

文章编号: 1002-0446(2003)05-0414-05

基于蚁群算法的多机器人协作策略*

丁滢颖, 何衍, 蒋静坪

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 蚁群算法是一种通过对蚂蚁社会长期观察得来的优化算法. 它建立在蚁群的一种叫“外激励”的联系方式上, 对解决一些分布式控制问题和复杂的优化问题十分有效. 将“外激励”这一概念引入多机器人系统中, 设计了一种基于蚁群算法的多机器人协作策略. 这一策略可以解决多机器人系统在未知环境工作时所面临的一项艰巨的任务: 自主协作规划. 定义了多机器人系统在未知环境中可能存在的一个问题: 任务死锁; 将衰减因子引入协作算法, 以防止任务死锁的发生; 通过仿真验证了算法的性能.

关键词: 多机器人; 协作; 蚁群算法; 任务死锁

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

MULTI-ROBOT COOPERATION METHOD BASED ON THE ANT ALGORITHM

DING Ying-ying, HE Yan, JIANG Jing-ping

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Ant Algorithm is an optimization algorithm that gained by observing the real ant colonies, and it is very useful in solving difficult optimization and distributed control problems. The algorithm is modeled on a concept called “stigmergy” of the ant society. One of the most important problems to the multi-robot system is that, when the system is working in an unknown environment, it has to decide which tasks must be done by cooperation of several robots. In this paper, the concept “stigmergy” is introduced to the multi-robot system, and a self-organization cooperation method enabling different number of robots to cooperate on a task according to the difficulty of it is designed. In addition, the definition of the “Task Deadlock” is given, and an adaptive attenuation factor to eliminate task deadlock is introduced in the cooperation algorithm. Simulation is done to test the algorithm.

Keywords: multi-robot system; cooperation; ant algorithm; task deadlock

1 引言 (Introduction)

多机器人系统具有代替人类在未知领域工作的潜力. 因此, 它也就面临着在未知环境中自主规划任务进行协作的挑战.

多机器人系统的一个最为显著的优点就是可以通过多个机器人协作来扩展单个机器人的功能. 许多研究者进行了这一方面的研究工作. Lynne Parker 设计的 ALLIANCE 系统中, 通过具有不同功能的机器人的协作, 完成了“清扫”工作^[3]. Maja J. Mataric 等研究了通过区域分工协作以减少多个机器人之间

冲突, 以及利用多个机器人实现多目标观测的问题^[1,2]. Ronald Arkin 和 Tucker Balch 进行了通过多机器人的协作实现机器人编队的研究^[4].

现有的协作方法存在的缺陷在于: 没有赋予多机器人系统在未知环境中的自主协作规划功能, 即由系统自主决定哪些任务需要协作完成, 哪些任务可由单个机器人独立完成. 而在许多情况下, 这一功能是非常必要的, 如月球、火星探测等; 这也是多机器人系统对环境适应性的评判标准之一. 要实现在线实时自协作规划, 就要充分利用机器人在工作过程中通过对不同任务的不断尝试过程中所积累的性

* 基金项目: 国防预研基金资助项目(00J16.6.3JW0401).

收稿日期: 2003-01-25

能评判经验。

1991 年, Dorigo 提出了一种仿生算法: 蚁群算法^[5,6], 通过模拟蚂蚁社会分工与协作的原理进行寻优。在这一思想的启发下, 本文设计了一种基于蚁群算法的多机器人自主协作策略, 通过机器人工作过程中尝试完成不同任务的结果调整与这一任务相对应的“激素”, 从而实现协作。

2 蚁群算法的原理 (Theory of the ant algorithm)

蚁群算法的基础是蚂蚁、蜜蜂等昆虫通过一种“外激励”的间接联系方式来协调群体之间的运动^[6]。蚂蚁在运动与工作中, 如搬运食物的途中, 会在自己所经过的路径上留下一种激素, 而这种激素会影响到同一蚁群中其它蚂蚁的运动。这种激素的气息越强, 吸引其它蚂蚁到这一路径上的可能就越大。下面通过 n 个城市的 TSP 问题来介绍蚁群算法的模型。

在用一群智能蚁解决 n 个城市 TSP 问题时, 与一般情况不同的是它们运动的同时还在自己走过的路径上遗留一定的激素, 所留激素的数量与它们通过这一路径的时间成正比。而在选择下一条路径时, 则根据各条备选路径上的激素的浓度进行选择。 t 时刻, 处于城市 i 的智能蚁 k 选择下一步到达城市 j 的概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in J_k(i)} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta} & \text{if } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{if } j \notin J_k(i) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $J_k(i)$ 表示处于城市 i 的智能蚁 k 下一步所有可选路径的集合, $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻连接节点 i 和 j 的路径上的激素量; η_{ij} 为由城市 i 转移到城市 j 的启发信息, 该启发信息根据具体问题给出。如可令 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, d_{ij} 表示城市 i, j 之间的距离。 α, β 是用来调整 $\tau_{ij}(t)$ 和 η_{ij} 对决策影响程度的参数。

此外, 蚁群算法中常常引入蒸发因子 ρ , 以消除开始状态的影响。因为, 开始的状态是随机给出的, 开始时的激素轨迹也带有很大的随机性, 并不具有指导性的意义。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \sum_{i=1}^m \tau_{ij}(t) \quad (2)$$

其中, $\sum_{i=1}^m \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t)$ 是 m 个蚂蚁在时间 t 到 $(t+n)$ 内的访问过程中, 在 i 到 j 的路径上

留下的激素总量。

蚁群算法具有灵活性高、鲁棒性强、分布式计算及自组织的特点, 这使它适合于解决自然界中所存在的许多对动态性能和容错性要求较高的场合。

3 基于蚁群算法的多机器人协作策略 (Multi-robot cooperation method based on the ant algorithm)

多机器人系统是一个松散结构的分布式系统, 其优点在于既可独立工作, 又可在需要进行协作。在任务未知的环境中, 确定有哪些任务需要多个机器人协作完成是一个重要而艰巨的问题。受到蚁群算法的启发, 我们想到, 可以将“外激励”的方法引入多机器人系统中, 由机器人在工作过程中赋予不同的任务以不同的激素, 通过对难度较大的工作设置较大的激素浓度, 以吸引其它机器人来进行协作。在这一思想的基础上, 我们设计了基于蚁群算法的多机器人协作策略。

首先介绍采用的通信原理。多机器人系统中常用的局部通信方式有两种。一种是两个机器人之间进行单向或双向通信, 另一种是采用“黑板原理”的通信方式, 即: 系统中每个机器人都以一定的频率将一些和自己相关的简单信息写在“黑板”上一定的数据区域, 同时从“黑板”上的某些数据区读取自己所感兴趣的信息。我们采用“黑板原理”的通信方式, 这一方法具有灵活、鲁棒性强的特点, 不会由于局部的失误影响全局的性能。

设 n 个机器人进入一包含 m 件任务未知区域, 它们开始进行独立的任务搜索, 即各个机器人在空间中随机游荡搜寻需要完成的任务。开始时刻对应于所有任务 $j (j=1, 2, \dots, m)$ 的“激素” τ_j 为零。若机器人 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 发现一件任务 j 时, 它首先尝试着独自完成这一任务。如成功, 机器人 i 得到一个奖励信号; 如不成功, 它则将任务 j 的相关信息 (如位置) 写到“黑板”上, 并将任务 j 对应的“激素”量 τ_j 赋一大于零的值, 于是

$$\tau_j = \Delta \tau > 0$$

同时, 机器人 i 在任务 j 处等待一段时间。

若机器人 i 没有发现任何任务, 处于“空闲”状态 (没有执行具体任务的状态) 时, 它每隔一段时间在“黑板”上的任务相关区进行搜索, 如未发现与某件任务相关的“激素”大于零, 则继续在空间中搜索任务; 若发现有 k 件任务的“激素” $\tau_s (s=1, 2, \dots, k)$ 大于零, 则计算与之相关的概率

$$p_{is} = \frac{(\tau_s)^\alpha}{\sum_{s=1}^k (\tau_s)^\alpha} \quad s = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

机器人在下一步以概率 p_{is} 选择任务 s :

$$P(s = 0 \rightarrow s = 1) = p_{is} \quad (4)$$

若机器人选择执行任务 s , 并且能够胜任, 或者可以与在 s 处等待的其它机器人一起完成任务, 则立刻将黑板上与任务 s 对应的“激素” τ_s 置零, 以免其它机器人受到错误的指导, 仍向 s 所在的区域靠拢, 造成劳力资源的浪费, 并且过多的机器人聚集在同一个区域可能会造成阻塞. 若任务仍然未被完成, τ_s 继续保持大于零. 如果在两个机器人协作的情况下尚不能完成任务, 则将 τ_s 更新为

$$\tau_s = \tau_s + \Delta\tau \quad (5)$$

其中, $\Delta\tau$ 是增加的“激素”浓度. 这样做的目的是加大激素的浓度, 以吸引更多的机器人来进行协作. 这样, 难度越大的任务就会逐渐被赋予越来越大的激素浓度, 从而吸引多个机器人进行协作.

4 采用自适应衰减因子防止任务死锁状态 (Using adaptive attenuation factor to avoid task deadlock)

“死锁”指机器人失去运动可能的状态. 与之相类似, 多机器人系统中, 可能会出现“任务死锁”的情况. 我们首先给出“任务死锁”的定义:

机器人的任务死锁: 机器人的任务死锁是指机器人执着于执行一件自己“力所不及”的任务, 从而丧失了完成其它任务的可能.

根据第三部分的算法, 考虑这样的情况: 在未知环境中, 存在着某一件任务 s , 它的艰巨性很大, 是系统中所有机器人协作也完成不了的. 当一个机器人 i 首先发现这一任务, 并且得出依靠自身力量难以胜任的结论, 这一任务会被赋予一定的“激素” τ_s ; 随后, 另一个机器人 j 受到 τ_s 的吸引, 前来协助机器人 i 完成这一任务, 结果却发现在二者协作的情况下仍然不能完成任务, 于是 τ_s 的值继续增大. 随着 τ_s 的不断增大, 越来越多的机器人受到它的吸引, 前来加入协作, 结果却是导致 τ_s 的进一步加大. 尽管我们设定当机器人在任务 s 处尝试一段时间后, 若发现没有进展就放弃这一选择, 重新根据概率选择需要执行的任务, 但是由于 τ_s 的值足够大, 使得与之对应的 p_{is} 也很大, 因此当机器人放弃任务 s 之后, 很有可能马上又受到任务 s 的吸引, 再次尝试执行这一任务. 这样, 系统中的机器人很可能会全部被聚拢在一件

无法完成的任务旁, 结果使系统丧失了行动能力.

为了防止这样的局面, 我们改进了前一部分的算法, 加入了一个自适应衰减因子, 使机器人具有摆脱任务死锁的能力.

当一个处于空闲状态的机器人发现环境中 s 件任务的“激素”浓度大于零, 分别为 $\tau_s (s = 1, 2, \dots, k)$, 则计算与之相关的概率

$$p_{is} = \frac{(\tau_s)^\alpha}{\sum_{s=1}^k (\tau_s)^\alpha}$$

其中, τ_s 是机器人 i 所感触到的“激素”浓度, 初始化时: $\tau_s = \tau_s$. 机器人在下一步以概率 p_{is} 选择任务 s :

$$P(s = 0 \rightarrow s = 1) = p_{is}$$

经历一段时刻 T 后, 机器人 i 若未能完成任务 s , 则放弃 s , 重新进行选择, 同时引入衰减因子 λ , 修改 τ_s 为

$$\tau_s = \lambda \tau_s \quad (6)$$

$$\lambda = \mu^{select_{is}}, \quad 0 < \mu < 1 \quad (7)$$

μ 为一个小于 1 的常数, $select_{is}$ 为机器人 i 连续选择任务 s 的次数. 可以看出, 当 $select_{is}$ 增大时, λ 减小, τ_s 减小, p_{is} 随之而减小, 这就使得机器人放弃任务 s 而执行其它任务成为可能.

5 仿真 (Simulation)

仿真环境为一 $4 \times 4 \text{ m}^2$ 的房间, 其顶点坐标分别为 $(0, 0)$ 、 $(0, 4)$ 、 $(4, 0)$ 、 $(4, 4) \text{ m}$, 如图 1 所示.

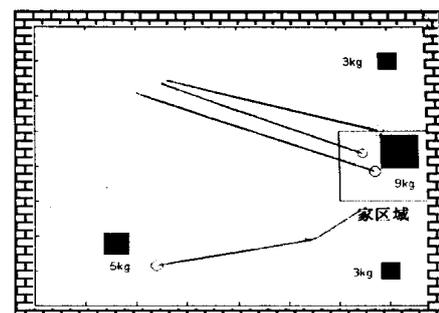


图 1 机器人工作阶段 1

Fig. 1 Robots working period 1

在房间中分布着四个箱子, 质量分别为 3kg, 5kg, 9kg. 有四个机器人参与工作, 它们的目的是在房间中找到这些箱子并将它们搬回“家”(房间右部中间的正方形区域). 可以看出, 至少需要两个机器人协作才能搬运 5kg 的箱子, 而至少三个机器人

协作才能将 9kg 的箱子搬运回家.在开始工作之前,机器人对环境信息一无所知.机器人的速度为:0.2 m/s,载重为:3kg.具有向左、右转弯的功能.机器人的传感器探测距离为 1 m.

图 1 中所示阶段,3 个机器人协同工作搬运一个 9kg 箱子,另一个机器人在搜寻工作.

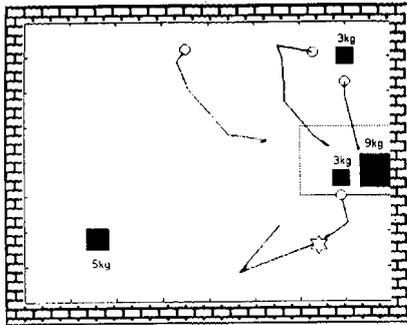


图 2 机器人工作阶段 2
Fig.2 Robots working period 2

图 2 中,在右下角,一个机器人在运动过程中找到一个 3kg 的箱子,并将其搬运回家;右上角,两个机器人在运动过程中都发现了一个 3kg 的箱子,并向它靠拢,准备搬运它;中部上方,一个机器人在随机游荡,寻找任务.

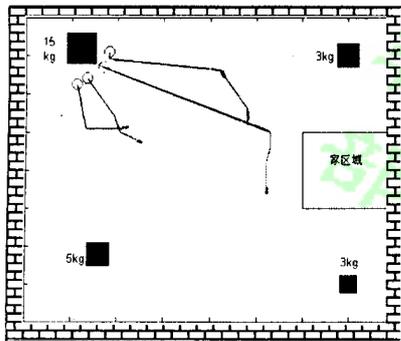


图 3 机器人的任务死锁状态
Fig.3 Situation of task deadlock

- 设各个机器人所具有的能力为:
- 知道自己当前的位置 $X_i = (x_i, y_i)$;
- 知道“家”的坐标范围;
- 可以感知测量范围内的机器人或障碍物与自己的距离;
- 可以探测出箱子的存在并能将其抓起;
- 具有局部通讯功能,采用“黑板原理”的通信方式.

采用行为主义的方法^[7],每个机器人所具有的基本行为有:

避障:当机器人视野中出现障碍物时,会随机地转动一个角度以绕开障碍;

游荡:机器人在每一步以一定的概率随机决定是转一定的方向还是沿当前朝向前进;

回家:机器人沿当前位置与家区域之间的最短路径向家运动.

实验开始时,四个机器人被随机的赋予一个初始坐标,之后,它们在房间中随机游荡,当它们的传感器探测范围内出现箱子时,它们就向之靠拢,尝试独立或与已经等候在那里的机器人协作共同将箱子推回家中.若成功,则将与这一箱子对应的激素值置零;反之,若不成功,则根据协作的机器人数量来修改激素值.

首先采用不带衰减因子的策略,进行 100 次实验,每次实验中机器人的工作时间为 30 分钟.在全部的 100 次实验中机器人在规定时间内将所有的箱子搬运回家,占实验次数的 100%.这说明算法可以成功地多机器人系统实现协作规划.

此后我们改变了箱子的重量,用一个 15kg 的箱子取代了 9kg 的箱子.可以看出,四个机器人同时协作也不能将 15kg 的箱子搬运回家.但却可以将除去 15kg 箱子之外的其它箱子搬回.同样进行 100 次实验,仍然使用不带有衰减因子的协作策略.只有其中的 28 次实验,机器人将除去 15kg 箱子之外的其它三个箱子都搬运回家.有 26 次发生了任务死锁,即在其它箱子还没有搬运完时,四个机器人都被吸引到了 15kg 的箱子处,从而使系统失去了继续工作的能力.这说明任务死锁这一现象在实际情况中很有可能发生,并且会严重的破坏系统的性能.

换用带有衰减因子的策略,衰减因子为 0.8,同样进行 100 次实验.在所有的实验中机器人在 30 分钟内将除去 15kg 箱子的所有其它箱子搬运回家,占全部实验次数的 100%;没有发生任务死锁.

通过仿真可以看到,基于蚁群算法的多机器人协作策略可以帮助多机器人系统在未知环境中进行协作规划;而衰减因子的引入有效的防止了任务死锁状态的出现.

6 结论 (Conclusion)

本文在蚁群算法的思想基础上设计了一种多机器人协作策略,使得多机器人系统可以在未知环境中自主进行协作规划;给出了任务死锁的定义,并通

过在协作算法中引入衰减因子防止任务死锁.在未来的工作中,我们希望继续讨论更加灵活的修改“激素”值的方法,根据尝试一件任务的机器人的能力大小赋予这一任务不同的激素值;以及根据不同任务的激素量及各个机器人的能力大小进行协作规划

参考文献 (References)

- [1] Fontan M S, Mataric M J. Territorial multi-robot task division[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, **14**(5): 815 - 822.
- [2] Werger B, Mataric M J. Broadcast of local eligibility for multi-target observation[A]. Proceedings, 5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS)[C]. Knoxville, TN. 2000, Oct 4 - 6, 347 - 356.
- [3] Parker L E. Heterogeneous multi-robot cooperation[D]. PhD thesis, MIT. Department of Electrical Engineering and Computer Science, 1994.
- [4] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, **14**(6), 926 - 939.
- [5] C. A. Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[A]. Proc1st European Conf Artificial Life[C]. Pans, France:Elsevier, 1991. 134 - 142.
- [6] Dorigo M, Bonabeaub E, Theraulaz G. Ant algorithms and stigmergy[A]. Future Generation Computer Systems 2000[C]. 16, 851 - 871.
- [7] R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986, **RA**2(1): 14.
- (上接第 413 页)
- [3] Kang S B, Ikeuchi K. Toward automatic robot instruction from perception mapping human grasps to manipulator grasps[J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1997, **13**(1): 81 - 95.
- [4] Haruhisa Kawasaki, *et al.* Virtual teaching based on hand manipulability for multi-fingered robots[A]. In: Proc. of ICRA[C]. 2001. 1388 - 1393.
- [5] Ammon K, Wright, *et al.* Kinematic mapping between the EXOS handmaster exoskeleton and the UTAH/ MIT dextrous hand[A]. In: Proc. of Systems Engineering[C]. 1990. 101 - 104.
- [6] Robert N, Rohling and John M. Hollerbach, Optimized fingertip mapping for teleoperation of dextrous robot hands[A]. In: Proc. of ICRA[C]. 1993. 769 - 775.
- [7] Weston B, Griffin, *et al.* Calibration and mapping of a human hand for dextrous telemanipulation[A]. In: Proc. of ASME IMECE DSG-Symposium on Haptic Interfaces[C]. 2000. 1 - 8.
- [8] Jiting Li, Yuru Zhang, Qixian Zhang. Grasp identification of human hands and grasp planning of dextrous hands[A]. Chinese J. of Robotics[C]. 2002. 11
- [9] Salisbury J K, Craig J J. Articulated hands, force control and kinematic issues[J]. Int. J. Robot. 1982, **1**(1).
- [10] Yoshikawa T. Manipulability of robotic mechanisms[J]. Int. J. Robot. Res. 1985, **4**(2): 3 - 9.
- [11] Bicchi A, Melchiorri C, Balluchi D. On the mobility and manipulability of general multiple limb robots[J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, 1995, **11**(2): 215 - 228.

作者简介:

丁滢颖 (1976-),女,博士研究生,研究领域:多机器人协调.

何衍 (1973-),男,博士,讲师,研究领域:多机器人协调,多传感器目标跟踪.

蒋静坪 (1935-),男,博士生导师,研究领域:智能控制,计算机实时控制技术,机器人.

作者简介:

李继婷 (1967-),女,硕士.研究领域:机械设计及理论,机器人灵巧手.