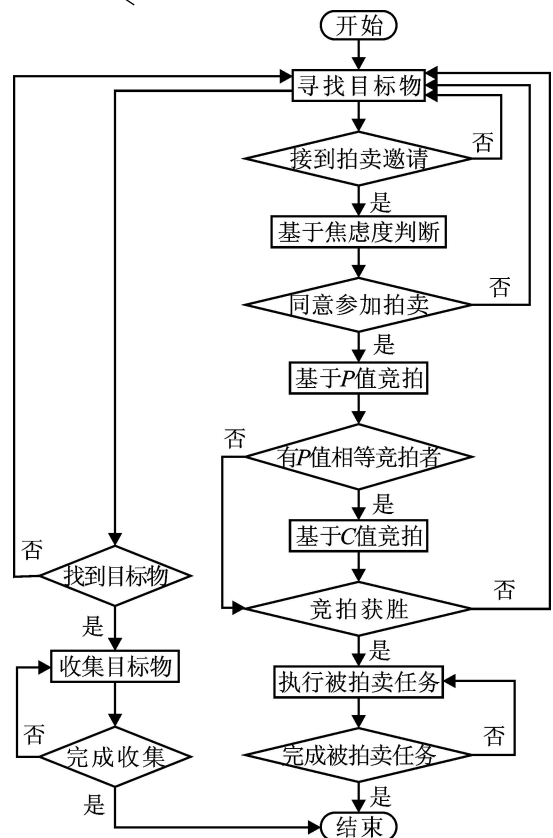


图 1 基于焦虑 / 拍卖方法的搜集过程

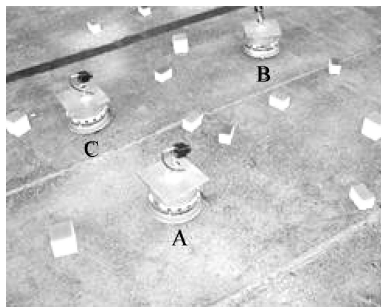
其中: $B_i = 1$ 表示机器人*i*拒绝队友的拍卖邀请, $B_i = 0$ 表示接受队友的拍卖邀请, $P(B = 1)$ 表示机器人拒绝队友拍卖邀请的概率.

4.3 焦虑/拍卖方法

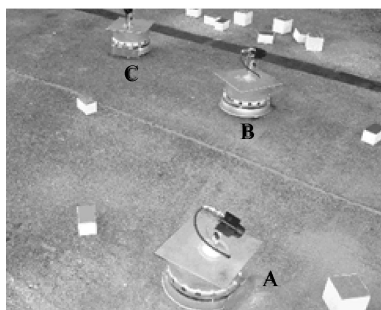
将焦虑概念和焦虑度的计算方法引入基于拍卖的多机器人协作方法,形成了一种基于焦虑/拍卖的多机器人协作搜集方法.图1为某机器人按照该方法进行一个目标物搜集的过程.在剩余能量允许的情况下,该过程持续多次,直到达到机器人负载极限而回到基地区为止.该过程为一次完整的搜集过程.机器人执行一次完整的搜集任务后要返回搜集区,直到某一规定时间整个多机器人系统停止搜集任务为止.

5 实验及结果分析

图2所示的实验环境中,一条黑线将4 m × 5 m的有界区域分割为搜集区和基地区.由3个移动机器人组成的多机器人实验系统的任务是,在有限的时间内将尽量多的目标物从搜集区搜集到基地区.搜集任务开始时,3种不同颜色的目标物被随机放置在搜集区,目标物的颜色代表其重量:分别代表1.5 kg, 1 kg和0.5 kg.由于机器人的执行机构限制,在实验过程中,机器人确定要搜集某个目标物后,由人代替它将该目标物移到基地区,每次搜集满2.5 kg,机器人回到搜集区,完成一次搜集.机器人电池能量高于剩余能量最小允许值时,再次返回搜集区进行搜集.



(a) 目标物稠密状态



(b) 目标物稀疏状态

图2 多机器人搜集实验场景图

设置基于焦虑/拍卖的搜集方法中的参数, $\alpha_1 = 0.3$, $\alpha_2 = 0.7$.即焦虑度 $(t) = [0, 0.3)$ 时,机器人认为目标物分布稠密,应拒绝队友的拍卖邀请;焦虑度 $(t) = [0.7, 1]$ 时,机器人认为目标物分布稀疏,应接受队友的拍卖邀请;在焦虑度 $(t) = [0.3, 0.7)$ 时,机器人按照 $1 - (t)$ 的概率拒绝队友的拍卖邀请.如图2(a)所示,机器人A发现一个1 kg的物块,发出拍卖邀请;机器人B和C通过焦虑度计算,分别得到 $B_B(t) = 0.2$ 和 $c(t) = 0.25$,都决定不接受此次拍卖邀请.如图2(b)所示,机器人A发现一个1.5 kg物块,发出拍卖邀请;机器人B和机器人C通过焦虑度计算,分别得到 $B_B(t) = 0.8$ 和 $c(t) = 0.75$,都决定接受此次拍卖邀请,而进入拍卖流程.图2(a)为搜集任务的初期,此时目标物较多,机器人倾向于拒绝队友的拍卖邀请是合理的;图2(b)为搜集任务的后期,此时机器已难以找到目标物,倾向于接受队友的拍卖邀请,充分利用机器人间的协作,可以提高系统搜集效率,也是合理的.

分别采用单纯基于拍卖的搜集策略和本文采用的基于焦虑/拍卖的搜集策略进行20次实验,记录下30 min内多机器人所搜集到的目标物数量的平均数据,如图3所示.横坐标为初始分布的目标物的数量,纵坐标为在规定时间内多机器人系统搜集的目标物数量.由图3可知,在目标物较多时,采用单纯基于拍卖的搜集策略搜集到的目标物的增长速率变缓,而采用基于焦虑/拍卖的搜集策略搜集到的目标物的增长速率没有变缓.这是由于在目标物分布较稠密时,采用单纯的基于拍卖的方法使无益的拍卖行为增多,从而导致搜集效率降低.而采用本文方法由于引入了焦虑概念,使得机器人能根据环境的特点,灵活地决定是否接受队友的拍卖邀请,即理性地判断进行机器人间的协作是否有益,从而保证了系统整体性能的高效.

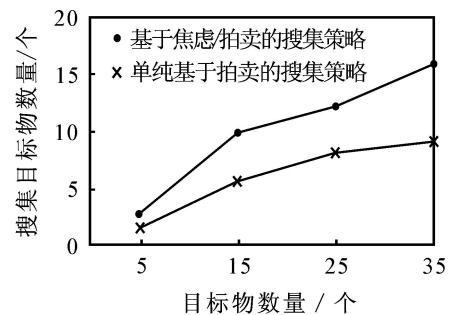


图3 不同方法的觅食效率比较

6 结论

本文将心理学的焦虑概念引入经济学的拍卖方法中,提出一种基于焦虑/拍卖的多机器人协作搜集

方法.通过一类搜集任务的实验,验证了该方法能提高多机器人系统整体搜集效率.通过分析可得出以下结论:

1) 针对目标物分布稀疏程度这一搜集任务影响因素,应采取相应的多机器人协作策略.目标物分布较为稀疏时,机器人接受队友提出的拍卖邀请,进行协作的主动性提高;反之主动性降低.

2) 基于 P 值的竞拍是确保投标机器人中获胜者获得该目标物比其他投标机器人更有意义.基于 C 值的竞拍是确保在 P 值相同时,协作难度最小的投标机器人在竞拍中获胜.基于焦虑度 (t) 的判断是确保协作(接收拍卖机器人的拍卖邀请)的发生时机更加合理.

3) 增加有益合作,减少无益合作,是提高多机器人协作搜集任务的有效途径.

在本文研究的基础上,下一步将分析和验证本文方法在其他多机器人协作任务领域的应用可行性.

参考文献(References)

[1] Dias M B, Zlot R, Kalra N, et al. Market-based multirobot coordination: A survey and analysis[J]. Proc of the IEEE, 2006, 94(7) : 1257-1270.

[2] Thayer S, Digney B, Dias M B, et al. Distributed robotic mapping of extreme environments[C]. Proc of SPIE: Mobile Robots XV and Telemanipulator and Telepresence Technologies VII. Boston: SPIE Press, 2000: 84-95.

[3] Gerkey B P, Mataric M J. Sold: Auction methods for multirobot coordination [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, 18(5) : 758-768.

[4] Antonio R Damasio. Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain[M]. New York: Grosset Putnam Press, 1994.

[5] Murphy R R, Lisetti C L, Tardif R, et al. Emotion-based control of cooperating heterogeneous mobile robots[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, 18(5) : 744-757.

[6] Ding Y Y, He Y, Jiang J P. Self-organizing multi-robot system based on personality evolution[C]. Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Hammat: IEEE Press, 2002: 6-9.

[7] Parker L E. Alliance: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(2) : 220-240.

[8] Schneider F M, Mataric M J. Territorial multi-robot task division [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(5) : 815-822.

[9] Tucker B. Behavioral diversity in learning robot teams [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1998.

[10] James W. The principles of psychology [M]. Beijing: China City Publishing House, 2003.

[11] Dressler F, Fuchs G. Energy-aware operation and task allocation of autonomous robots[C]. Proc of the 50th Int Workshop on Robot Motion and Control. Dymaczewo: IEEE Press, 2005: 163-168.

下 期 要 目

模糊多准则决策方法研究综述 王坚强

一种工业过程稳态优化控制算法 徐恭贤, 邵 诚

非完整移动机器人路径跟踪的模糊控制 邹细勇, 等

一类线性时变系统组合自适应迭代学习辨识 郭 毓, 等

使用超椭球参数化坐标的支持向量机 张钦礼, 等

随机需求下提前期可控的生产-库存联合优化模型研究 夏海洋, 黄培清

变异协同进化的免疫克隆算法 刘丽珏, 蔡自兴

收益与进化阶段强相关的灰色进化博弈模型研究 阮爱清, 等

基于一类局部固定核的支持向量回归建模 张军峰, 胡寿松

基于幂次趋近律的一类离散时间系统的变结构控制 米 阳, 等