

# 基于多模式交互的多移动机器人 分布式合作系统<sup>1)</sup>

陈卫东 顾冬雷 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所 上海 200030)

(E-mail: wdchen@sjtu.edu.cn)

**摘要** 本文研究合作型多移动机器人系统的分布式控制方法. 为了保证多机器人间合作的实时性和高效率, 采用了一种分组策略, 并提出了将局部感知和组内通信相集成的多模式机器人间交互方法. 考虑到任务的复杂性和真实环境的非结构化特点, 构建了将递阶规划技术与基于行为的反应式控制相结合的递阶混合式协调结构, 并采用有限状态机模型实现了规划层与行为层的协调机制. 合作垃圾清运的实验结果证明了上述方法的有效性.

**关键词** 多移动机器人, 合作, 分布式控制, 交互

**中图分类号** TP242

## Distributed Cooperation for Multiple Mobile Robots Based on Multi-Modal Interactions

CHEN Wei-Dong GU Dong-Lei XI Yu-Geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(E-mail: wdchen@sjtu.edu.cn)

**Abstract** The distributed control method in cooperative multiple mobile robot systems is studied. A grouping strategy and a multi-modal interaction method based on local observation and explicit communication have been adopted to realize real-time and efficient inter-robot cooperation. Based on the finite state automata (FSA) model, a hierarchical & hybrid coordination architecture integrating high-level task planning and low-level reactive control has been proposed to complete complex tasks in unstructured real environments. Case study of multi-robot cooperative trash collection and experimental results demonstrate the validity of the scheme.

**Key words** Multiple mobile robots, cooperation, distributed control, interaction

1) 国家“863”计划(2001AA422140)与国家自然科学基金(60105005)资助

Supported by the National 863 Plan (2001AA422140) and National Science Foundation of P. R. China (60105005)

收稿日期 2002-09-30 收修改稿日期 2003-08-11

Received September 30 2002; in revised form August 11, 2003

# 1 引言

相对于集中式控制的机器人系统,分布式自主机器人系统(distributed autonomous robotic systems,DARS)<sup>[1]</sup>以其突出的柔性和鲁棒性,以及广泛的应用前景(例如扫雷、多卫星防御系统、核电站的维护和星际探索等),已成为人工智能和机器人学领域新的研究热点<sup>[2,3]</sup>.

合作型任务是群体任务中要求配合最复杂的一类任务,执行该型任务时,一个机器人所采取的动作需考虑其它机器人伙伴的当前状态,任务的完成与否依赖于团队成员的联合动作,而非某一个体的单独行动,例如重物的合作搬运、物体的接力传递等.在该型 DARS 系统中,为了达到较高的协调程度,往往需要机器人之间进行有效的信息交互.归纳起来,机器人间的交互模式主要包括两种:利用通信设备的显示交互和基于传感器观测的隐式通讯,目前研究主要侧重于上述某一种交互模式的效用,而没有将两者有效地集成在一个统一的控制体系中<sup>[4]</sup>.机器人之间、机器人与环境之间的交互复杂性和整体系统的本质动态特性,对 DARS 系统的设计提出了难题,尤其是在协调和避免冲突方面,其困难程度与任务、环境以及控制策略的选择都密切相关.由于分布式系统设计中强调各机器人的完全自主性,不存在所谓的中央协调器,所以,在控制策略中,机器人之间的信息交互方式对其合作能力、效率和系统可靠性都具有重要影响.

本文针对在非结构环境下的分布式多移动机器人系统,提出了一种基于多模式交互的协调和合作方法,由 4 台 Pioneer 2/DX 型移动机器人组队进行的合作清运实验表明了上述方案的有效性.

# 2 体系结构与任务规划

为了实现分布式合作,首先要建立控制结构以及机器人之间的信息交互通道.该多机器人系统的递阶混合式协调结构如图 1 所示.

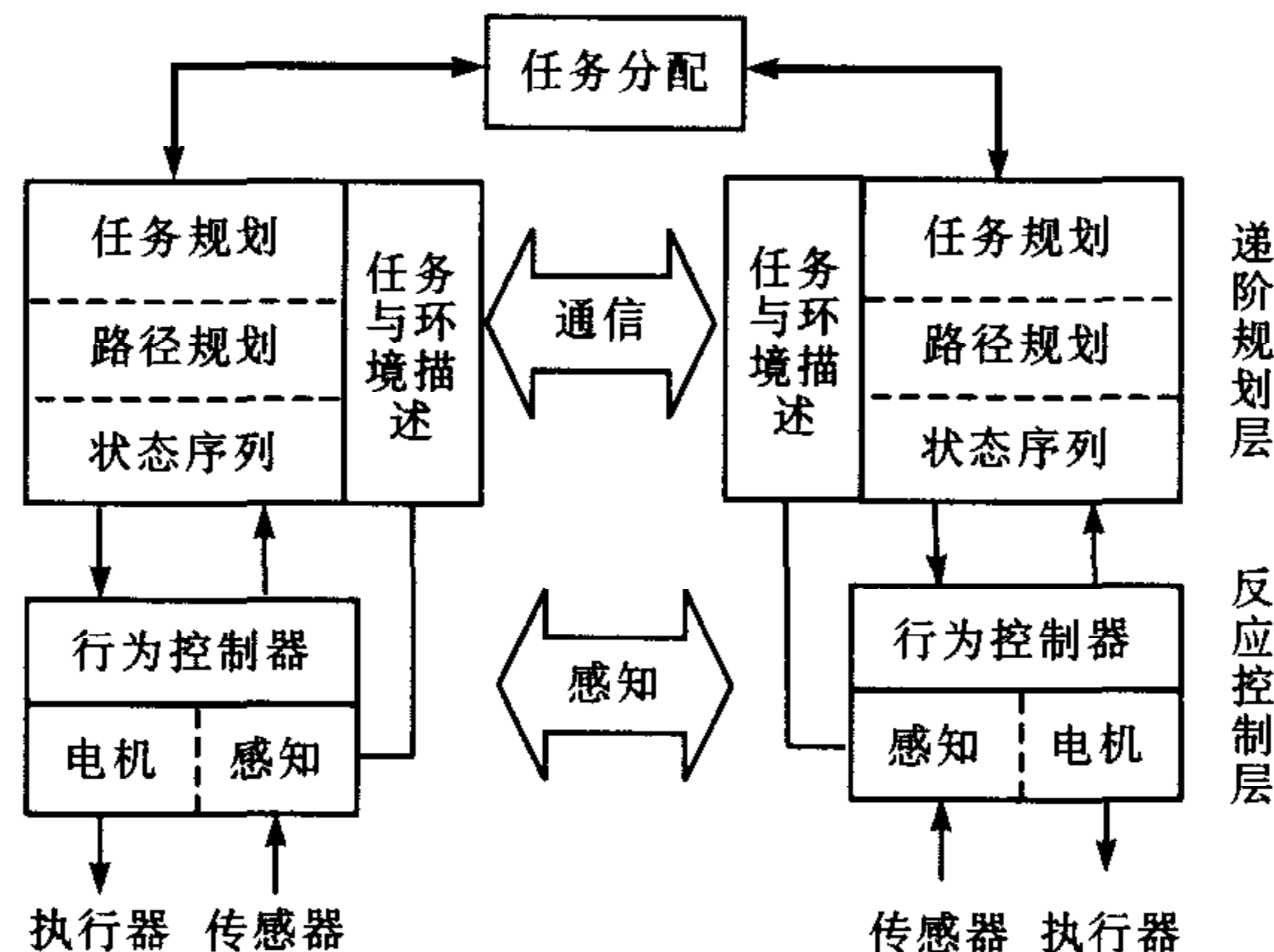


图 1 递阶混合式协调结构

Fig.1 Hierarchical & hybrid coordination architecture

每个机器人的控制系统采用包括规划层和行为控制层的递阶式结构,实现了基于任务与环境描述的规划和基于行为的反应式控制的有机结合<sup>[5]</sup>.任务规划包括机器人之间的任务分配,以及每个机器人对各自任务的分解与细化,进而产生一系列子任务,然后对完成各子任务的作业路径进行局部规划.最后利用有限状态机(finite state automata, FSA)确定完成上述任务和路径的一系列动作的状态序列.完成任务的规划是由一系列离散的状态按某种序列相互连接构成的.每一个状态(state)内部包含若干个基本行为,这些行为的集合描述了当前状态的特征,状态之间的变迁(transition)由事件触发器(event trigger)实现.这样某一任务的执行过程可被描述为以状态为节点,以事件触发器为变迁的一个 FSA,如图 2 所示.

行为策略决定了某一状态下所需选择的行为以及行为之间的优先级和抑制关系.在控制系统的底层是行为控制器,这是一种基于行为的反应式控制器,包括多种基本行为(Avoid\_obstacle, Move\_to\_goal 等等)并行工作,各行为接收传感器的输入,根据各自的控制算法产生控制输出,各行为的控制输出依据优先级加权求和实现行为融合,进而把控制信号发给执行器,实现机器人的运动动作.同时,行为控制器还将传感器得到的传感信息传送给规划层,刷新和维护环境描述模型.

一个 FSA 包括状态集合  $S(\text{states})$ 、输入集合  $I(\text{inputs})$ 、行为集合  $B(\text{behaviors})$  以及输出集合  $O(\text{outputs})$ . 变迁函数为  $f(s, i) \rightarrow s$ , 表示从状态和输入到状态的映射. 输出函数为  $g(s) \rightarrow o$ , 表示从状态到输出的映射. 行为集合的联合输出即为  $g(s)$ , 各行为的融合计算采用模糊融合算法, 表示为  $g(s) = \text{Fuzzy}(s)$ .

本体系结构支持在控制系统的各层次实现多机器人之间的协调. 在递阶规划层, 各机器人通过网络通信实现信息的交互, 根据其它机器人的状态进一步调整自我的规划, 实现基于规则的分布式规划; 而在反应式控制层, 各机器人通过各种传感器感知对方的存在和状态, 进而调整自己的行为, 实现基于感知的行为级协调, 同时也可将感知的信息逐级反馈, 支持递阶规划层的协调机制. 例如, 在行为规划层, 通过接受其它机器人通信发来的消息, 借助于 FSA 模型, 触发机器人内部状态的变迁, 达到新的作业进程; 在反应控制层, 可以直接利用传感器的反馈实现机器人之间的跟随(follow)、对位(couple)、避碰(avoid\_collision)以及组间回避(repulse)等合作行为.

### 3 机器人间的多模式交互

机器人间的交互对系统性能的改善主要有两种促进作用: 一是获取有关环境和其它机器人信息以弥补自身传感器能力的不足; 二是利用频繁的信息交换和协商来达成相互间的密切合作. 通信对一些特定类型的任务具有明显的效益, 在许多情况下, 即使很少量的通信也可以起到很大的作用<sup>[6]</sup>.

如同人类社会合作主要依赖于语言和观察两种信息媒介, 对于机器人来说, 其语言交

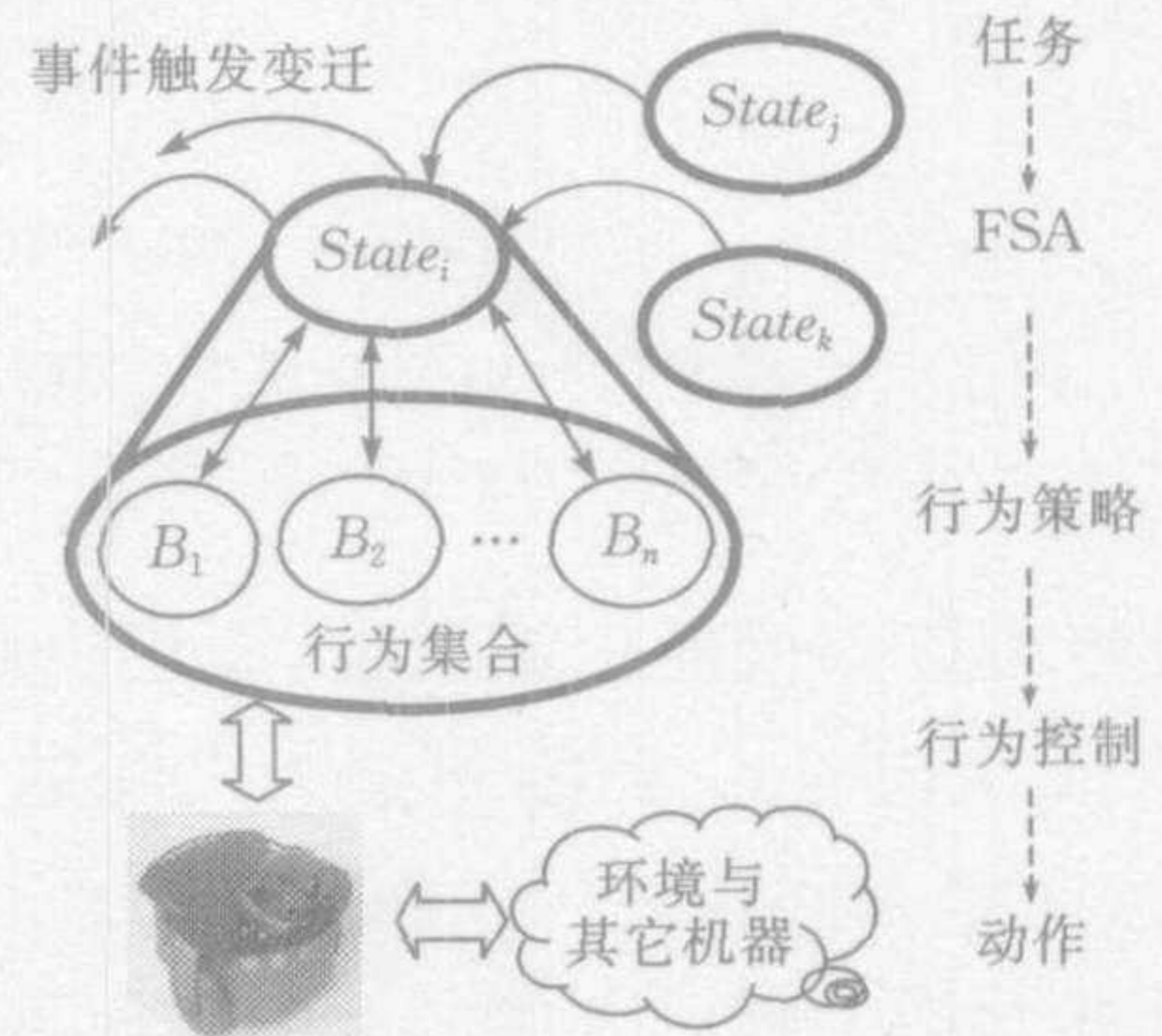


图 2 基于 FSA 模型的规划与行为控制  
Fig. 2 Planning and control based on FSA

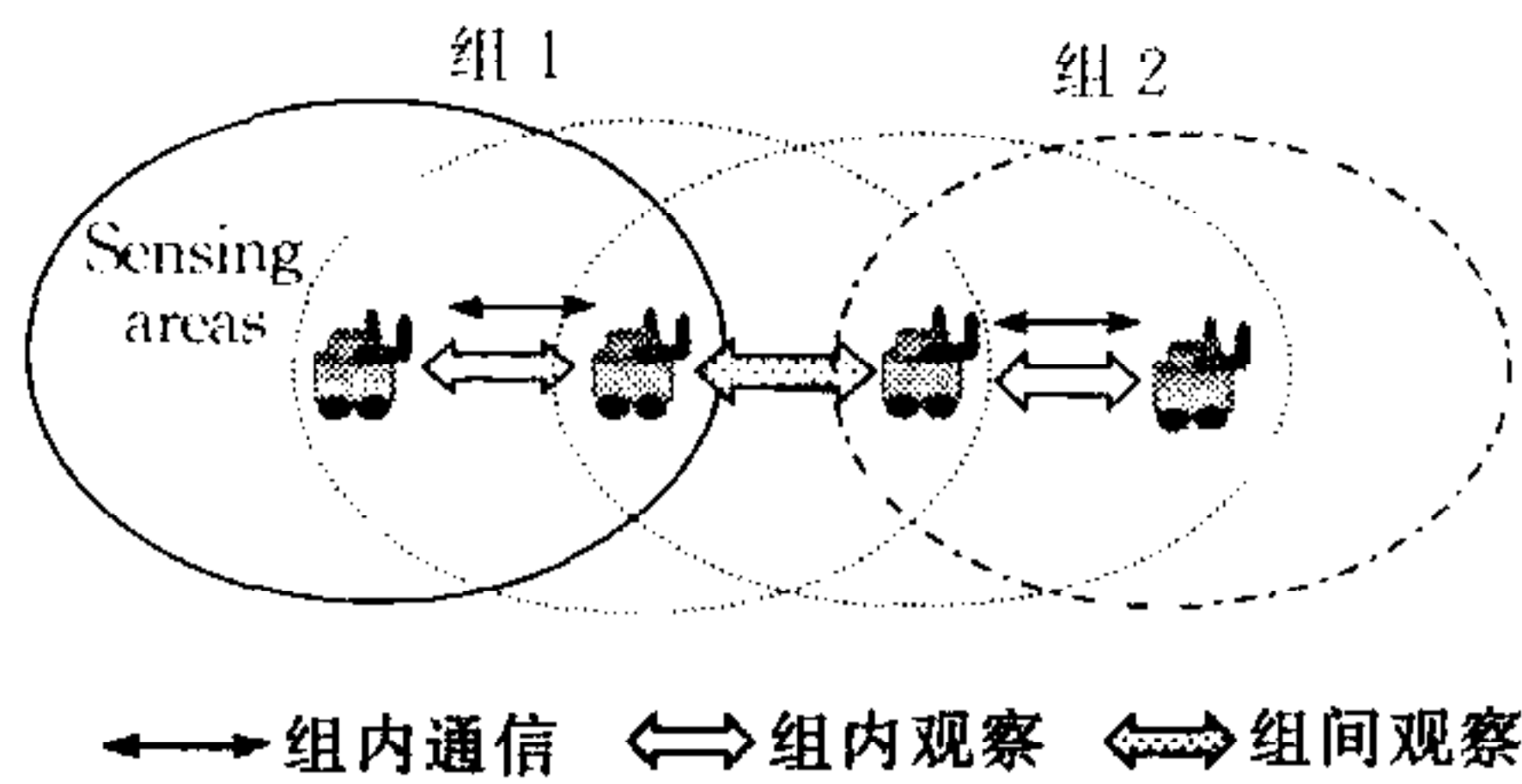


图 3 机器人间分组交互机制示意图

Fig. 3 Grouping interaction between robots

互是基于通信的,而观察是基于感知的,传感器包括视觉、声纳和里程计等多种传感器.本文提出了一种多模式的交互机制,如图 3 所示,具有下述特点.

1) 分组机制:将  $N$  个机器人分成  $K$  组,组内成员数为  $m_i, i=1, 2, \dots, k$ ,每组内部的机器人通过合作均可独立执行任务,因此就有  $K$  组机器人在并行执行任务.文献[7]表明通过适

当分组可以降低通信数据量、简化协调策略、有效避免通信瓶颈和死锁.

2) 组内显式通信:机器人之间的显式通信只发生在组内,而且只是在到达每个后续状态时,向组内伙伴传送一次描述当前状态起始的消息标志.这种简短的消息传递机制,是基于机器人均了解对方的内部状态模型的前提之下,由于机器人的内部状态数量较小,因此机器人之间的通信数据量也就很少,但所表达的信息量并没有减少.

3) 组内局部感知:由于组内机器人之间的合作行为(如避碰、跟随、对接等)必须依赖传感器的观察结果,这种感知信息可以实现对显式通信内容的有效补充.可以说,显式通信的内容是粗粒度的,观察信息是细粒度的.

4) 组间局部感知:为了实现组间协调(区域分工等),机器人的组间观察也是必要的.

上述多模式交互机制具有以下优点:1)信息互补:两个通道可以提供对方难以获得的信息;2)通信效率:通信发生在规划层,内容简练,时间离散,信道利用率高,使通信系统可以容纳更多的机器人同时作业;3)实时性:基于感知的机器人间协调可以充分利用机器人的本身处理能力,实现快速实时的行为控制;4)可靠性:二者的结合减小了系统对通信的依赖性,避免了通信死锁.

## 4 行为控制策略

在控制层,本文采用了基于行为的控制方法.主要涉及行为选择和行为融合问题.首先要构建基本的行为模块,然后由底向上地组合各行为模块,逐级完成各子任务,直至达到总体目标.

机器人的反应式行为和目的性行为及其涉及的传感器见表 1 和表 2.这两类行为为行为的选择和合成提供了基本模块.通过采用适当的行为选择策略,可由若干基本行为构成更为复杂的组合行为.本文采用了一种基于 Fuzzy 逻辑的行为融合算法.每个行为包括一个用于提取模糊变量的模糊化函数,一个给出可行动作期望值的模糊规则集合.行为的输出经反模糊化和叠加,生成给执行机构的控制值<sup>[8]</sup>.

表 1 反应式行为  
Table 1 Reactive behaviors

名称	描述	传感器
Avoid-obstacles	在移动时避开障碍物	声纳
Avoid-collision	在移动时避开其它机器人	声纳,视觉
Keep-off-dis	与周围的物体保持一定距离	声纳
Stay-away-dis	与某个指定物体保持一定距离	视觉,短期记忆
Repulse	回避其它组机器人的作业区域	视觉

表 2 目的性行为  
Table 2 Purposive behaviors

名称	描述	传感器
Wander-for-obj	到处漫游,尽可能地覆盖不同的区域	视觉
Search-for-obj	原地转动寻找特定目标	视觉
Move-to-goal	向指定目标前进	视觉
Back-up-dis	后退一段距离	里程计
Turn-angle	原地转动一定角度	里程计
Pick-up-obj	向目标移动,直到手爪感知到物体存在于两掌之中,然后抓获物体	视觉,手中光电传感器
Drop-obj	移动到指定位置,放下手爪中的物体	视觉
Follow-partner	跟随指定物体,并保持一定的距离	视觉
Couple-with-partner	机器人间对位与对接	视觉

### 5 实例研究——合作垃圾清运

本文采用 4 台 Pioneer 2/DX 型轮式移动机器人(美国 ActivMedia 公司制造),建立了一个多机器人实验平台<sup>[9]</sup>.各机器人的控制是全自治的,并通过通信和观察与其它机器人保持协调,系统不存在全局控制器,是完全分布式的协调模式.

本文以垃圾清运为例,对多机器人合作进行了实验研究.多机器人清洁队包括 4 台 Pioneer 2/DX 机器人,分为两组,每组由清洁工和清洁车两种功能相异的机器人组成,前者配有夹持手爪,后者则带有车厢,存放所捡拾的物体.实验场地为 10m×10m 的方形区域,随机放置 10 个具有特定颜色和形状的罐头作为垃圾,环境中摆放有固定障碍物,实验人员在场内走动则视为动态障碍物,将 80% 的垃圾搬运到垃圾场为完成任务.

实验过程中,清洁工将捡拾来的物体放入到清洁车上,当清洁车中的物体达到一定数量后,清洁车将物体运回处理场,然后再返回,开始下一次作业.基于 FSA 模型的清洁工的状态序列如图 4 所示.为了提高系统的作业效率,我们还在清洁工的漫游状态 Wander-for-

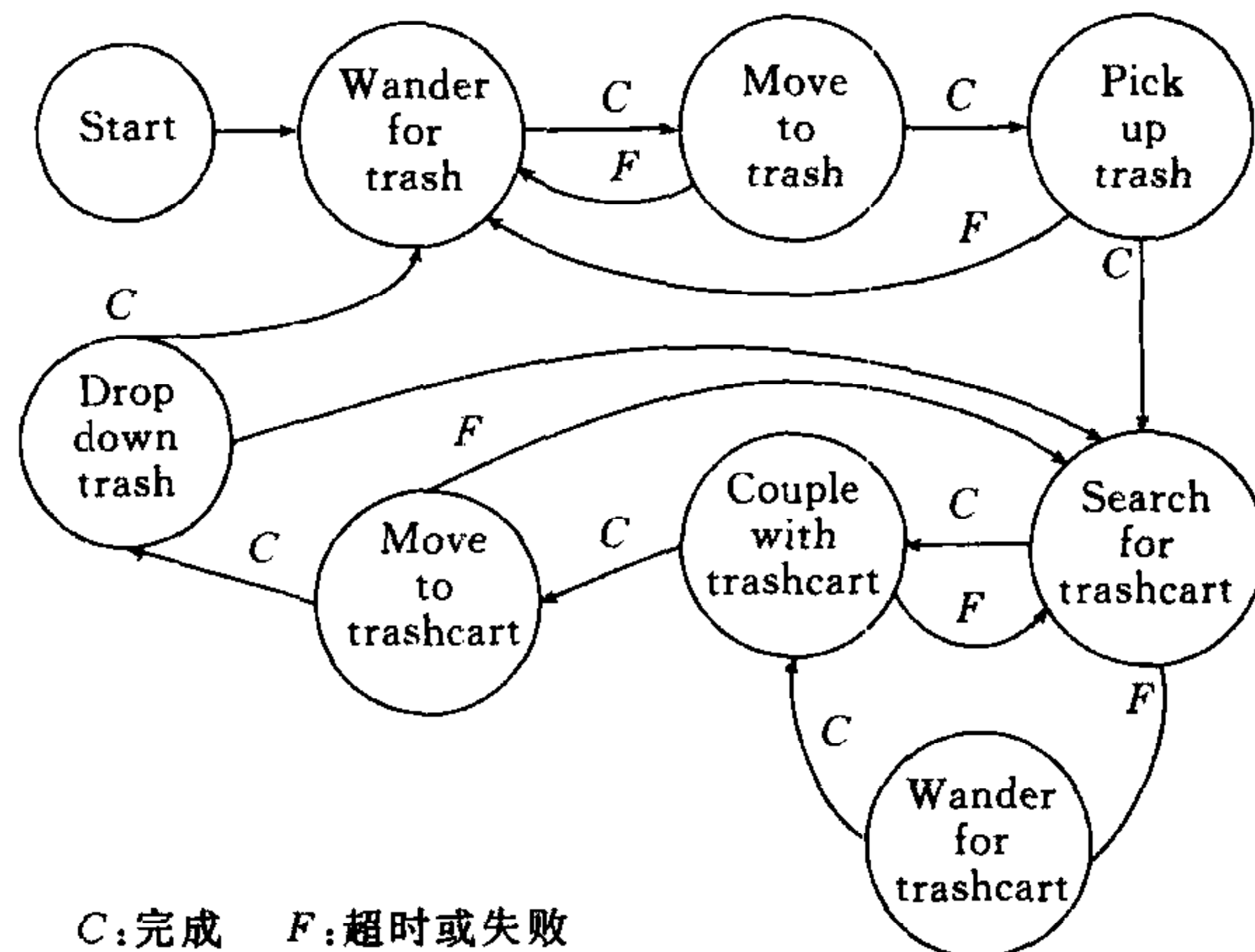


图 4 清洁工机器人的 FSA 图  
Fig.4 FSA diagram of trashman robot

trash 中启用了基于视觉的地域回避行为 Repulse,来减小组间干扰.

在该实验中采用了基于两种交互模式的协调策略.

1) 基于通信的协调:同组的两个机器人通过相互通知状态起始消息,从而影响对方确定状态变迁的时机(比如清洁工与清洁车的对位状态).

2) 基于感知的协调:机器人之间通过传感器信息,实现协调与合作行为,主要包括机器人间基于声纳的避碰行为,基于视觉的组内对位与和组间回避行为.

在垃圾转交过程中清洁工与清洁车的协调和合作关系是最紧密的,该过程的状态序列与交互关系如图 5 所示.当清洁工捡拾垃圾后,进入寻找垃圾车状态,同时利用通信通知清洁车,使其从当前状态进入寻找清洁工状态,当清洁车找到清洁工后,进入跟随清洁工状态,并通知清洁工,这时清洁工进入对位状态,然后再通知清洁车,使其进入对位状态.以此类推,两者通过相互观察和通信,保持协调,合作推进任务的完成.

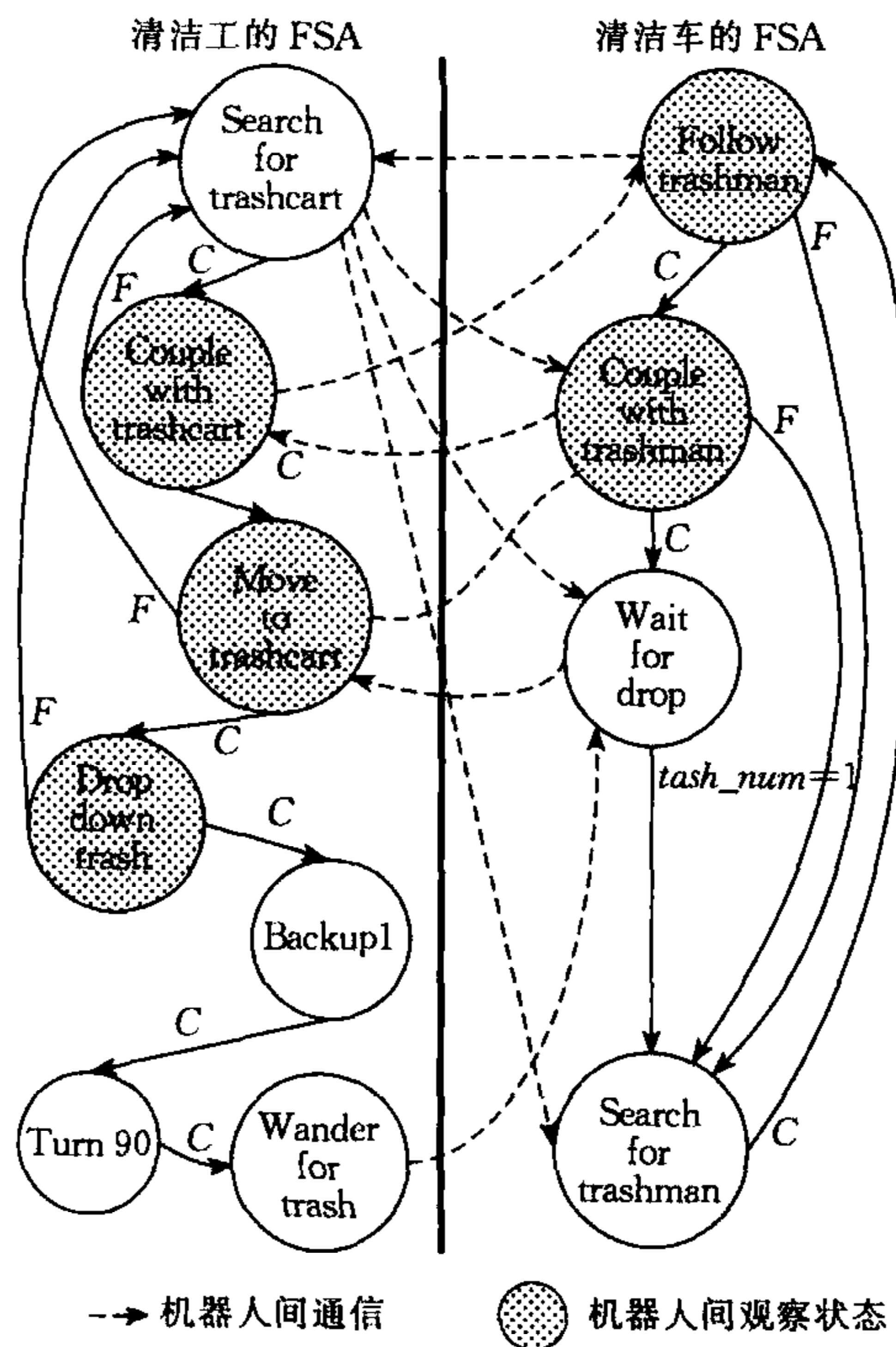


图 5 状态序列与交互关系图

Fig. 5 State sequences and robots' interaction

在协调控制的基础上采用了两种合作方式,一种是主从式的合作,一种是区域性的合作.主从式的合作存在于清洁工与清洁车之间,清洁工为主,清洁车为从,清洁工在进入新状态后,将自身状态通知清洁车,触发清洁车进入后续状态,达到与其同步,这是利用视觉观察与消息传递来实现的,主要完成寻找、跟踪和对位行为.而区域性的合作则存在于两组机器人之间,是利用视觉来实现的,在地域回避行为中得到体现.这种合作主要完成任务的区域分工(即不同组清除不同区域的垃圾,以提高效率).实验的作业过程场景照片如图 6 所示.

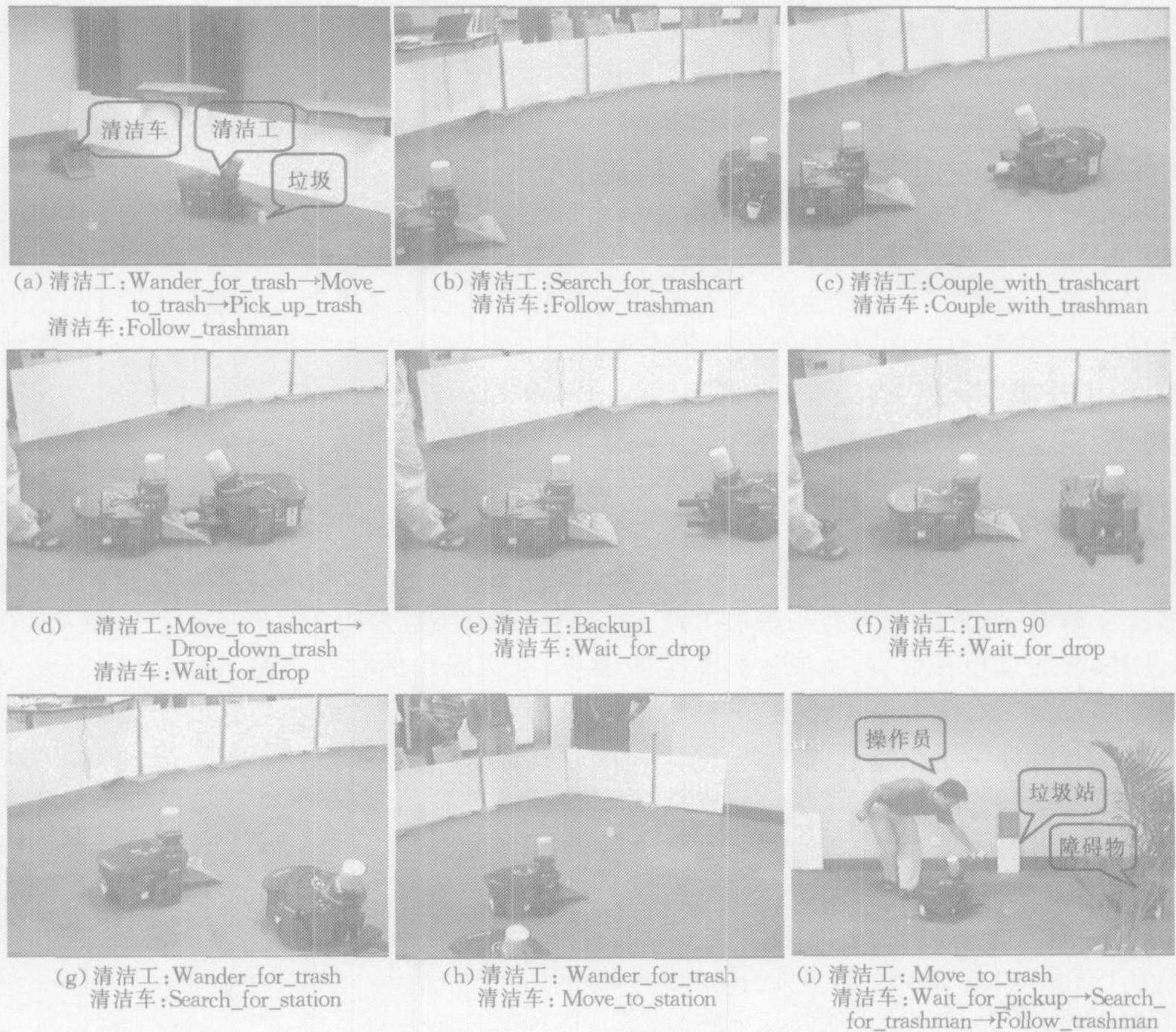


图 6 机器人清洁队实验进程照片

Fig. 6 Experimental process of multi-robot trash collection

## 6 实验结果与分析

为了检验合作策略对任务执行效率的影响,对于不同的组队情况进行了对比实验,包括如下四种情况:

- A) 两个机器人均为清洁工,无合作;
- B) 两个机器人,分别为清洁工和清洁车,有合作;
- C) 四个机器人分两组,有组内合作,

无组间回避行为;

D) 四个机器人分两组,既有组内合作,又有组间回避行为.

在其它实验条件不变的条件下,各进行了 5 次实验,取完成 80% 任务的平均耗时和最大、最小耗时,不同组队情况下任务平均耗时如图 7 所示.可以看出,在 B) 情况,两个机器人作业时,由于分工和主从合

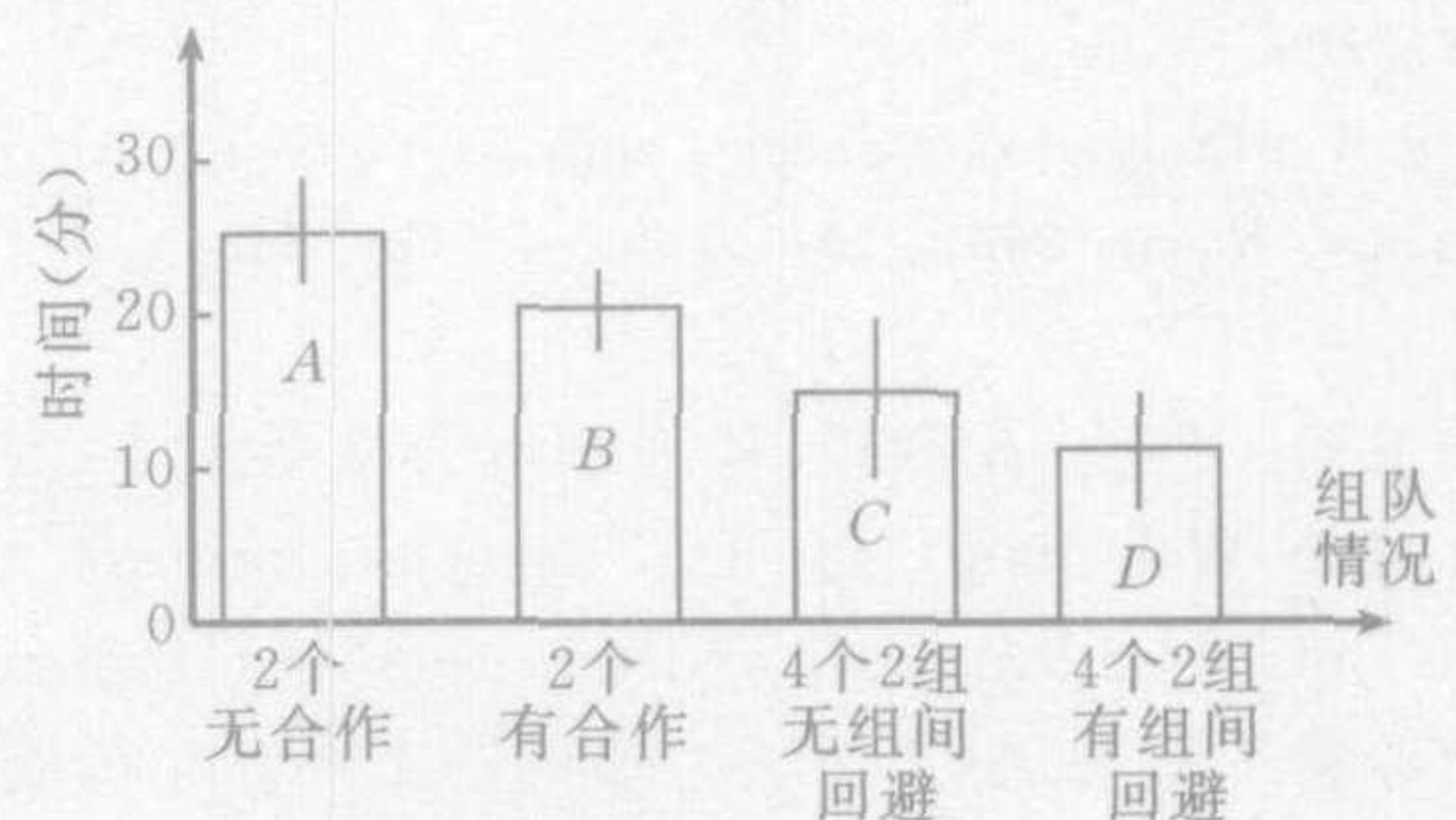


图 7 不同组队情况下任务耗时图

Fig. 7 Mean time to completion of different schemes

作关系的引入,减少了机器人之间的干扰和冲突,与 A)相比提高了任务的执行效率.在 C)情况,四个机器人同时作业时,由于作业区域的限制,组间干扰影响了完成任务的效率,虽然机器人数量增加一倍,但耗时相对 B)只减少为 73%.在 D)情况通过启用组间回避行为,有效地抑制了组间干扰,使执行效率得到了明显改善.

从图 7 中还可看到,随着机器人数目的增加,耗时的最大最小差距也增大,这是场地较小,在机器人密度增加情况下明显加大了机器人感知困难和机器人间冲突发生的几率,因而导致多机器人系统的不确定性加大.目前清洁车的一次载荷为两个垃圾罐,如果清洁车的一次载荷增大,或场地扩大,任务的执行效率也将随之提高.由实验结果看出,分工与合作策略的引入,不仅缩短了任务完成时间,而且还减少了机器人的行驶距离,降低了能耗.

## 7 结论

本文构造了一个具有机器人间感知和通信交互能力的多移动机器人系统,通过设计合适的交互策略、任务规划与行为控制方法,无需中央控制器,采用全分布式的控制机制,多机器人间能够通过相互合作,完成较为复杂的任务.本文提出的合作策略,通过分组、分工,将机器人的行为在时空上有序分解,又利用通信和观察,使机器人间动作保持协调同步,在一定程度上有效抑制了机器人间冲突.同时,考虑到信道的容量限制,提出了一种高效的基于状态起始消息的通信模式.垃圾清运任务的实验研究表明,上述方案对于在实际动态环境下作业的物理多机器人系统,具有可行性和有效性.

## References

- 1 Arai T, Pagello E, Parker L W. Editorial: Advances in multi-robot systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 655~661
- 2 Mataric M J. Designing and understanding adaptive group behavior. *Adaptive Behavior*, 1995, **4**(1): 51~80
- 3 Parker L E. ALLIANCE: An architecture for fault tolerant multirobot cooperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, **14**(2): 20~240
- 4 Uny C Y, Fukunaga A S, Kahng A B. Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 1997, **4**(1): 1~23
- 5 Arkin R C, Balch T. AuRA: Principles and practice in review. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 1997, **9**(2): 175~189
- 6 Balch T, Arkin R C. Communication in reactive multiagent robotic systems. *Autonomous Robots*, 1994, **1**(1): 1~25
- 7 Arai T, Ogata H, Suzuki T. Collision avoidance among multiple robots using virtual impedance. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tsukuba, Japan: IEEE Press, 1989. 479~485
- 8 Saffiotti A, Ruspini E H, Konolige K. Using fuzzy logic for mobile robot control. In: Dubois E, Prade H and Zimmermann H J eds., Int. Handbook of Fuzzy Sets and Possibility Theory. Amsterdam: Kluwer Academic Publisher, 1999. 185~260
- 9 Chen Wei-Dong, Dong Sheng-Long, Xi Yu-Geng. An open multi-agent architecture for distributed autonomous robot systems. *Robot*, 2001, **23**(1): 45~50 (in Chinese)

陈卫东 博士,副教授.研究领域为机器人学、多机器人系统、机器学习和遥操作系统.

(CHEN Wei-Dong Ph. D., associate professor. His research interests include robotics, multi-robot systems, machine learning, and tele-operation systems.)

顾冬雷 博士.研究领域为多机器人协调和机器学习.

(GU Dong-Lei Ph. D.. His research interests include multi-robot coordination and machine learning.)

席裕庚 博士生导师,教授.研究领域为预测控制和智能机器人.

(XI Yu-Geng Ph. D., professor. His research interests include predictive control and intelligent robots.)