

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201302011

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130929.1229.010.html>

# 移动机器人队形控制关键技术及其进展

任立敏<sup>1,2</sup>, 王伟东<sup>1</sup>, 杜志江<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 北华大学 机械工程学院, 吉林 吉林 132021)

**摘要:**在明确了多机器人队形控制国内外发展现状的基础上,以地面移动机器人作为研究对象,从系统结构、机器人模型、队形形状表示方法、参考框架及编队控制策略等方面,对多机器人编队控制的研究成果进行了概述。同时,对队形形状生成、编队跟踪与协调、队形变换与重组以及编队避障等队形控制子问题的国内外研究近况进行了总结和分析。最终指出:研究统一有效的编队控制框架、障碍环境下的队形优化变换、降低系统对通讯能力的要求以及编队控制在实际物理环境下的应用是移动机器人队形控制领域未来可能的研究主题。

**关键词:**移动机器人;多机器人;队形控制;关键技术;发展现状

**中图分类号:**TP242.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2013)05-0381-14

中文引用格式:任立敏,王伟东,杜志江.移动机器人队形控制关键技术及其进展[J].智能系统学报,2013,8(5):381-394.

英文引用格式:REN Limin, WANG Weidong, DU Zhijiang. Key Technologies and development of formation control of mobile robots [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(5): 381-394.

## Key technologies and development of formation control of mobile robots

REN Limin<sup>1,2</sup>, WANG Weidong<sup>1</sup>, DU Zhijiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 2. College of Mechanical Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China)

**Abstract:** On the basis of defining the present development of multi-robot formation control at home and abroad, with ground mobile robots as the research object, the research achievements on the multi-robot formation control are described in aspects of system structure, robot model, the formation shape representation method, reference frame and formation control strategy. In addition, the present domestic and foreign researches on such sub-problems of formation control as the generation of formation shape, formation tracking and coordination, formation change, recombination and formation, obstacle avoidance are also summarized and analyzed. It is pointed out finally that the uniform and effective formation control frame, formation optimization and change in the obstacle environment, reducing system requirements on communication and the application of formation control in the actual physical environment are the future possible research topics.

**Keywords:** mobile robot; multi-robot; formation control; key technology; present development

几十年来,队形控制已经成为多机器人系统(multi-robot system, MRS)研究领域中最重要问题之一。队形控制是指一组机器人向目标点协调运动的过程中,形成并维持某一队形形状,同时适应当前工作环境的约束(如障碍物或空间的物理限制)。吸引研究人员对这一问题不断展开深入研究的原因包括来自于生物学的灵感、多机器人系统带来的控

制问题的挑战及近年来对多机器人系统应用需求的不断增加。上述因素促进了多机器人系统及其队形控制技术不断向前发展。1997年以后,一些机器人研究工作者对多机器人系统的研究进展进行了全面深入地总结<sup>[1-3]</sup>,其中Chen和Wang于2005年在知名国际会议IROS上给出了队形控制的详细综述<sup>[4]</sup>,K. Kanjanawanishkul则以面向问题的原则对队形控制进行了总结<sup>[5]</sup>。不同于上述文献,本文将研究范围限制于地面移动机器人队形控制领域,主要关注近几年地面移动机器人队形控制相关技术的发展状况,对队形控制中涉及到的关键技术及重点研究问

收稿日期:2013-02-23. 网络出版日期:2013-09-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61105088).

通信作者:杜志江. E-mail: Duzj01@hit.edu.cn.

题进行总结,目的在于:1)通过本文可以比较容易地衡量队形控制的发展状况,并了解每个队形控制子问题尚未解决的困难,以鼓励研究人员对这些问题做出更大的贡献;2)目前有关队形控制的文献普遍将队形控制方法划分为3种主要的策略,分别为领航-跟随法、虚拟结构法和基于行为法<sup>[6-8]</sup>,然而,近几年队形控制领域出现的许多新颖方法不一定能完全融入到这3种策略中;为此,本文提出按照关键技术的划分方法,为多机器人队形控制问题提供了更广泛、更清晰的视野.同时对队形控制的重点研究问题、近年来的主要进展和部分有代表性的成果进行介绍,为国内从事队形控制研究的科研人员提供一定的参考.

## 1 队形控制需要解决的关键技术

队形控制研究过程中的关键技术可以划分为:1)群体体系结构,即队形控制依赖的基础结构和协调框架,这对于整个队形控制来说是非常关键的;2)机器人模型,用于描述机器人的本质和行为,机器人模型不同,所采用的队形控制策略也是不一样的;3)队形形状表示,编队控制中常用的队形形状有直线形、柱形、楔形和菱形等,需要一种明确有效的方法来表示具体的队形形状;4)参考类型,对于某一指定的具体队形形状来说,每个成员机器人在队形中都有其具体的期望位置,因而需要根据队形形状和其他机器人的位置计算其在队形中的正确位置;5)队形控制策略,需要设计合理有效的运动控制策略,驱动个体机器人运动到各自的期望队形位置处.下面针对上述队形控制关键技术对现有文献成果进行分析和总结.

### 1.1 群体体系结构

传统的多机器人编队技术按群体的体系结构可以分为集中式和分布式2种,如图1(a)、(b)所示.

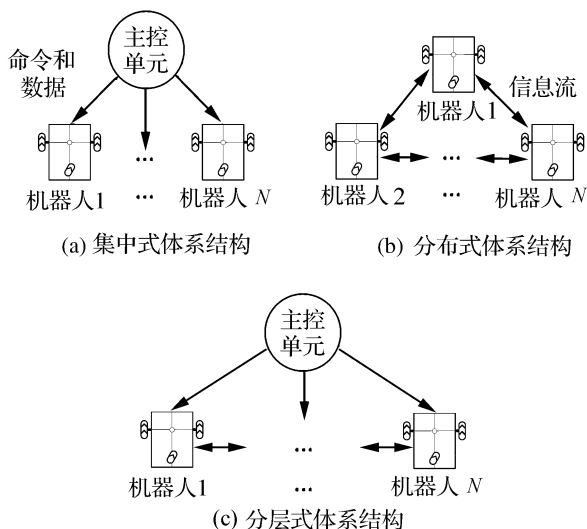


图1 多机器人编队常用的体系结构

Fig.1 The common architectures of multi robot formation

#### 1.1.1 集中式体系结构

集中式体系结构中,由某一关键的核心单元做出决策并与团队中的其他机器人进行通讯,该核心单元可以优化机器人的协调,容纳单个机器人的故障并监视任务的完成情况.然而,缺点在于核心单元出现的任何故障都可能引起整个系统的失败.此外,集中式方法不能很好地进行扩展,这是由于随着队形中机器人成员数目的增加,将会导致巨大的通讯开销,即使采用最先进的优化求解器也不能很好解决该问题.G. L. Mariottini<sup>[9]</sup>应用了集中式反馈线性化控制策略和扩展卡尔曼滤波技术实现了期望的队形.Huang<sup>[10]</sup>研究了一种长距离导航的集中式定位和控制方法,用于解决一组异构移动机器人跟随leader的运动,该算法允许跟随机器人配置最少的传感器且计算简单,因此适合于高风险的任务中.C. D. Cruz<sup>[11]</sup>提出了集中式控制方案和PD控制器来实现速度跟踪.H. Mehrjerdi等<sup>[12]</sup>提出了一种基于模糊模型的集中式智能协调控制和轨迹跟踪算法,并在一组移动机器人上进行了测试,设计的模糊模型应用了2种行为:轨迹跟踪和协调,这2种行为协调工作,使机器人可以沿先前定义的轨迹编队运行.

#### 1.1.2 分布式体系结构

分布式体系结构是指在机器人团队的控制结构中没有任何的集中组织,单个机器人根据局部传感器和通讯等信息进行自主决策,相对来说控制地位平等.这类系统的优点在于对单个机器人成员的故障或丢失具有鲁棒性和可扩展性,并且不易受通讯和计算误差的影响.然而,分布式体系结构无法进行智能集中决策是影响其在实际环境下应用的一个主要障碍.T. Keviczky等<sup>[13]</sup>提出了一种分布式的方法,该方法中每个机器人在每个采样周期只对自身及相邻机器人进行局部优化.T. Keviczky等<sup>[14]</sup>还应用混合整数线性规划法来求解分布式滚动时域规划器,该方法为每个机器人分配了一个时间序列,在这个时间内机器人计算其动态可行无碰撞轨迹.W. Ren和N. Sorensen<sup>[15]</sup>提出了一种分布式队形控制方法,该方法可以适应任意的群体leader数目,也允许内部的机器人在队形状态估计层和车辆控制层的耦合,由于群体leader数目的增加,该方法对于leader的单点故障具有鲁棒性.M. Defoort等<sup>[16]</sup>为带有传感器和通讯网络限制的一组移动机器人提出了一种分散式滚动时域运动规划器,该方法的优点在于每个小车只需要其相邻车辆的局部信息.Lee和Chong<sup>[17]</sup>提出了一种分散式领航参考法和邻居参考方法,用于一组执行协调任务的匿名移动机器人的队形控制.A. K. Ray<sup>[18]</sup>采用了一种分布式无碰撞的智能协调和导航算法,该方法中每个智能体依赖队形中主智能体的运动主动性来在线决策其行为.在

上述方法中,任何智能体都可以估计队形中其他智能体的行为,因此降低了单个智能体对决策的智能体的依赖性。

### 1.1.3 分层式混合体系结构

此外,除了上述2种控制结构外,也有一些研究者提出了分层式混合控制体系结构,如分层队形控制和树形结构编队控制。在某种意义上,分层队形控制和树形结构编队类似,图2给出了分层编队的一些例子。分层控制的特点是:1)各机器人以分布式方式控制;2)整个机器人团队以集中方式控制;3)可以为一大类队形设计控制策略,而不是局限于某种具体的队形方式。分层队形控制结构最大的优点在于该结构使用了集中和分布相结合的方式,如图1(c)所示,可以由 leader 或 supervisor 控制队形中运动的机器人团队,也可以人工控制或半自主地控制机器人团队;另外一个优点是分层队形可以降低复杂性。

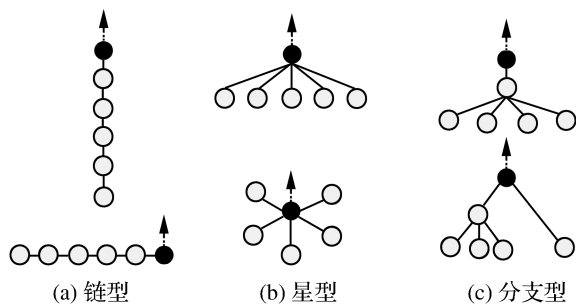


图2 分层控制结构实例

Fig.2 Examples of hierarchical control structure

文献[19]讨论了如何通过多机器人系统保持树状队形完成室内环境遇难者的救援工作;文献[20]提出了一种自下而上的3层队形控制结构,最底层为单个机器人的运动学控制层,中间层为队形控制层,最高层为群体控制层,并应用该控制结构实现了队形控制和分布式导航;Shao在文献[21]中基于领航-跟随方法提出了一种自上而下的3层混合编队控制结构,分别为协调层、leader-follower 控制层和实体控制层,实现了多移动机器人的协调编队控制和避障任务。文献[22]提出一种4层混合结构的多机器人系统来完成保持队形的任务,这4层结构分别是:任务规划层、队形层、局部控制层和实体层。H. C. H. Hsu在文献[23]中也将机器人的队形控制抽象为队形形状、参考类型和机器人控制3层来进行研究。

## 1.2 机器人模型

在多机器人编队控制系统中,队形中每个机器人成员作为一个物理实体,它能作用于自身和环境,并能对环境作出反应。机器人模型的不同使得编队控制算法的设计和编队控制系统的分析方法不同,

通常应用的机器人模型包括以下3种。

### 1) 质点机器人模型。

质点机器人模型可以分为质点机器人的运动学方程和质点机器人的动力学方程2种,其公式分别为式(1)和(2)。

$$\dot{z}_i = u_i. \quad (1)$$

$$\dot{z}_i = v_i, \dot{v}_i = u_i. \quad (2)$$

式中:  $z_i$  表示机器人  $i$  的位置坐标,  $v_i$  为速度,  $u_i$  为控制输入,  $i=1,2,\dots,n$ 。

### 2) 非完整移动机器人模型。

机器人模型除了采用线性积分器模型之外,还有一类模型的关注度也很高,即如图3所示的含有非完整约束的差分驱动独轮车型机器人模型。H. Yamaguchi<sup>[24]</sup>及 Lin 等<sup>[25]</sup>考察了轮式小车的运动学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i, \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i, \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为小车  $i$  重心在  $X$ - $Y$  平面的位置坐标,  $\theta_i$  为前进的方向角,  $v_i$  为重心平移的线速度,  $\omega_i$  是小车重心处角速度的大小。该系统受约束于:①机器人以纯滚动方式运动;②不能在外切向滑动。编队控制通过设计  $v_i$  和  $\omega_i$  来实现。R. Ghabcheloo 等<sup>[26-27]</sup>则考察了该轮式小车的动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i, \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i, \\ \dot{\theta}_i = \omega_i, \\ \dot{v}_i = F_i/m_i, \\ \dot{\omega}_i = N_i/I_i, \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

式中:  $m$  是小车的质量,  $I_i$  为转动惯量,输入量  $F_i$  和  $N_i$  分别为控制的力和力矩。

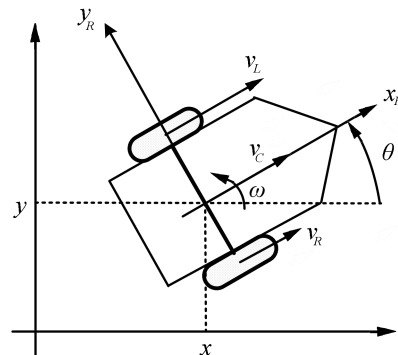


图3 独轮车型机器人模型

Fig.3 Unicycle-type robot model



以上的运动学或动力学模型都没有考虑轮子和地面之间的摩擦,假设轮子与地面之间的摩擦力可以用粘性摩擦及转动摩擦描述,文献[28]提出该类机器人的动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta, \\ \dot{y} = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega, \\ m\dot{v} = -\eta v + (\tau_1 + \tau_2)/b, \\ I\dot{\omega} = -\psi \omega + (\tau_1 - \tau_2)/b. \end{cases}$$

式中:  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别表示机器人左右驱动轮的驱动力矩(控制输入),  $m$  表示机器人的质量,  $I$  表示机器人关于质心的转动惯量,  $b$  为后轮半径,  $\eta$ 、 $\psi$  分别为粘性摩擦与转动摩擦系数,可通过实验获得不同地面的具体数值,详细的实验过程可参见文献[29].

### 3) 小汽车型机器人模型.

除了上述2种关注度比较高的模型外, M. Murray 和 S. S. Sastry<sup>[30]</sup> 最早考察一类小汽车型机器人的运动学模型.如图4所示,该模型由后轮在笛卡尔坐标系中的位置  $(x, y)$ 、机器人相对于水平方向的方向角  $\theta$ 、方向轮相对于车体的角度  $\varphi$  共同确定小汽车型机器人的运动状态,即  $(x, y, \varphi, \theta)$  构成了小汽车型机器人的状态量,而2个输入量为驱动轮和转向轮的速度.

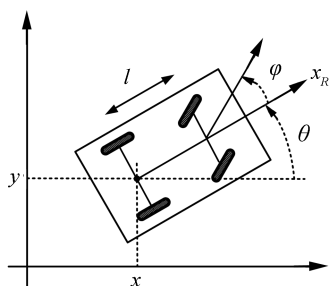


图4 小汽车型机器人模型

Fig.4 Car-type robot model

小汽车型机器人的约束来源于该机器人轮子的旋转与绕中轴拐弯,但是不能打滑.对前轮和驱动轮的约束由轮子的侧向速度为零来表征,用公式描述如下:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(x + l \cos \theta) \times \sin(\theta + \varphi) - \\ \frac{d}{dt}(y + l \sin \theta) \times \cos(\theta + \varphi) = 0, \\ \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0. \end{cases}$$

由上面的约束, M. Murray 和 S. S. Sastry 得到了该系统的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = u_1 \cos \theta, \\ \dot{y} = u_1 \sin \theta, \\ \dot{\varphi} = u_2, \\ \dot{\theta} = u_1 \frac{1}{l} \tan \varphi. \end{cases}$$

式中:  $u_1$  为驱动轮的前向速度,  $u_2$  为转向轮速度.

此外, Dong<sup>[31]</sup> 研究了非完整链式模式下的多智能体编队控制问题. Li<sup>[32]</sup> 提出了一种新的运动学模型,用笛卡儿坐标建模完成多机器人系统的队形控制.需要指出的是,现有文献中,对移动机器人编队控制问题的研究,基本上考虑的是机器人的运动学模型或简化的动力学模型,而在大范围空间中运动的机器人可以看作是质点,机器人内部的动力学特性常常被忽略.然而,在实际的应用中,这样做是不合理的,因为当机器人的质量较大或运动速度较快时,运动学模型无法反映机器人运动的真实情形.因此,有必要将机器人的动力学特性考虑在内,建立更为完整的机器人动力学模型.

### 1.3 队形形状表示

编队控制可以实现不同的队形形状,常见的有柱形(排形)、直线型、三角形、菱形、楔形以及圆形等,图5中给出了一些常见的队形形状.其中,圆形通常通过多边形来实现,如4个机器人组成的菱形和5个机器人组成的五边形.

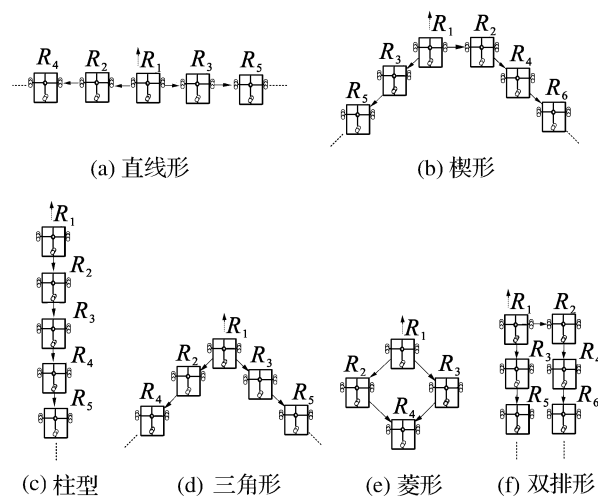


图5 编队控制中常见的队形形状

Fig.5 Common shapes in formation control

为了建立与维持某一队形形状,首要的问题是如何表示队形.对于具体队形形状表示方法,文献[33]提出了基于非循环有向图的控制图来表示机器人及其相邻机器人之间的关系,进而表示队形形状.文献[34]提出了虚拟结构的概念,将机器人看成一个刚体结构内部的点来表示队形形状.文献[35]

基于图论的方法提出了一种简单的队形表示方法,可以表示任意形状的队形,将每个机器人看成顶点,2个机器人之间的关系看成边,各个边之间的关系可以描述为  $E(c, sucID, preID, l, \varphi)$ . 文献[36]利用复杂多项式来表示队形,用多项式的根表示机器人的位置,系数表示队形,利用工作空间和队形空间来构造和求解多项式,并把多机器人系统看成一个整体来进行各个机器人的路径规划. 文献[37]把  $N$  个多机器人系统的队形问题看成是  $N-1$  个机器人跟踪领航机器人的问题,采用基于图论的方法保持队形,该方法不需要全局知识,具有较好的适应性.

然而,上述文献中还没有形成统一有效的队形表示框架,来统一描述机器人编队中的各种队形形状,使得灵活的队形控制难以实现. 为此,合理的队形表示方法还有待于进一步地研究开发.

#### 1.4 参考类型

为了维持指定队形形状,机器人需要参考其他机器人的位置计算其在队形中的期望位置,称之为参考类型. 一般情况下,队形中的每个机器人可以根据其内部状态进行区别,通常通过每个机器人的身份号(ID)来区分队形中的各个成员. 文献[38]中给出了3种确定队形中成员机器人期望位置的方法:1)质点重心参考法. 每个机器人与队形的质心点保持期望的相对位置,该点是队形中包括的所有机器人的  $x$  和  $y$  坐标的平均值;2)领航参考法. 每个机器人(除了领航机器人)与领航机器人保持期望的相对位置;3)邻居参考法. 每个机器人与一个或几个其他预先定义的机器人保持期望的相对位置. 如图6所示.

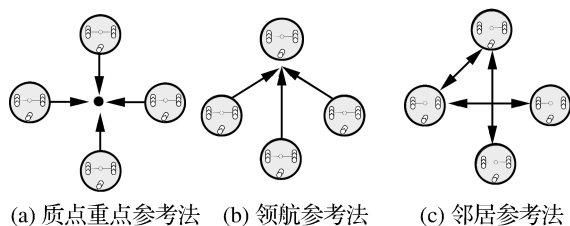


图6 3种典型的参考类型

Fig.6 Three typical reference types

在这3种参考类型中,领航参考法应用最广,该方法中一些跟随机器人与 leader 维持队形,而这些机器人又可以作为其他机器人的局部 leader,这样递归地形成了链式或树状的拓扑结构,在该参考类型中机器人根据 leader 或局部 leader 的位置计算其在队形中的位置. 例如,文献[39]以朋友作为参考,通过期望角度保持队形;文献[33]基于控制图的有向边来表示 leader 和 follower 之间的关系. 除了领航参考法外,还有一些特别的参考类型不需要参考机

器人来计算机器人的位置,如文献[34]通过在虚拟结构中设置多个点来确定机器人的位置;文献[40]中机器人通过一个公共参考点来确定其在队形中的正确位置;文献[41]中机器人根据其所在的队列和相应队列中的其他机器人确定自身位置.

参考类型在队形控制中起着关键的作用,不同的参考类型形成的队形性能不同. 文献[38]研究了90°转弯和通过障碍区时,不同的队形形状基于质点重心参考法和领航参考法2种不同的参考类型具有不同的性能. 文献[33]对比了 SBC 控制器(separation-bearing 控制,与一个相邻机器人通过距离和角度保持队形)和 SSC 控制器(separation-separation 控制,与2个相邻机器人通过2个距离保持队形)的队形位置误差. 文献[42]研究了在相同队形形状表示和相同机器人控制策略下,应用不同参考类型引起的队形偏差,并根据分析结果在上述3种参考类型的基础上提出了4种混合的参考类型,并给出了参考类型选择的建议.

#### 1.5 队形控制策略

##### 1.5.1 3种主流队形控制策略

现有的队形控制方法中主流的编队策略主要有3种:领航-跟随法、基于行为法和虚拟结构法.

1) 相对来说,领航-跟随法在移动机器人编队控制领域中应用的较为广泛,该方法最早是由 T. Balch 和 R. C. Arkin<sup>[38]</sup>在1998年提出来的,然后 J. P. Desai<sup>[43]</sup>在1998年首先提出了领航-跟随队形控制框架,将跟随机器人相对于领航机器人的位姿由  $(l-\varphi)$  模型或者  $(l-l)$  模型确定,这2种模型的示意图如图7所示,且他的方法在2001年得到了进一步的发展<sup>[44]</sup>. 领航-跟随法中最普遍的控制技术是由 A. K. Das 提出的反馈线性化技术<sup>[33]</sup>.

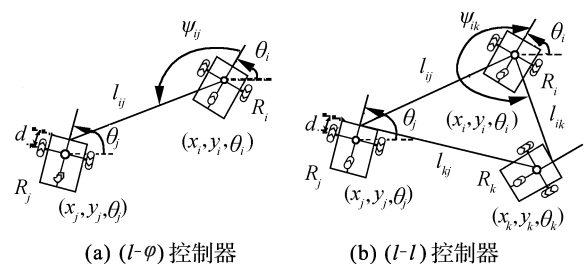


图7 Desai 提出的2种经典控制器

Fig.7 Two classical controller presented by Desai

2) 基于行为法是为每个机器人设计一些期望的行为,几种可能的行为包括轨迹跟踪、搜索目标、队形保持、队形变换、避障和避碰等,最终的行为是通过对每个行为的重要性进行加权比较确定,其原理示意图如图8所示.

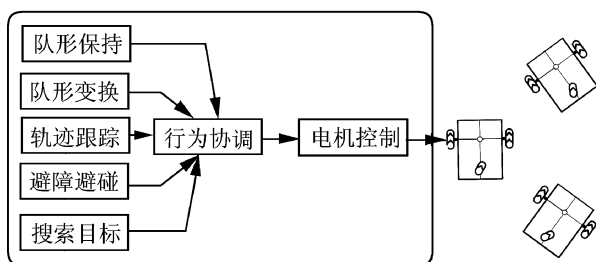


图8 基于行为法

Fig.8 The behavior-based approach

3) 虚拟结构方法将整个队形看成单个的虚拟刚体结构,队形中每个成员将刚体上的节点作为跟踪的虚拟目标,该虚拟节点的运动是由用于确定期望队形几何形状的队形函数来控制,如图9所示。虚拟结构法被普遍认为是一种较精确的队形控制方法,且主要用于队形控制目标非常精确且要表达成为一个整体的情况下。

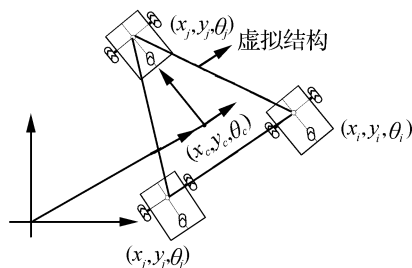


图9 虚拟结构法原理

Fig.9 The virtual-structure approach

目前,这3种主流编队策略的技术发展已经非常成熟了,为此,本文只将这3种方法的优缺点概括如表1所示,具体可参考文献[1-8]。

表1 现有主流编队控制策略的优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages among the existing common formation control strategies

编队方法	优点	缺点
领航-跟随法	数学分析简单、机器人群体运动高效安全、易于保持队形	没有明确的队形反馈、鲁棒性差、对个体的依赖性强
基于行为法	分布式编队方法、适应能力强、系统具有明确的队形反馈	无法明确描述系统整体行为、难以进行数学分析、稳定性无法保证
虚拟结构法	整个群体的协调行为容易描述	灵活性差

### 1.5.2 新兴的队形控制策略

本节重点对近年来一些新兴的编队控制方法进行介绍,主要包括基于图论的控制策略、模型预测控制策略和智能控制策略。

1) 近年来,图论被应用到多机器人队形控制中<sup>[45-47]</sup>。该方法将每个机器人看成是顶点,机器人之间的关系(控制、传感、通讯流)看成是边,这样队形可以被描述成图,系统之间的通讯连接被描述成为拉普拉斯矩阵。多机器人系统的稳定性由每个机器人的稳定性来保证。然而,这种方法只能局限于线性机器人模型。文献[48]中 Dong 应用图论的方法为非完整移动机器人编队提出了2种控制器。第1个控制器中,机器人的模型通过动态反馈线性化被转化成线性的模型。第2个控制器借助于时间缩放技术和拉普拉斯矩阵的性质,克服了前一个控制器的奇异性。文献[49]提出了基于一致原理的控制策略实现多移动机器人编队,应用加权图获得期望的队形形状并实现机器人之间的避障,并将该控制策略扩展用来避开环境中障碍。基于图论的方法是将队形的结构以各种图的结构来表示,并以图为基础进行分析和控制。这种方法的优点是利用图能表示任意队形,且有图论成熟的形式化理论作为基础;缺点是主要限于仿真研究,实现起来比较困难。

2) 模型预测控制(model predictive control, MPC),也称为滚动时域控制,在过去的几十年里受到了控制领域研究人员极大的关注。作为解决多变量约束控制问题的有效方法,MPC已经出现在工业中超过20年了,并且处处可见其成功应用的实例。由于MPC强大的约束处理能力,可以将移动机器人的非完整约束放入模型预测控制的框架中,使得MPC对于多机器人协调控制,尤其是队形控制问题来说是一项很有前途的技术。目前,很多研究者已经将MPC应用到编队控制中。K. Wesselowski 和 R. Fierro<sup>[50]</sup>提出了将MPC控制器用于机器人队形控制,通过将终端的状态约束在终态区域内,并且在终态区域的边界上切换为稳定的终态控制器,以保证队形的稳定性。由于在具体的终态约束集合内,切换为稳定的终态控制器,因此提出的MPC算法是双模的。该双模MPC算法,实现了稳定性,放松了可行性。对于稳定的终态控制器的选择方面,文献[50]采用了输入输出反馈线性化控制器,文献[51]应用了鲁棒队形控制器。文献[52]在文献[53]的基础上,将提出的FSC-MPC用于处理领航-跟随机器人编队控制和避障问题,利用FSC-MPC的同时跟踪和点镇定的能力,使得当领航机器人执行突然停止或向后运动行为时,跟随机器人可以跟踪领航机器人的



同时维持期望的队形.Chen等在文献[54]中通过适当设计的RH程序,提出了RH-LF控制方案,将RH控制策略应用到领航-跟随方法中,以改进定义的队形跟踪误差的收敛速度,使得机器人的队形跟踪误差在终态区域内实现了指数收敛速度,快速的收敛速度直接影响整个队形的性能.最近,Dai等<sup>[55]</sup>基于非完整移动机器人的相对运动状态构建了一种leader-waypoint-follower队形控制结构,同时为了形成期望的队形,在文献[54]的基础上,将轨迹跟踪控制方法与RH控制方法相结合,使跟踪误差稳定的同时保证了跟踪误差有效收敛到零.

目前的编队预测控制策略为了减小寻找终端域的难度,考虑的主要是机器人运动学模型,研究动力学模型的优化控制策略将是未来的发展趋势之一.

3)智能控制通过模仿人类大脑将相似的事物放在一起进行决策,因而在决策过程中具有较快的相应速度和精确的响应时间.智能控制器简化了模型控制器的计算量,这在多移动机器人建模方面具有明显的优势,近年来也得到了广泛的应用.M. Sisto和D. Gu<sup>[56]</sup>提出了模糊队形保持控制器和模糊避障控制器用于队形保持和避障,同时在高层设计了模糊协调策略来协调队形保持和避障2种行为.A. Bazoula<sup>[57]</sup>提出了模糊距离-角度控制器进行队形控制.T. Dierks和S. Jagannathan<sup>[58]</sup>基于反演法提出了运动学/力矩联合输出反馈控制律,用于基于leader-follower的队形控制.对于基于运动学的控制器,该方法将机器人和队形动力学考虑进来,设计了神经网络观测器,用于估计跟随机器人及其leader的线速度和角速度,并应用Lyapunov理论证明了整个队形是一致最终有界的.H. Mehrjerdi等<sup>[12]</sup>提出了模糊协调和轨迹跟踪算法,该算法基于模糊控制和PID的分层控制器,以控制机器人沿着预定义的轨迹编队运动;但应用到机器人上的模糊规则受到运动学的限制,即线速度、角速度及轨迹的长度和曲率都是有界的.M. H. Amoozgar和K. Alipour<sup>[59]</sup>基于leader-follower策略提出了双级模糊逻辑系统用于非完整轮式移动机器人的队形控制.

## 2 队形控制子问题

本文将队形控制问题划分为队形形状生成、编队跟踪与协调、队形重组和选择以及编队避障4个子问题.以下对上述队形控制子问题的国内外研究近况进行总结和分析.

### 2.1 队形形状生成

许多队形控制研究的文献通常假设期望的队形形状是给定的,并且这些队形形状可以是任意的,但

是这种假设并不总是成立.因此,本节主要介绍如何形成并维持某一队形形状.队形生成过程和导航问题类似,为了形成某种队形方式,机器人需要将其自身导航至队形中的期望位置.对队形生成问题的解法大体可以分为2类:传统方法和势场法.

1)传统方法将该问题分解为3个步骤:路径规划、轨迹规划和机器人控制,控制律通过以上3个单独的步骤获得.然而,上述应用于移动机器人的传统方法普遍存在以下局限:①需要工作环境的全部信息;②这些方法只适用于离线的非实时任务中,而不适用于编队运动的实际应用.

2)势场法将上述3个步骤统一为一体,一旦构建了合适的势场函数,将自动确定反馈控制律.文献[60]提出了一种基于势场法的多机器人协调运动的队形形成方法,将其他机器人及障碍物看成不同的势力,并联合期望的队形形状,使队形中的机器人运动到期望的位置.N. E. Leonard和E. Fiorelli在文献[61]中考虑了2种类型的势场函数:相邻机器人之间的相互作用函数和虚拟领航机器人生成的势场函数;然而,该方法的缺点在于随着机器人数量的增加,将会出现局部最小.M. E. De Gennaro和A. Jadabaie在文献[62]中应用了分布式导航函数来驱动群体中每个机器人运动到由相对距离确定的队形结构中.

除了上述2种队形生成方法外,还有队形生成的其他方法.在文献[63]中,R. Fierro提出了允许机器人自主切换控制律的决策模块来实现期望的队形形状.Zhang在文献[64]中将队形动力学建模为Jacobi形状空间上的拉格朗日系统,形成的队形形状是平移和旋转不变的,并且独立于坐标系统.R. Olfati Saber和R. M. Murray在文献[65]中提出了统一的图形理论框架,并正式定义了多车辆的队形及其镇定问题,该方法强调了图刚度和最小刚性图在结构化势场函数与多个队形操作中的重要作用.有关图论框架的刚性和持久性信息,可参考文献[66].

此外,一些研究人员探讨了如何控制集群编队形成某一队形形状的策略,集群编队将涉及到大量的机器人.其中,文献[67-70]研究了一队机器人集群形成某一队形,但并未指定每个机器人的确切位置的集群编队控制策略.而M. A. Hsieh等在文献[71]中提出了一种基于梯度的分散控制器,使一群机器人收敛于某些期望的二维边界曲线,同时通过局部的相互作用维持机器人的内部约束.

### 2.2 编队运动规划

编队运动规划可以看成是编队队形生成子问题的延伸,在队形控制的研究中占有很大的比例.编队

运动规划的目标是使一组机器人在维持期望队形形状的同时沿设定路线运行.关于编队运动规划问题的研究可以分成两大类:编队路径跟随和编队轨迹跟踪.通俗地讲,两者的主要区别在于前者的参考轨迹与时间无关,而后的参考轨迹与时间相关,前者是后者的特例.

1) 通常情况下,相比于轨迹跟踪,路径跟随可以更平滑地收敛到路径上,同时控制信号被推向饱和的可能性较小.A. P. Aguiar 等<sup>[72]</sup>证明了路径跟随问题中移除不稳定零动态所引起的性能局限性,指出了路径跟随和标准轨迹跟踪的差别.刘爽等<sup>[73]</sup>对多机器人协调运动规划进行了研究,该方法将多机器人沿设定路径的运动规划问题转化为一个速度优化问题,建立了一个优化函数表示编队约束和速度边界约束,并使用数学工具 LINGO 进行了计算求解,同时为了应对紧急避障的情况提出了一种在线调整运动规划的方法,实验结果表明机器人能按照设定路线完成编队任务,并且满足速度约束和避障约束.

2) 多移动机器人轨迹跟踪问题的求解,通常通过设计控制律使机器人跟踪预定义的某条可行轨迹,该轨迹指定了位置、方向、速度和加速度随时间的变化.轨迹跟踪控制问题常用的控制策略是 leader-following 方法<sup>[33,74-75]</sup>,此外,基于滚动时域的优化方法<sup>[76]</sup>和基于图论的策略<sup>[77-79]</sup>也有应用.文献[80]提出了基于合成控制律解决多移动机器人轨迹跟踪的同时维持时变的队形,每个机器人跟踪期望的轨迹,同时与附近的 2 个机器人合成其运动来维持队形.

路径跟随问题需要解决的是设计控制律,使机器人从给定的初始位置出发,到达并跟随指定的几何路径,该路径是一个连续的标量  $s$  参数化的流形,同时第 2 个目标是使沿着路径运动的机器人满足一些额外的动力学指标,如时间、速度和角速度等任务.对于路径跟随问题的解决方法有 2 种,即协调路径跟随法和虚拟结构法.协调路径跟随方法中,队形中每个机器人成员都需要单独的参数化参考路径,当所有路径的参数同步时就形成了队形;而虚拟结构法需要计算虚拟 leader 的路径作为实际机器人跟随的参考点来实现编队.文献[81]中的队形形式方法使一组轮式移动机器人沿着给定的空间路径运动的同时,能满足双向通讯约束.J. Ghomman 等<sup>[82]</sup>基于虚拟结构和路径跟随方法提出了一组非完整移动机器人的协调控制律,将路径参数的导数作为一个附加的控制输入来同步队形运动;然而,这种方法需要假设每个机器人都能将其状态和参考路径发送到队形中的其他机器人成员,同时也能够接收到其他

机器人成员的状态和参考路径信息.K. D. Do<sup>[83]</sup>设计了协调控制器,使带有传感器范围限制的移动机器人成功完成期望的编队跟踪任务,并且应用势场函数保证了机器人之间不碰撞,同时也考虑了机器人的物理尺寸和动力学特性.Xiang 等在文献[84]中同时解决了路径跟随控制、避障及多个非完整自主测量在队形约束下的无避碰协调问题.

最近,H. Mehrjerdi 在文献[12,85-86]中研究了一组移动机器人在未知环境下的控制与协调问题,在虚拟结构中分别应用 Lyapunov 技术、最优模糊神经技术和模糊智能技术,提出了多移动机器人协调跟踪算法,使机器人既能沿预定的轨迹运动的同时,又能以一定队形方式编队到达各自的目标位置.H. Mehrjerdi<sup>[87]</sup>还考虑了在队形协调跟踪基础上的避障问题,应用关野型模糊模型提出了模糊避碰协调算法,有效解决了机器人与障碍物之间的避障以及多移动机器人之间的避碰问题,使多移动机器人能够同时执行路径跟随、避障和群体协调任务.

### 2.3 队形变换和选择

在许多应用场合,有时由于协调任务的指标或环境条件的变化需要改变队形形状,如图 10 所示为随着环境变化的队形变换示意图.

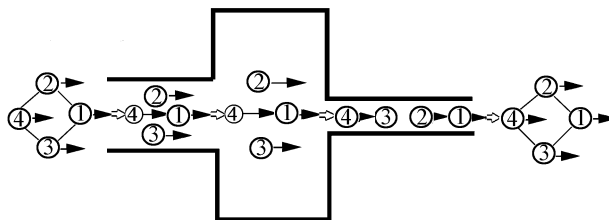


图 10 障碍环境下的动态队形切换

Fig.10 Dynamic formation switch in obstacle environment

该研究领域需要考虑的主要问题有:1) 队形选择:对于具体的编队任务,机器人团队应该选择何种初始队形;2) 控制策略:采用什么样的策略形成指定的队形形状;3) 变换条件:在什么样的条件下应该发生队形变换;4) 优化变换:是否存在适应当前环境约束的最优队形变换方式.学者们围绕上述问题展开了相应的研究.A. K. Das 等在文献[33]中研究了在不同的刚性队形之间进行队形切换,跟随机器人通过简单分散控制器之间的切换实现队形变换,同时跟随机器人跟随领航机器人或执行具体任务.J. P. Desai<sup>[88]</sup>提出了基于图论的方法用于协调 2 种队形之间的变换,并举例子来验证提出的一般性方法,同时给出了一队机器人为了避障自动变换队形形状的方法和其控制图.R. Fierro 等<sup>[63]</sup>用一种混合的方法分析该问题,设计了基于输入输出反馈线



性化的连续状态控制算法,每个机器人可以与其相邻的机器人维持期望的距离和角度,同时应用基本行为顺序合成的离散队形控制实现期望的队形,根据传感器约束和障碍物的存在以有限状态机的方式确定切换顺序.然而,上述文献中提出的控制策略将随着队形中机器人数的增加而变得复杂.J. McClintock 和 R. Fierro<sup>[89]</sup>研究了何时发生队形变换的问题,机器人从给定的队形集合中选择一个可以运行于当前环境的同时,并使队形误差最小的队形方式进行变换,路径规划器在总的运行距离和不太理想的队形上运动的距离之间权衡,搜索出最优的路径.

如何选择合理的队形形状的问题,主要依赖于动态的情况(如环境的变化和动态的任务),该问题目前还没有得到深入的研究,也没有统一的理论来解决这个问题.M. A. Haque 和 M. Egerstedt 在文献[90]中对宽吻海豚的行为进行建模:各智能体在捕食阶段,为了捕捉到猎物,必须选择大圆形或小圆形队形,这个过程应用了混合控制策略和分布式网络控制方法.最近,M. Di Rocco 等<sup>[91]</sup>提出了一种选择最优队形形状的方法,该方法通过使某些与任务和环境相关的性能指标达到最大化来在线选择队形集合中最优的队形形状.S. Keshmiri 等<sup>[92]</sup>提出了一种几何方法解决障碍环境下机器人之间具有连通性保持的编队问题,该控制器在动态队形切换过程中具有一致性和稳定性.

## 2.4 编队避障

对于多机器人系统来说,向目标点运动过程中的避障问题是队形控制中需要考虑的另一个关键问题.多机器人编队避障的难点是:在障碍物约束的环境下,机器人既要维持整体队形,又要合理地避开环境中可能碰撞的障碍物,这使得移动机器人的编队避障控制问题变得更加复杂.

现有文献在多机器人编队运动过程中遇到障碍物时,其处理方法通常包括以下几种方式:1)编队中各机器人自主避障.文献[93]中编队遇到障碍物时的处理方法是各机器人采取自主避障的方式,即被障碍物遮挡的机器人选择合适的避障方法绕开障碍物,从而降低了对编队中其他机器人造成的影响;2)保持队形整体避障.文献[94]中组成三角形队形的机器人在遇到障碍物时保持编队形状不变,通过判断与障碍物之间的位置关系和环境信息,采用整体移动或穿插的方式躲避障碍物,但是这种方法对障碍物与可行区域的要求较高,现实环境中并不总是存在可行解;3)队形变换或拆分重组避障方式.文献[95]提出将队形中的机器人根据需要或事先设定策略将队形由原来的一个大三角形队形拆分成一

组小三角形与一组直线形的编队运动.

除了上述方法外,文献[96]提出了一种基于导航函数的避障编队控制器,并从理论上证明了闭环系统的稳定性和安全性.文献[97]提出了分层的队形控制结构,用来同时处理编队、导航及避障问题,高层的监督层处理编队控制及必要的通讯,低层的导航层包含漫游和避障2种行为,为机器人提供导航能力,并提出了一种基于领导关系交换的动态角色切换方法,以解决跟随机器人的避障问题.文献[98]提出了一种基于MPC分散式协调避障导航方法,用于处理未知静态环境下基于有限感知和通讯能力的多机器人协调避障问题,并在实际的物理机器人平台上进行了实验验证.

## 3 总结与展望

近年来,多移动机器人的编队控制技术虽然得到了迅速的发展,但是编队控制作为多机器人系统的一个研究领域,一些问题在理论和实际中还没有得到很好的解决,其理论框架和实现方法均需要进一步完善,还有很多重要但研究较少的问题值得学者们进行深入研究.多移动机器人编队控制领域未来可能的研究主题如下.

### 1) 统一有效的编队控制框架.

没有统一有效的编队控制框架来协调编队和控制算法,使得灵活的队形控制难以实现.由于队形控制问题可能由几个子任务组成,传统的控制理论由于其单一的控制模式而无法应用.为此,十分需要一种高层的协调协议来处理控制理论单个操作模式之间的切换问题,有关混合系统的研究中将连续控制器和离散的协议进行集成,这朝着正确的方向迈出了一步.然而,这些技术忽略了队形控制中至关重要的分布式计算和通讯渠道等问题.另外还需要处理其他许多问题,如稳定性和可达性分析、混合控制算法设计和状态估计等.

### 2) 队形控制器的性能优化.

现存的大多数队形控制方法主要考虑了稳定性,而对于控制器的性能优化则鲜有研究.队形控制中,对跟踪误差的快速收敛是关键而且是十分必要的,这是因为机器人的跟踪误差收敛速度会直接影响机器人小组队形控制的表现,因此需要研究同时改进跟踪速度和队形表现的控制律,以优化队形控制的性能.

### 3) 障碍环境下的队形优化变换.

编队控制现有的队形控制方法大多支持队形变换,但是这种变换通常是机器人小组由某一队形固定变换到另一队形的纯粹队形变换,属于静态队形

变换.然而,实际的机器人编队执行某种任务的过程中不可避免会遇到环境中的障碍物,为了避障机器人团队需要根据环境的约束而变换队形,本文将这种考虑环境约束的队形变换称为动态队形变换.目前,动态环境下的队形优化变换及重组的研究较少,没有统一的理论来处理这个问题.何时应该发生队形变换及队形变换的过程中如何选择合理的队形形状主要依赖于动态的情况(如环境的变化和动态的任务).此外,机器人从当前位置向新队形形状中位置运动的代价也是一个重要的问题,但是这一点也很少有文献关注.例如,J. P. Desai 在文献[44]中提出了基于图论的方法用于协调2种队形之间的变换,同时给出了一队机器人为了避障自动变换队形形状的方法和其控制图,但并没有给出选择最优队形形状的算法,在最终的三角形编队中6个机器人遇到障碍物时采用柱状或双列纵队运动以避障,这种变换方式没有考虑环境约束及队形变换时的性能优化问题.显然,机器人小组在编队向目标点运动的过程中,采用某种固定的静态队形变换不一定是最优的,因此需要研究障碍环境下 leader-follower 拓扑结构的动态生成原则.

#### 4)降低系统对通讯能力的要求.

高性能多移动机器人系统应当具有良好的内部通讯能力,理想的情况是,系统中所有的机器人之间都可以实现实时通信,从而每台机器人都可以根据自身和其他机器人的信息实时进行编队<sup>[2]</sup>.但目前的编队控制算法能够应用的前提一般是假设 leader 的全状态信息是已知的,然而在目前的技术条件下,这在实际的机器人控制中实现机器人之间的点对点实时通讯是很困难的,因此如何降低机器人内部之间的通讯开销也是一个关键的问题,比如可以研究仅需要 leader 的位置信息而不考虑 leader 速度和加速度信息的队形控制器,以提高整个系统的实时性.

#### 5)队形控制在实际物理环境下的应用.

多机器人编队技术在实际物理场景中的应用需要考虑很多实际的细节问题,这增加了实现的复杂性,是一项具有挑战性的工作.对机器人来说,与动态、变化的环境进行交互的能力是非常重要的,要求机器人必须能够处理现实环境中破坏队形的事件,这涉及到避障、队形变换和恢复等.此外,由于实验条件的限制和物理实验环境的复杂性,导致目前许多编队控制的相关理论和算法大部分仍是通过计算机仿真手段进行验证.因此,如何根据机器人的实际情况,将已有的编队控制理论和算法进一步在实际物理环境下应用也是一个亟待解决的重要问题.

## 参考文献:

- [1] CAO Y U, FUKUNAGA A S, KAHNG A B, et al. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pittsburgh, USA, 1995, 1: 226-234.
- [2] 原魁,李园,房立新.多移动机器人系统研究发展近况[J].自动化学报,2007,33(8):785-794.  
YUAN Kui, LI Yuan, FANG Lixin. Multiple mobile robot systems: a survey of recent work[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8): 785-794.
- [3] WANG Guanghua, LI Deyi, GAO Wenyan, et al. Study on formation control of multi-robot systems[C]//2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications. Hong Kong, China, 2013: 1335-1339.
- [4] CHEN Yangquan, WANG Zhongmin. Formation control: a review and a new consideration[C]//Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada, 2005: 3181-3186.
- [5] KANJANAWANISHKUL K. Formation control of mobile robots: survey [EB/OL]. [2012-06-26]. [http://web.eng.ubc.ac.th/~seminar/research/Journal/4\\_1/06.pdf](http://web.eng.ubc.ac.th/~seminar/research/Journal/4_1/06.pdf).
- [6] 苏治宝,陆际联.多移动机器人队形控制的研究方法[J].机器人,2003,25(1):88-91.  
SU Zhibao, LU Jilian. Research approach to formation control of multiple robots[J]. Robot, 2003, 25(1): 88-91.
- [7] 任德华,卢桂章.对队形控制的思考[J].控制与决策,2005,20(6):601-606.  
REN Dehua, LU Guizhang. Research thinking in formation control[J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 601-606.
- [8] 杨甜甜,刘志远,陈虹,等.移动机器人编队控制的研究现状与问题[J].智能系统学报,2007,2(4):21-27.  
YANG Tiantian, LIU Zhiyuan, CHENG Hong, et al. Formation control of mobile robots: state and open problems [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2(4): 21-27.
- [9] MARIOTTINI G L, PAPPAS G, PRATTICCHIZZO D, et al. Vision based localization of leader-follower formations[C]//Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville, Spain, 2005: 635-640.
- [10] HUANG Jiangyang, FARRITOR S M, QADI A, et al. Localization and follow-the-leader control of a heterogeneous group of mobile robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(2): 205-215.
- [11] CRUZ C D, CARELLI L R. Dynamic model based formation control and obstacle avoidance of multi-robot systems [J]. Robotica, 2008, 26(3): 345-356.
- [12] MEHRJERDI H, SAAD M, GHOMMAM J. Hierarchical fuzzy cooperative control and path following for a team of

- mobile robots [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(5): 907-917.
- [13] KEVICZKY T, BORELLI F, BALAS G. Decentralized receding horizon control for large scale dynamically decoupled systems [J]. Automatica, 2006, 42(12): 2105-2115.
- [14] KEVICZKY T, BORRELLI F, FREGENE K, et al. Decentralized receding horizon control and coordination of autonomous vehicle [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2008, 16(1): 19-32.
- [15] REN W, SORENSEN N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.
- [16] DEFOORT M, KOKOSY A, FLOQUET T W, et al. Motion planning for cooperative unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges: a distributed receding horizon approach [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(11): 1094-1106.
- [17] LEE G, CHONG N Y. Decentralized formation control for small-scale robot teams with anonymity [J]. Mechatronics, 2009, 19(1): 85-105.
- [18] RAY A K, BENAVIDEZ P, BEHERA L, et al. Decentralized motion coordination for a formation of rovers [J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(3): 369-381.
- [19] MATSUO Y, TAMURA Y. Tree formation multi-robot system for victim search in a devastated indoor space [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan, 2004: 1071-1076.
- [20] FIERRO R, SONG P, DAS A K, et al. A framework for scalable cooperative navigation of autonomous vehicles, Technical Report No. MS-CIS-01-09 [R]. Philadelphia, USA: University of Pennsylvania, 2001.
- [21] SHAO Jinyan, XIE Guangming, YU Junzhi, et al. Leader-following formation control of multiple mobile robots [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control. Limassol, Cyprus, 2005: 808-813.
- [22] CHIO T S, TARN T J. Rules and control strategies of multi-robot team moving in hierarchical formation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China, 2003: 2701-2706.
- [23] HSU H C H, LIU A. Multi-agent based formation control using a simple representation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Taipei, China, 2004: 276-281.
- [24] YAMAGUCHI H. A distributed motion coordination strategy for multiple nonholonomic mobile robots in cooperative hunting operations [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 43(4): 257-282.
- [25] LIN Z Y, FRANCIS B, MAGGIORE M. Necessary and sufficient graphical conditions for formation control of unicycles [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(1): 121-127.
- [26] GHABCHELOO R, PASCOAL A, SILVESTRIC C, et al. Nonlinear coordinated path following control of multiple wheeled robots with bidirectional communication constraints [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2007, 21(2\3): 133-137.
- [27] GHABCHELOO R, PASCOAL A, SILVESTRIC C, et al. Coordinated path following control of multiple wheeled robots with directed communication links [C]//Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville, Spain, 2005: 7084-7089.
- [28] JORGE L P P. Formation control for mobile robots: a tracking approach [D]. Albuquerque, USA: University of New Mexico, 2005.
- [29] REGMI A. Experimental implementation for mobile robots coordination [D]. Albuquerque, USA: University of New Mexico, 2004.
- [30] MURRAYR M, SASTRYS S S. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(5): 700-716.
- [31] DONG W J, GUO Y, FARRELI J A. Formation control of nonholonomic mobile robots [C]//Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, USA, 2006: 5602-5607.
- [32] LI X H, XIAO J Z, CAI Z J. Backstepping based multiple mobile robots formation control [C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada, 2005: 1313-1318.
- [33] DAS A K, FIERRO R, KUMAR V, et al. A vision-based formation control framework [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 813-825.
- [34] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures [J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4): 387-403.
- [35] HANY C H H, LIU A. Multi-agent based formation control using a simple representation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Taipei, China, 2004: 276-281.
- [36] KLODER S, HUTCHINSON S. Path planning for permutation-invariant multi-robot formations [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, 2005: 1809-1814.
- [37] SHAO Jinyan, XIE Guanming, YU Junzhi, et al. A tracking controller for motion coordination of multiple mobile robots [C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada, 2005: 1331-1336.
- [38] 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.



- [39] FREDSLUND J, MATARIC M J. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 837-846.
- [40] BARFOOT T D, CLARK C M. Motion planning for formations of mobile robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2004, 46(2): 65-78.
- [41] GE S S, FUA C H. Queues and artificial potential trenches for multi-robot formations[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(4): 646-656.
- [42] HSU H C H, LIU A. Applying various reference types to formation control of mobile robots[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2007, 23(5): 1499-1522.
- [43] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots[C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium, 1998: 2864-2869.
- [44] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(6): 905-908.
- [45] LAFFERRIERE G, CAUGHMAN J, WILLIAMS A. Graph theoretic methods in the stability of vehicle formations[C]//Proceedings of American Control Conference. Boston, USA, 2004, 4: 3729-3734.
- [46] FAX J A, MURRAY R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1465-1476.
- [47] CAO Ming, YU Changbin, ANDERSON B D O. Formation control using range-only measurements[J]. Automatica, 2011, 47(4): 776-781.
- [48] DONG Wenjie, GUO Yi. Formation control of nonholonomic mobile robots using graph theoretical methods[M]//GRUNDEL D, MURPHEY R, PARDALOS P, et al. Cooperative systems: control and optimization. Berlin/Heidelberg: Springer, 2007: 369-386.
- [49] FALCONI R, SABATTINI L, SECCHI C, et al. A graph-based collision-free distributed formation control strategy[C]//Proceedings of the 18th IFAC World Congress. Milano, Italy, 2011: 6011-6016.
- [50] WESSELOWSKI K, FIERRO R. A dual-mode model predictive controller for robot formations[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Maui, USA, 2003: 3615-3620.
- [51] MICHALSKA H, MAYNE D Q. Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(11): 1623-1633.
- [52] XIE Feng, FIERRO R. Stabilization of nonholonomic robot formations: a first-state contractive model predictive control approach[J]. Journal of Computing and Information Technology, 2009, 17(1): 37-50.
- [53] XIE Feng, FIERRO R. First-state contractive model predictive control of nonholonomic mobile robots[C]//Proceedings of the American Control Conference. Seattle, USA, 2008: 11-13.
- [54] CHEN Jian, SUN Dong, YANG Jie, et al. A leader-follower formation control of multiple nonholonomic mobile robots incorporating receding-horizon scheme[J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(6): 727-747.
- [55] DAI Yanyan, LEE S G. The leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2012, 10(2): 350-361.
- [56] SISTO M, GU Dongbing. A fuzzy leader-follower approach to formation control of multiple mobile robots[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China, 2006: 2515-2520.
- [57] BAZOULA A, DJOUAD A M S, MAAREF H. Formation control of multi-robots via fuzzy logic technique[J]. Journal of Computers, Communications and Control, 2008, 3(Suppl.): 179-184.
- [58] DIERKS T, JAGANNATHAN S. Neural network output feedback control of robot formations[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2010, 40(2): 383-399.
- [59] AMOOZGAR M H, ALIPOUR K L, SADATI S H. A fuzzy logic-based formation controller for wheeled mobile robots[J]. Industrial Robot, 2011, 38(3): 269-281.
- [60] SCHNEIDER F E, WILDERMUTH D, WOLF H L. Motion coordination in formations of multiple mobile robots using a potential field approach[M]//PARKER L E, BEKEY G, BARHEN J. Distributed autonomous robotic systems 4. Tokyo, Japan: Springer-Verlag, 2000: 306-314.
- [61] LEONARD N E, FIORELLI E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, USA, 2001, 3: 2968-2973.
- [62] DE GENNARO M C, JADBABAIE A. Formation control for a cooperative multi-agent system using decentralized navigation functions[C]//Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, USA: IEEE, 2006: 1346-1351.
- [63] FIERRO R, DAS A K, OSTROWSKI J P. Hybrid control of formations of robots[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea, 2001: 3672-3677.
- [64] ZHANG Fumin. Cooperative shape control of particle formations[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, USA, 2007: 2516-2521.
- [65] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Graph rigidity and

- distributed formation stabilization of multi-vehicle systems [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, USA, 2002: 2965-2971.
- [66] ANDERSON B, YU C, FIDAN B, et al. Rigid graph control architectures for autonomous formations [J]. IEEE Transactions on Control Systems Magazine, 2008, 28(6): 48-63.
- [67] BELTA C, KUMAR V. Abstraction and control for groups of robots [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 865-875.
- [68] MICHAEL N, KUMAR V. Planning and control of ensembles of robots with nonholonomic constraints [J]. International Journal of Robotics Research, 2009, 28(8): 962-975.
- [69] HOU S P, CHEAH C C. Multiplicative potential energy function for swarm control [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, USA, 2009: 4363-4368.
- [70] FREEMAN R A, YANG P, LYNCH K M. Distributed estimation and control of swarm formation statistics [C]//Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, USA, 2006: 749-755.
- [71] HSIEH M A, KUMAR V, CHAIMOWICZ L. Decentralized controllers for shape generation with robotic swarms [J]. Robotica, 2008, 26(5): 691-701.
- [72] AGUIAR A P, DACIC D B, HESPAHNA J P, et al. Path "following or reference" tracking? An answer relaxing the limits to performance [C]//Proceedings of the IFAC/EURO-N Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles. Lisbon, Portugal, 2004: 1-6.
- [73] LIU Shuang, SUN Dong, ZHU Changan. Coordinated motion planning for multiple mobile robots along designed paths with formation requirement [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2011, 16(6): 1021-1031.
- [74] MARIOTTINI G L, MORBIDI F, PRATTICCHIZZO D, et al. Leader-follower formations: uncalibrated vision-based localization and control [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy, 2007: 2403-2408.
- [75] GU Dongbing, HU Huosheng. A model predictive controller for robots to follow a virtual leader [J]. Robotica, 2009, 27(6): 905-913.
- [76] DUNBAR W B, MURRAY R M. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization [J]. Automatica, 2006, 42(4): 549-558.
- [77] DONG W, FARRELL J A. Consensus of multiple nonholonomic systems [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Cancun, Mexico, 2008: 2270-2275.
- [78] LAFFERRIERE G, WILLIAMS A, CAUGHMAN J. et al. Decentralized control of vehicle formations [J]. Systems & Control Letters, 2005, 54(9): 899-910.
- [79] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations [J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 505-512.
- [80] SANHOURY I M H, AMIN S H M, HUSAIN A R. Switching between formations for multiple mobile robots via synchronous controller [C]//2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. Malacca, Malaysia, 2012: 352-357.
- [81] GHABCHELOO R, PASCOAL A, SILVESTRE C, et al. Coordinated motion control of multiple autonomous underwater vehicles [C]//Proceedings of the International Workshop on Underwater Robotics. Genoa, Italy, 2005: 41-50.
- [82] GHOMMAN J, SAAD M, MNIF F. Formation path following control of unicycle-type mobile robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58(5): 727-736.
- [83] DO K D. Formation tracking control of unicycle-type mobile robots [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy, 2007: 2391-2396.
- [84] XIANG Xianbo, LAPIERRE L, JOUVENCEL B. Guidance based collision avoidance of coordinated nonholonomic autonomous vehicles [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, China, 2010: 6064-6069.
- [85] MEHRJERDIA H, GHOMMAM J, SAAD M. Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure [J]. Mechatronics, 2011, 21(7): 1147-1155.
- [86] MEHRJERDI H, SAAD M, GHOMMAM J, et al. Optimized neuro-fuzzy coordination for multiple four wheeled mobile robots [J]. Information Technology Journal, 2010, 9(8): 557-570.
- [87] MEHRJERDI H, SAAD M, GHOMMAM J. Multi mobile robots formation in presence of obstacles [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics. Istanbul, Turkey, 2011: 510-515.
- [88] DESAI J P. A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations [J]. Journal of Robotic Systems, 2002, 19(11): 511-525.
- [89] MCCLINTOCK J, FIERRO R. A hybrid system approach to formation reconfiguration in clutter environments [C]//Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation. Ajaccio, France, 2008: 83-88.
- [90] HAQUE M A, EGERSTEDT M. Decentralized formation selection mechanisms inspired by foraging bottlenose dolphins [C]//Proceedings of the Mathematical Theory of Networks and Systems. Blacksburg, USA, 2008: 1-6.
- [91] DI ROCCO M, PANZIERI S, PRIOLO A. Formation control through environment pattern recognition for a multi-robot architecture [C]//Proceedings of the 4<sup>th</sup> European

- Conference on Mobile Robots. Zagreb, Croatia, 2009: 241-246.
- [92] KESHMIRI S, PAYANDEH S. A centralized framework to multi-robots formation control: theory and application [C]//2010 International Conference on Collaborative Agents—Research and Development. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 85-98.
- [93] JOHNSON E N. Approaches to vision-based formation control [C]//Proceedings of the 43th IEEE International Conference on Decision and Control. Atlantis, Bahamas, 2004, 2: 1643-1648.
- [94] OGREN P, LEONARD N E. Obstacle avoidance in formation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China, 2003, 2: 2492-2497.
- [95] KEVICZKY T. Coordinated autonomous vehicle formations: decentralization, control synthesis and optimization [C]//Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, USA, 2006: 2022-2027.
- [96] 杨甜甜, 苏治宝, 刘进, 等. 多移动机器人避障编队控制 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(9): 215-218.  
YANG Tiantian, SU Zhibao, LIU Jin, et al. Formation control and obstacle avoidance for multiple mobile robots [J]. Computer Simulation, 2011, 28(9): 215-218.
- [97] KUPPAN C R M, SINGAPERUMAL M, NAGARAJAN T. Distributed formation planning and navigation framework for wheeled mobile robots [J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 11(9): 1501-1509.

- [98] HOY M, MATVEEV A S, SAVKIN A V. Collision free cooperative navigation of multiple wheeled robots in unknown cluttered environments [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(10): 1253-1266.

#### 作者简介:



任立敏, 女, 1982 年生, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为移动机器人智能控制与避障、多机器人编队技术。



王伟东, 男, 1978 年生, 讲师, 博士, 主要研究方向为移动机器人控制技术、非结构环境移动机器人。



杜志江, 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 中国机械工程学会高级会员, 中国自动化学会机器人委员会委员。主要研究方向为医疗机器人、工业机器人、危险环境作业机器人。先后主持和承担国家自然科学基金重点项目、国家“863”计划重点项目、国家科技重大专项以及省部级项目和横向合作项目 20 余项, 获国家技术发明二等奖 1 项、黑龙江省技术发明一等奖 1 项、二等奖 1 项。发表学术论文 100 余篇。

## 《智能系统学报》成为中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊

近日获悉, 经过定量遴选、学科专家评审和中国科学引文数据库来源期刊遴选委员会评议, 《智能系统学报》从 2013 年起成为中国科学引文数据库 (Chinese Science Citation Database, CSCD) 来源期刊。

中国科学引文数据库已经发展成为我国最具权威性的科学引文索引数据库——中国的《科学引文索引》(SCI), 具有发现我国重要研究成果的导航作用, 并广泛应用于科研绩效评价活动中。中国科学引文数据库收录中国出版的中、英文核心期刊 1100 余种, 覆盖范围为自然科学、工程技术、医学等学科领域。2007 年开始, 中国科学引文数据库与 Thomson-Reuters 集团合作, 中国科学引文数据库与 SCI 在同一平台上面向全球提供服务, 为全世界更多的科研人员了解中国的科研发展及动态, 推动我国科研成果在全球的传播提供了重要的渠道。

《智能系统学报》自 2006 年创刊以来, 本着“构建智能平台, 打造精品期刊”的理念, 立足现有优势资源, 吸引名家稿件, 在中国人工智能学会、哈尔滨工程大学以及社会各界的关怀和支持下迅速成长, 继成为中国科技核心期刊、中文核心期刊后, 再被 CSCD 数据库收录为来源期刊, 这必将极大地推动期刊的高水平发展, 并促进期刊在科学研究中发挥更为显著的作用。