

文章编号: 1002-0446(2002)06-0540-05

# 分布式多移动机器人系统中 基于局部感知的排队协调策略研究\*

王 坤 陈卫东

(上海交通大学自动化研究所 上海 200030)

**摘 要:** 多移动机器人系统中,随着机器人数目的增加,系统中冲突呈指数级增加,甚至发生死锁.本文提出一种基于局部感知的排队协调策略,作为机器人之间的协调机制.针对典型的多机器人群体觅食任务,以计算机仿真为手段,以冲突和时间作为性能指标,进行了实验研究,结果表明该算法能显著减少冲突、避免死锁,提高系统整体性能,从而体现多机器人系统的优越性.

**关键词:** 多移动机器人; 排队; 局部感知; 冲突; 死锁

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## QUEUE COORDINATION STRATEGY BASED ON LOCAL SENSING IN DISTRIBUTED MULTIPLE MOBILE ROBOT SYSTEMS

WANG Shen CHEN Weidong

(Inst. of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** In multiple mobile robot systems, interference will increase exponentially with the increase of the number of robots, even deadlock will occur. This paper proposes a queue coordination strategy based on local sensing. Experiments are done to verify the efficiency of the strategy by simulation, in the task of foraging. The result shows that the strategy can decrease interferences, avoid deadlocks, and improve the whole performance remarkably.

**Keywords:** multiple mobile robots, queue, local sensing, interference, deadlock

### 1 引言( Introduction)

分布式多移动机器人系统是典型的多智能体系统,在非结构化的环境中,如何有效地组织和协调多个智能体完成复杂任务,已成为人工智能和机器人学的研究热点.多机器人系统的建立,一方面给系统带来了突出的鲁棒性、灵活性、容错性和并行性;但另一方面,随着机器人数目的增加,受系统中有限资源的制约,机器人间的冲突呈指数级增长,严重影响系统的整体性能,甚至发生死锁,致使整个系统瘫痪.因此,多移动机器人系统的冲突消解、死锁问题的解决引起了众多研究者的关注.

多移动机器人系统运行过程中会发生多种形式的冲突,本质上都是对系统内有限资源的竞争,其中

最典型的形式就是机器人之间的碰撞.这种冲突、碰撞达到极端的情况,就表现为一种死锁的形式——多个机器人之间完全僵持的局面.如图 1 所示的死锁是多机器人群体觅食任务中,由于多个机器人对某区域空间使用权的竞争造成的.多数复杂的协商策略需要机器人之间大量的无线通信,对机器人硬件要求很高,且容易受到外界环境的干扰;同时大量的计算往往无法满足多移动机器人系统任务实时性较高的要求.本文以多机器人群体觅食任务为研究对象,提出一种基于局部感知的排队协调规则,机器人通过传感器独立地获得环境的局部信息,依据简单的规则做出行为决策.通过仿真实验证明,本算法使冲突显著减少,并基本上避免了此类死锁的产生.

\* 基金项目: 国家 863 计划机器人技术主题(2001AA422140, 2001AA422200)与国家自然科学基金(60105005)和资助项目.

收稿日期: 2002- 07- 03

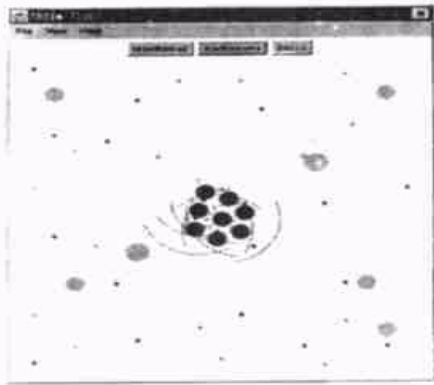


图 1 “死锁”示意图

Fig. 1 Sketch map of “deadlock”

## 2 多机器人群体觅食任务(Forage task of multiple robots)

多机器人群体觅食行为是多机器人研究领域的一个典型任务,是真实世界中的采矿、垃圾收集、爆炸物处理、灾难救援等危险环境下的应用的缩影.任务的解决可以从生物学、人类社会科学中得到启示.

在机器人原始行为下,描述任务过程的有限状态机(FSA, Finite State Automata)由三个行为状态构成:漫游、拾取、递送<sup>[1]</sup>.而完整的觅食行为可以分解为四类基本行为:

- 1) avoid 躲避行为类,如:躲避静态障碍、躲避机器人、躲避基地、躲避已递送目标.
- 2) move-to 移动行为类,如:向目标移动、向基地移动、停留在基地区域.
- 3) swirl 绕行行为类,如:绕过障碍物奔向目标、绕过障碍物奔向基地、绕过障碍物随机走动.
- 4) noise 扰动行为类.

任务执行时,机器人在环境中漫游;当发现目标物后,转换到拾取状态,向目标移动,当接近到一定范围后,进行抓取;抓住目标物后,就迁移到递送状态.在全部过程中机器人同时需要躲避障碍物.

对任务进行分析及实验研究后可以发现,任务中冲突和死锁主要发生在基地附近.直接原因是多个机器人在基地附近都“贪婪”的按照各自的目标行动,相互之间缺乏有效地协调措施,其本质是对基地有限空间使用权的竞争.

以往已有一些针对多机器人群体觅食任务的研究工作,Goldberg 和 Mataric<sup>[2]</sup>提出以空间冲突作为评价觅食机器人团队的性能指标,并提出了“Pack”和“Caste”两种仲裁机制,来消解冲突.“Pack”仲裁在系统中引入了优先级,而“Caste”仲裁则在空间上对

机器人进行了分工.仿真结果表明采用“Pack”策略时冲突明显减少,但任务完成效率的下降让人无法忍受;而采用“Caste”策略,系统无论在冲突或是收集效率上都不尽人意.

Fonton 和 Mataric<sup>[3]</sup>研究了一种地域型(territorial)异构觅食策略,其中智能体间的搜索区域被等分.机器人把收集到的目标物从一个区域传递到另一个区域,而最后的一个智能体完成送回基地的任务.实验结果表明如果机器人的数量增加到一定程度,冲突会显著增加.

[1]中针对多机器人群体觅食任务,以计算机仿真为手段,通过对机器人之间冲突的分析,揭示了这类系统的典型特征.提出了一种基于局部广播式通讯的消解冲突策略,仿真结果表明了其减少系统冲突的有效性.但系统性能仍在超过 6 个机器人后开始下降.

因此,仍需要进一步的研究,找到一种更有效的协调策略,在尽量避免死锁,减少冲突的同时,使系统的性能有所提高,真正体现多机器人系统的优越性.本文就以系统中的冲突以及任务完成时间为性能指标,进行实验研究.

## 3 基于局部感知的排队协调策略(Queue coordination strategy based on local sensing)

多机器人系统中机器人间的交互可分为三类<sup>[4]</sup>:借助环境的交互(隐式交互 Stigmergy),基于感知的交互,和基于通信的交互. Arkin 和 Balch<sup>[5]</sup>针对多机器人群体觅食任务研究了交互对多机器人觅食团队性能的影响,得出几点主要结论——通信能显著改善无隐式交互任务的性能,而更复杂的交互策略不能比简单交互提供更多的好处,甚至根本没有改善.

在多机器人群体觅食任务中,有的机器人在递送后,需要离开基地继续寻找目标物,需要使用该区域的空间;而有的机器人拾取目标物后,需要到基地递送,也需要使用该区域空间.双方都“贪婪”、“自私”的对基地有限空间的使用权进行争夺,其结果就是造成大量的冲突,乃至发生死锁.

从蚂蚁搬家的行为和人类社会的基本行为规则——排队中得到启示,过分“贪婪”、“自私”的行为会使系统的整体性能下降,整个系统处于瘫痪;而“谦让”、“先来后到”的原则能有效的协调个体之间的关系,从而使整体利益最大化,使每个个体的利益最大化.因此,本文提出一种基于局部感知的排队协调策

略作为机器人之间的协调机制,缓解机器人之间的冲突,避免此类死锁的发生,使系统性能在冲突数量和任务完成时间两方面都有提高.算法不需要系统的全局信息,交互信息来源于机器人利用视觉传感器观察到的局部感知信息,属于基于感知的交互方式.

协调机制的基本思路是为机器人增加一种“排队”状态.机器人在递送状态下,判断视觉观察信息中的障碍物和队友.如果是队友,根据队友、自身和基地区三者的相对位置关系,以及队友所处的状态,来判断是否应该跟随队友来行动.当可见的队友也在递送,且比自己离基地区更进,则跟随队友前进,同时根据与队友间的距离进行速度控制.这样,“排队”机制就形成了.机器人有一定的视觉能力,排队的机制使得在相应的空间范围内,机器人会根据环境信息动态的形成一条队列,即使有多个机器人的存在,也不会造成对空间使用权的恶性竞争,而是排队依次递送,轮流占有基地区空间的使用权,使递送完毕的机器人可以有足够的空间离开,减少了同一时间内占有基地区的机器人数目,避免了对基地区空间的阻塞.而递送完毕的机器人高速离开基地区,这使基地区空间的使用权尽可能的被有效利用.

具体协调机制如下:

(1) 机器人拣到目标物后,变迁到“递送”状态,向基地区移动.

(2) 在递送过程中,机器人从视觉观察信息中提取、判断队友信息.当队友处于“递送”或“排队”状态,且位置比自己离基地区更进,则变迁到“排队”状态,跟随队友前进;否则,保持“递送”状态.

(3) 在“排队”状态下,机器人计算自己和被跟随者之间的距离,以正比关系来控制自身的前进速度.计算公式为

$$V = CV(d - t)$$

其中  $V$  表示机器人的速度,  $CV$  表示速度常量,  $d$  表示机器人和被跟随者之间的距离,  $t$  表示距离阈值(该值以实验经验确定).当距离  $d$  小于阈值  $t$  后,速度为零.

(4) 当目标物被放送完毕后,机器人变迁到“离开”状态,机器人加速离开基地区.该状态保证基地区不被“无谓”的占用,提高了基地区的有效利用率.

本策略的 FSA 描述如图 2 所示.系统中没有利用全局信息,机器人之间没有直接的通信交互,算法中使用的信息全部是机器人利用自身的视觉感知能力自主获得的.

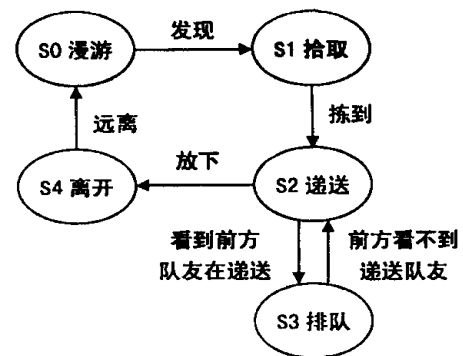


图 2 基于传感交互的排队协调策略的群体觅食行为的 FSA 描述

Fig. 2 FSA description of forage task using queue coordination strategy based

## 4 实例研究(Simulation researches)

### 4.1 仿真平台

为了能将本文的算法和以往的研究进行量化的比较,本文借鉴[1]的方法,采用 CMU 的 Team Bots 软件包作为仿真平台.其中行为设计基于 Motor Schema 的方法<sup>[6]</sup>,任务序列的规划采用有限状态机方法<sup>[7]</sup>.

仿真实验中的统计数据包括任务的平均完成时间、平均碰撞次数以及平均碰撞占时比,都是将 20 次实验的统计数据取算术平均值得到的,其中平均碰撞占时比是指任务中碰撞花费的时间占总完成时间的比例.此外,为了便于观察系统运行的过程和分析比较不同的控制策略,我们还记录了一些过程参数,如发生碰撞的地点、碰撞发生在哪几个机器人之间等.

任务的仿真环境也与[1]相同,实验中采用同构机器人系统,正方形区域中包含着 8 个固定的障碍物和 40 个均匀分布的目标物,基地区设置在场地的中央,以收集到 40 个目标物中的 80% (即 32 个) 作为任务的完成.

### 4.2 算法仿真

应用上节提出的冲突消解策略,进行仿真实验.机器人群体的规模从 4 个增加到 24 个.图 3 显示了 16 个机器人在基地区附近排队行进的情形,实验结果数据见表 1.

从表 1 中可以看出,随着机器人数的增加,任务执行时间显著减少,系统中冲突的数量提高的幅度并不大,死锁现象被基本消除了.系统的运行效率在机器人数目到达 16 个之后才开始缓慢下降.图 4 显示系统包含 24 个机器人时的运行情况.可以看

出, 对于当前仿真运行环境, 系统中包含 24 个机器人几乎已经到达了机器人总数的极限, 而此时系统仍能正常运行.

表 1 基于局部感知的排队协调策略下多机器人群体觅食任务执行情况

Table 1 Performances of forage task using queue coordination strategy based on local sensing

机器人数目	平均完成时间	平均碰撞次数	平均碰撞占比
4	125.2	1.3	0.92%
8	60.6	9.8	8.03%
12	40.7	33.8	31.08%
16	37.7	94.2	64.51%
24	39.5	193.6	90.54%

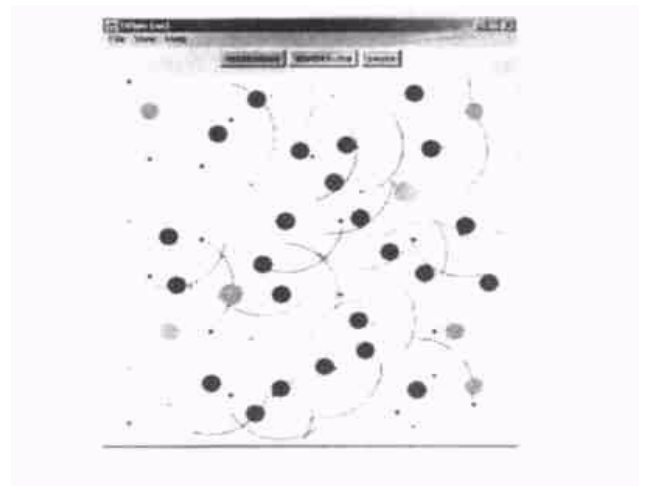


图 4 24 个机器人组成的多机器人群体觅食任务运行图  
Fig. 4 Simulation of forage with 24 robots

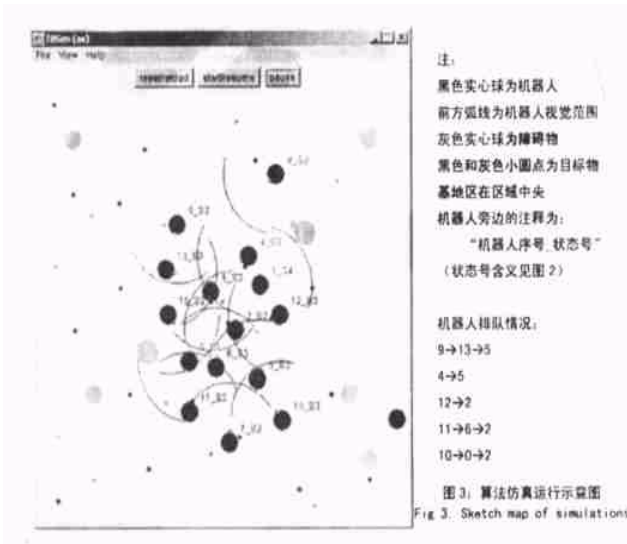


图 3 算法仿真运行示意图  
Fig. 3 Sketch map of simulations

实验结果证明基于局部感知的排队协调策略能有效的减少机器人之间的冲突, 基本上避免了死锁的发生, 从而显著提高多机器人的群体性能. 当然, 排队协调策略对机器人的视觉感知能力提出了更高的要求, 需要硬件设计的配合.

4.3 仿真结果分析比较

在[1]中给出了原始行为、Pack 仲裁和广播式通信三种策略下得到的实验结果, 根据该数据, 将本文算法的结果与之比较, 见表 2. 文本算法与原始行为和广播策略下群体性能的比较见图 5.

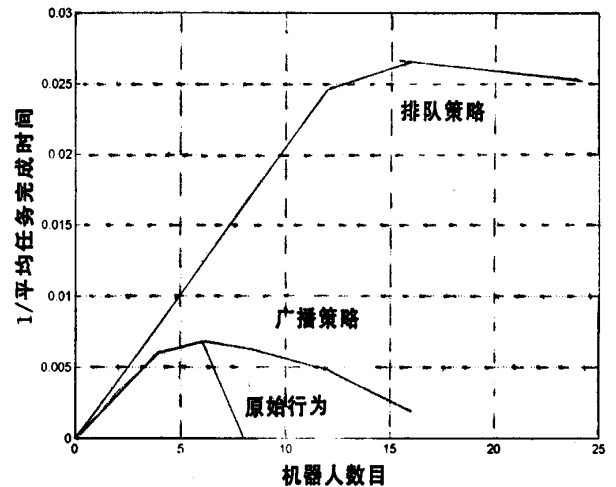


图 5 群体规模/性能比较图  
Fig. 5 Comparing figure between group size and performance

表 2 实验研究结果比较

Table 2. Comparison of performances using different strategies

实 验	平均完成时间		平均碰撞次数		平均碰撞占比	
	4 机器人	8 机器人	4 机器人	8 机器人	4 机器人	8 机器人
原始行为	167	死锁	12	死锁	6.15%	死锁
Pack 仲裁	214	179	7.0	33.2	7.70%	43.32%
广播通信	163	156	7.4	41.4	7.59%	52.40%
排队策略	125.2	60.6	1.3	9.8	0.92%	8.03%

原始行为下,随着机器人数的增多,冲突显著增加,系统的效率在 6 个机器人时达到最高;而当系统包含 8 个机器人时,发生死锁.[1]的算法,减慢了多于 6 个机器人后系统冲突增加的速度,和效率下降的速度.但系统性能的总趋势并没有改变.而本文的算法使机器人数目达到 8 个后,效率仍处于提高趋势,在 16 个机器人时效率达到最高,真正体现了多机器人系统提高性能的特点.

## 5 结论(Conclusion)

本文研究证实,对于分布式的多机器人系统,适当调整个体机器人的行为策略,可以对系统的全局特性进行控制.利用局部感知信息,为机器人设计恰当的协调行为,对于消解机器人之间的冲突,提高系统完成任务的效率,提高系统整体性能有着显著的作用.多机器人群体觅食任务从一个侧面反应了更广泛的分布式多智能体系统的内在规律,对于多智能体系统的研究具有借鉴价值.

### 参考文献 (References)

- [1] 陈卫东,李振海,席裕庚. 分布式多移动机器人系统冲突及其消解策略的实例研究. 系统仿真学报, 2002, 14(10)

- [2] Dani Goldberg and Maja J Mataric. Interference as a Tool for Designing and Evaluating Multi-Robot Controllers, Proceedings, AAAI-97, Providence, Rhode Island, 1997, 27-31: 637- 642
- [3] Miguel Schneider Fontan and Maja J Mataric. Territorial Multi-Robot Task Division. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(5): 815- 822
- [4] Y Uny Cao, Alex S Fukunaga, Andrew B Kahng. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. Autonomous Robots, 1997, 4, 1- 23
- [5] Balch T, Arkin R C. Communication in reactive multiagent robotic systems. Autonomous Robots, 1995, 1(1): 27- 52
- [6] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multiagent robot teams. IEEE Transactions on Robotics and Automation, December, 1998
- [7] Kube C R, Zhang H. Task Modeling in Collective Robotics, Department of Computing Science, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1997

### 作者简介:

王 坤 (1978-), 女, 硕士. 研究领域: 多移动机器人系统的协作.

陈卫东 (1968-), 男, 博士, 副教授, 研究领域: 机器人, 多智能体系统.

(上接第 525 页)

### 参考文献 (References)

- [1] Fukuda T, Kaga T, Sekiyama K. The meaning of functional reconfiguration under the dynamic environment and system behavior. Proc. IEEE/IROS'96: 1676- 1683
- [2] Chirikjian G, Pamecha A. Bounds for self-reconfiguration of metamorphic robots. Proc IEEE/ICRA'96: 1452- 1457
- [3] Rus D, Vona M. A physical implementation of the self-reconfiguring crystalline robot Proc IEEE/ICRA'00: 1726 - 1733
- [4] Yoshida E, Murata S, et al. A distributed reconfiguration method for 3-D homogeneous structure. Proc IEEE/IROS'98: 852- 859
- [5] Yim M, Duff D G, Roufas K D. PolyBot: a modular reconfigurable robot. Proc IEEE/ICRA'00: 514 - 520

- [6] Bojinov H, Casal A, Hogg T. Emergent structures in modular self-reconfigurable robots. Proc IEEE/ICRA'00: 1734- 1741
- [7] Salemi B, Shen Weimin, Will P. Home-controlled metamorphic robots. Proc IEEE/ICRA'2001: 4194- 4199
- [8] Kotay K., Rus D. Motion synthesis for the self-reconfiguring molecule. Proc. IEEE/IROS'98: 843- 851
- [9] 徐威, 王石刚. 多微机器人的重构与协调控制的研究. 机器人, 2000(7)
- [10] Yoshida E, et al. Miniaturized self-reconfigurable system using shape memory alloy. Proc IEEE/IROS'99: 1579- 1585

### 作者简介:

徐 威 (1969-), 男, 博士研究生. 研究领域: 人工智能, 自重构机器人.