

# Frontier-I: An Autonomous Mobile Robot for Multi-Robot Tasks

Weidong Chen<sup>1</sup>, Jianqiang Jia<sup>1</sup>, Bo Sun<sup>1</sup>, Qixin Cao<sup>2</sup>, Yugeng Xi<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Automation

<sup>2)</sup> Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030 (Email: wdchen@sjtu.edu.cn)

**Abstract**—In order to facilitate the multi-robot coordination and cooperation in dynamic or unconstructive environments, this paper designs and implements an autonomous mobile robot Frontier-I, which is applicable to a variety of multi-robot tasks. System architecture, hardware configuration as well as planning and control approaches are detailed introduced. Two case studies on multi-robot formation march and soccer robot competition are conducted to demonstrate individual and team autonomies of the robot. The experimental results show the validity of our system design.

**Keywords**—autonomous mobile robot, multi-robot, robot soccer, formation march

## Frontier-I: 面向多机器人任务的自主移动机器人

陈卫东<sup>1</sup> 贾建强<sup>1</sup> 孙波<sup>1</sup> 曹其新<sup>2</sup> 席裕庚<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> 上海交通大学自动化研究所, 上海 200030

<sup>2)</sup> 上海交通大学机器人研究所, 上海 200030

**摘 要** 针对动态或者非结构化环境中多机器人团队作业的需要, 本文设计并实现了一个可以适用于多种多机器人任务的自主移动机器人 Frontier-I。系统介绍了多机器人的体系结构、机器人的硬件配置以及规划与控制方法, 并结合多机器人编队和多机器人足球两个典型任务, 进行了实例研究, 展示了机器人的个体和团队自主能力。实验结果表明本文的设计的有效性。

**关键词** 自主移动机器人, 多机器人, 机器人足球, 编队

### 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以其突出的柔性和鲁棒性, 以及广泛的应用前景, 已成为人工智能和机器人学领域新的研究热点[1, 2]。非结构环境下的多移动机器人系统应能适应任务的变化以及环境的非结构性与不确定性, 不但要求机器人具有较高的个体智能, 而且要具有高度的群体或团队智能。

要使多机器人系统能有效地运行, 就必须对多机器人构成的群体加以组织, 建立适当的组织结构和控制机制。多机器人系统的组织与控制方式在很大程度上决定了系统的有效性。在目前的多机器人系统中, 广泛采用将基于行为的控制与传统的慎思式规划相结合的递阶式结构[3]。

同时, 为了实现协调和合作, 机器人个体之间的信息

交互是非常重要的。机器人之间的交互不但包括利用通信网络的显式交互, 还包括提供传感器观测实现的隐式交互。研究表明, 对于特定的任务, 即使少量的交互, 也能明显地提高团队的整体性能[4]。

机器人足球比赛和多机器人编队是典型的多机器人任务。机器人足球比赛要求机器人在高度对抗和动态的环境下实现合作[5]。多机器人编队任务要求机器人团队保持高度的运动协调性, 尤其是在障碍物环境中[6, 7]。

目前, 自主机器人样机或产品的设计主要是从机器人个体智能的角度来进行的, 为了实现多机器人的团队智能, 往往需要最终用户来进行大量的二次开发和系统改造, 浪费了人力和物力。如果能够在机器人的设计之初就考虑机器人的团队协调与合作能力, 统筹多种任务的通用性, 系统性地设计机器人的体系结构、规划与控制方法以及软、硬件实现技术, 将极大提高多机器人系统的开发效率, 有

国家自然科学基金项目 (资助号: 60105005)

助于自主机器人技术的迅速推广和应用。

本文的工作正是从满足多机器人团队任务的角度出发,从体系结构、硬件配置以及规划与控制方法几个方面,系统介绍了一个自主移动机器人系统设计的核心环节,并最终实现了一个兼顾个体和团队智能要求的 Frontier-I 型自主移动机器人。最后结合两个典型的应用实例:多机器人的编队行进和多机器人足球,展示了系统设计的有效性,并分析和讨论的系统的控制和协作性能。

## 2. 体系结构

为了实现分布式协作,首先要建立控制结构以及机器人之间的信息交互通道。本文在单机器人递阶式结构的基础上[3]进一步发展,设计了一个面向多机器人系统的递阶式体系结构,如图 1 所示。

这个结构的最上层是团队规划层,包括团队任务规划和机器人角色指派两个模块,是借助于人机界面,由操作员来对团队的任务和分工进行描述和设定。

每个机器人的控制系统采用包括规划层和反应控制层的递阶式结构。反应控制层采用基于行为的反应式控制方法。规划层又从上到下分为任务规划层、路径规划层和状态序列层,规划层的执行依赖于行为层反馈构成的任务与环境描述变量。首先对每个机器人的任务进行分解与细化,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(FSM: Finite State Machine)确定完成上述任务和路径的一系列动作的状态序列。由图 1 可以看出,机器人之间的交互包括通信和感知两个通道,这为实现团队的协作,提供了信息基础。

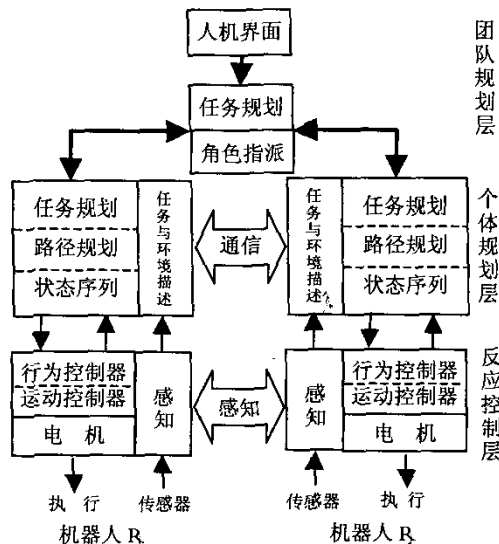


图 1 多机器人协作的体系结构

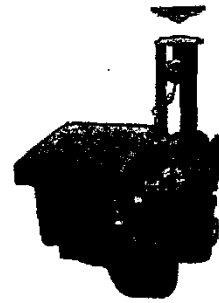


图 2 Frontier-I 自主移动机器人

## 3. 硬件配置

Frontier-I 自主移动机器人的样机如图 2 所示。它主要由以下几部分构成:控制系统、感知系统、通讯系统和移动本体。图 3 描述了硬件配置的结构图。

控制系统由上、下位机两部分组成。上位机采用笔记本电脑执行规划和行为控制。下位机采用 DSP 完成运动控制。上下位机通过 RS-232 串口连接。上位机的控制周期为 50ms,运动控制周期为 2ms。

Frontier-I 自主机器人采用基于视觉的传感器系统。每个机器人配备两种视觉系统。根据其视野范围的不同,分别称为全景视觉和前向视觉。全景视觉能够提供机器人周围 360 度范围内的远距离全景信息。前向视觉用于观察前方近距离范围内的目标。

机器人采用基于无线局域网的通讯技术。每个机器人和远程监控计算机作为网络的节点,共同构成一个无线局域网系统,高达 11Mbps 的无线网络为机器人之间的信息传递提供了一个快捷的通道。操作员通过监控 PC 上的人机界面,向多机器人团队下达任务,并可在线监测团队的运行状态。

移动本体采用双轮差速的运动方式,两个驱动轮附加一个随动轮。通过对机器人两个驱动轮的分别控制来实现各种线速度和角速度的运动。螺旋管用来驱动执行器对作业目标物进行操作。

## 4. 规划与控制

本节以体系结构中从下至上的顺序,分别介绍反应控制、个体规划以及团队规划的设计与实现技术。

### 4.1 基本行为与行为融合

Frontier-I 反应控制层的行为设计采用 Motor Schema 方法[3],基本行为包括:运动向目标、绕目标旋转、避障、躲避区域边界、搜索目标。每个基本行为根据传感器的感知输入,计算得出一个矢量输出。各个行为并行执行。

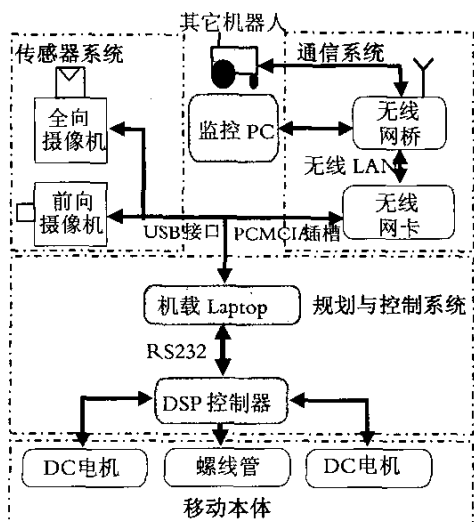


图 3 硬件结构图

行为控制器的总体输出是所有处于激活状态的基本行为输出的矢量加权和。设  $\vec{F}_0$  为最后合成矢量，则，机器人的线速度和角速度由如下公式计算。

$$\vec{F}_0 = \sum_i^n W_i \vec{B}_i \quad i = 0 \sim n \quad (1)$$

$$\begin{cases} V = V_{max} \|\vec{F}_0\| \\ \omega = C \angle \vec{F}_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中， $V$ ， $\omega$  分别是机器人的线速度和角速度， $W_i$  是基本行为  $\vec{B}_i$  的权值，且  $\sum_i^n W_i = 1$ ， $V_{max}$  是线速度的最大值，根据机器人的实际能力和任务的具体要求而定。 $C$  是一个比例常数， $\angle \vec{F}_0$  是机器人的朝向与  $\vec{F}_0$  的夹角。

$V$  和  $\omega$  分别发送给运动控制器，驱动电机，实现机器人的运动。同时，行为控制器还将传感器得到的感知信息传送给规划层，刷新环境描述模型。

图 4 是避障和运动向目标两个行为融合所产生的移动轨迹。可以看出，机器人根据视觉的感知结果，迅速而平滑地绕开障碍物，抵达目的地。

#### 4.2 个体任务规划

机器人个体的任务规划是由一系列离散的状态按一定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，状态之间的变迁由事件触发。这样某一任务的执行过程可被描述为以状态为节点，以事件为驱动的一个 FSM，如图 5 所示。行为选择策略决定了某一状态下所需激活的基本行为  $\vec{B}_i$  以及各基本行为的权值  $W_i$ 。

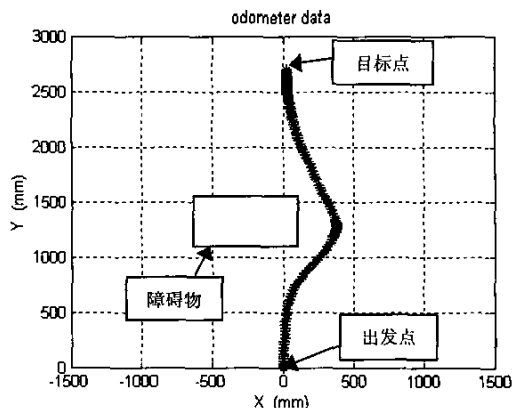


图 4 避障与运动向目标行为融合实验

#### 4.3 团队任务规划

为了更高效地进行团队任务规划，本文开发了一个图形化的团队任务规划软件 TeamLab。TeamLab 运行在远程监控计算机内，包含任务描述、路径规划、团队配置、角色指派、决策融合五个部分。其中前四个部分都是以图形化的界面提供与操作者的人机交互，辅助操作者完成一项任务的规划。决策融合部分由系统自动完成，将任务信息进行整合，由机器人驱动器按照通讯协议生成标准的通讯报文发给每个机器人的个体规划层。

任务描述和路径规划都是采用 FSM 来实现，FSM 的状态可以从团队行为模块区中用鼠标拖入任务规划区，触发器由操作者选择系统内部的环境描述变量设定，并可通过参数设定窗口输入团队行为参数。TeamLab 软件的人机界面如图 6 所示。目前团队行为模块区包括的基本团队行为有：编队行进、聚集、扩散、漫游、寻找目标和归航等。用户对整个团队的路径规划可以通过将 FSM 中的若干触发器设定为一系列的路径点来实现。

TeamLab 支持异构的机器人团队配置，采用通信数据抽象技术实现对不同种类机器人的兼容。目前支持 ActivMedia 公司的 Pioneer 2DX 和 Frontier-I 两种机器人。

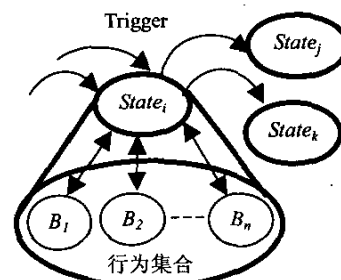


图 5 个体任务规划的 FSM



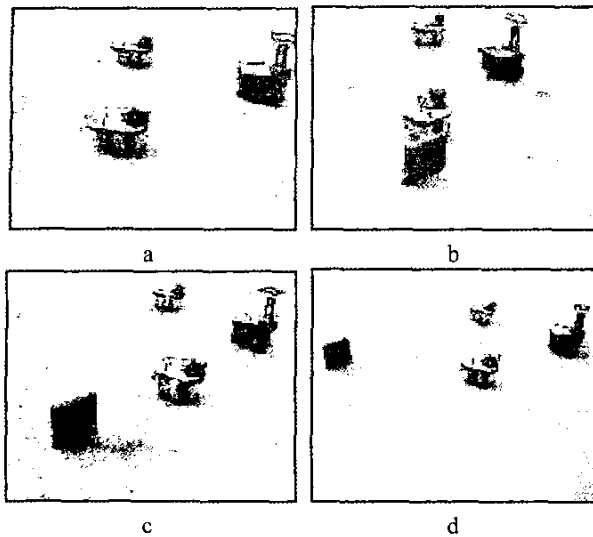


图8 三角编队避障实验

a. 编队行进, b 和 c. 编队避障, d. 到达目标

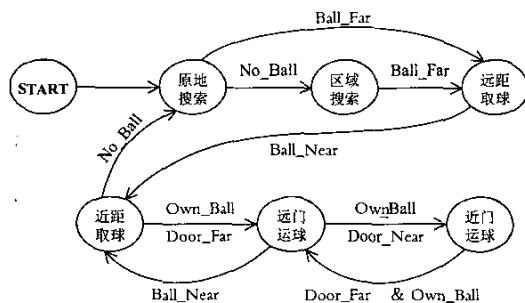


图9 前锋机器人的 FSM

速控制球后, 灵活地绕开其它机器人, 并将球射入对方球门。并且, 在整个动作中, 保持约 1m/s 的运球速度, 快速避开了对方守门员的拦截。

## 6. 结论

针对多机器人团队作业的需要, 本文设计、开发了一个可适用于多种多机器人任务的自主移动机器人 Frontier-I。系统介绍了多机器人协作的体系结构、机器人的硬件结构以及规划与控制方法, 并结合多机器人编队和多机器人足球两个典型团队任务, 进行了实验研究。

实验结果表明, 在复杂的非结构化以及动态环境中, Frontier-I 自主移动机器人表现出了较高的团队协调性和合作能力。

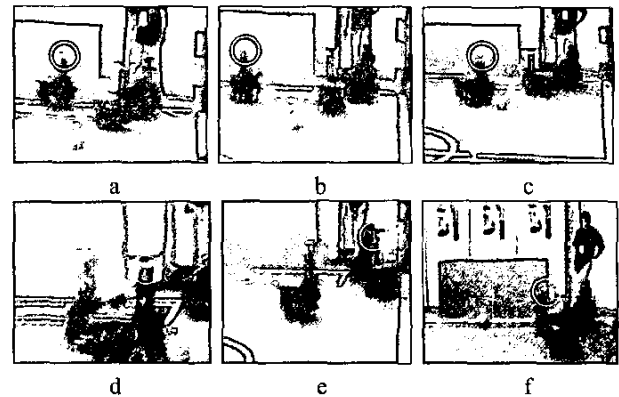


图10 前锋的动作序列

(圆圈标记的为 Frontier-I 机器人前锋)

## 参考文献

- [1] Tamio Arai, Enrico Pagello and Lynne E. Parker, "Editorial: advances in multi-robot systems," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 655-661, 2002.
- [2] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga and Andrew B. Kahng, "Cooperative mobile robotics: antecedents and directions," *Autonomous Robots*, vol. 4, no. 1, pp. 1-23, 1997.
- [3] R. C. Arkin and T. Balch, "AuRA: principles and practice in review," *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 9, no. 2, pp. 175-189, 1997.
- [4] T. Balch and R. C. Arkin, "Communication in reactive multiagent robotic systems," *Autonomous Robots*, vol. 1, no. 1, pp. 1-25, 1994.
- [5] Minoru Asada, Oliver Obst, Daniel Polani, and et al, "An overview of RoboCup-2002 Fukuoka/Busan," *AI magazine*, vol. 24, no. 2, pp. 21-40, 2003.
- [6] T.-S. Chio and T. J. Tam, "Rules and control strategies of multi-robot team moving in hierarchical formation," in *Proc. International Conf. on Robotics and Automation*, Taipei, September 2003, pp. 2701-2706.
- [7] 陈卫东, 席裕庚, 顾冬雷等, "一个面向复杂任务的多机器人分布式协调系统," *控制理论与应用*, vol. 19, no. 4, pp. 505-510, 2002.