

文章编号: 1001-0920(2005)06-0601-06

## 对队形控制的思考

任德华, 卢桂章

(南开大学 机器人及信息自动化研究所, 天津 300071)

**摘要:** 首先指出多机器人队形控制研究要解决的主要问题, 并较为完整地阐述了当前国内外相关研究的状况, 然后总结了队形控制的各种研究方法, 并指出当前队形控制研究中存在的一些问题以及在实际设计队形控制系统时应考虑的问题, 最后指出了今后的研究方向。

**关键词:** 多机器人系统; 队形控制; 合作控制

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A

### Thinking in formation control

REN De-hua, LU Gui-zhang

(Institute of Robotics and Information Automatic System, Nankai University, Tianjin 300071, China  
Correspondent: REN De-hua, E-mail: rdh@mail.nankai.edu.cn)

**Abstract:** An introduction in the field of multi-robot formation control is provided with a focus on the various methods that have been put forward by researchers. The works had been done in the field are reviewed. The various methods are described and compared. The something that is missing in current research and the factors that must be considered in designing a multi-robot formation system are pointed out. At last, the directions of further research are proposed.

**Key words:** multi-robot system; formation control; cooperative control

### 1 引言

队形控制的思想起源于人们从生物界观察到的现象: 处于弱势的一方围成一定的队形将老弱者保护起来, 并抵抗另一方的攻击; 捕食者组成一定的队形协助捕食猎物。这种队形是动物合作的一种方式, 以利于自身生存。

对于机器人系统而言, 多机器人之间保持一定的队形具有以下优点: 1) 能充分获取当前的环境信息, 对于实现侦察、搜寻、排雷、安全巡逻等有利。单个机器人的传感器获取信息的能力总是有限的, 如果每个机器人保持一定的队形, 分工合作获取自己周围的环境信息, 再进行信息融合, 便可迅速准确地感知整个群体所在区域环境信息。2) 在对抗性环境中能增强多机器人系统抵抗外界进攻的能力。3) 在一些具体任务中, 保持恰当的队形能加快任务的完成, 提高工作效率。4) 能提高系统的鲁棒性。另外从

某种意义上, 飞行器或卫星等也可以看作机器人, 因此研究多机器人的队形控制问题, 对于飞行器或卫星等的编队也有指导意义。

基于队形控制的多机器人系统在军事、娱乐、生产等各个领域具有广阔的应用前景, 自1990年以来受到众多研究者的广泛关注。特别是随着网络技术、通信技术、计算机科学等信息技术领域的长足进步, 使得单个机器人的处理能力、感知能力、通信能力大大增加, 并从实验室走向开放的自然环境, 这为多机器人队形控制的研究提供了一个良好的平台。美国研究机构对队形控制的研究比较早, Georgia Tech Mobile Robot Lab 结合 DARPA 的 UGV (unmanned ground vehicle) Demo II 研究了基于行为的队形控制方法<sup>[1]</sup>。University of Southern California 的 Robotics Research Lab 利用局部传感信息和交互进行队形控制<sup>[2]</sup>。Brigham Young

收稿日期: 2004-06-04; 修回日期: 2004-08-30

作者简介: 任德华(1976—), 男, 四川眉山人, 博士生, 从事智能机器人、多机器人系统等研究; 卢桂章(1938—), 男, 广东广州人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人、信息自动化系统等研究。

University 的 MAGICC 实验室在 Air Force Office of Scientific Research 的协助下, 对 UAV (unmanned aerial vehicle) 的队形作了深入研究<sup>[3,4]</sup>. 美国航空航天局 NASA 采用 Enhanced formation flying (EFF) 技术控制多个卫星, 使得航天编队飞行及空间虚拟探测成为可能<sup>[5]</sup>. 总之, 队形控制技术的研究是一个具有实用性和战略性的研究课题

本文讨论将着重于具有一定自主能力的地面移动机器人在 2 维平面内的队形控制问题. 其中有些方法同样适用于 3 维空间的队形控制

## 2 队形控制研究的问题

队形控制问题属多机器人系统的几何问题, 是指多个移动机器人在前进过程中, 整个机器人团队建立并保持预先决定的几何形态(即队形), 同时又要适应环境约束的控制技术. 队形控制中一般考虑空间位置的协调, 但在实际环境中还需考虑时间上的协调. 队形控制问题是一个典型的通用的多机器人协调问题, 也是机器人合作控制的重要内容. 该研究涉及机器人和多机器人体系结构、多机器人的协调与合作、多机器人路径规划、单个机器人以及多机器人学习、传感信息处理等方面的内容. 其中要解决的主要问题是:

- 1) 队形的生成问题: 如何形成指定队形;
- 2) 移动中队形保持问题: 在运动过程中如何保持队形不变, 即队形的稳定性问题;
- 3) 队形的伸缩、旋转控制问题: 如何在保持队形几何形状不变的条件下实现队形的扩张、收缩以及旋转控制;
- 4) 队形的切换问题: 如何顺利地各种基本队形中进行切换, 即从一种队形变换到另一种队形;
- 5) 队形的鲁棒性问题: 即增加、减少机器人时队形的保持与变换问题;
- 6) 队形可实现性的判断问题: 在环境约束以及机器人本身能力约束条件下哪些队形是可实现的;
- 7) 遇障碍时队形的拆分、重建、保持、切换问题: 在运动中遇见障碍物(静态或动态)时队形的控制问题, 如何根据不同障碍进行不同的处理, 以及如何实现各种处理方法;
- 8) 如何自适应地实现队形切换问题: 队形在何时改变, 如何改变以适应环境及任务的改变

针对以上提出的问题, 国内外学者进行了大量研究, 下面就当前的研究现状和主要研究方法进行概述

## 3 机器人队形控制的研究现状及主要方法

本节依据解决队形控制问题的不同思路, 总结

并分析了 6 种队形控制研究的主要方法

### 3.1 leader-follower 方法及其改进

leader-follower 方法首先在文献[6]中提出并用于移动机器人的队形控制. 在 leader-follower 中, 指定队形中的某一机器人作为 leader, 其他的机器人作为 followers. 其基本思想是, 将队形控制问题转化为 followers 跟踪 leader 的位置和方向的问题. 这样就可用标准的控制理论知识加以分析并稳定跟踪误差. leader-follower 有多种形式, 如: 队形中可有多个 leader; 或者形成一个跟踪链, 即第  $i$  个机器人跟踪第  $i-1$  个机器人; 或者 leader 与 follower 构成树状结构等.

文献[7]利用反馈线性化得到非完整约束机器人的轨迹跟踪控制法则. [8]利用平滑时变反馈控制法则构成一个开环链式的队形. [9]使用比例(P)算法和比例-积分-微分(PID)算法分别实现 leader-follower 方法. [10]中引入了合作的 leader-follower 方法, 即 follower 的运动不仅由其 leader 决定, 还受其他机器人(如自身的 followers)的影响. [11~13]也采用了 leader-follower 方法.

总之, leader-follower 方法是将队形中的机器人划分为两个互补的角色 leader 和 follower, 从而控制 follower 跟踪 leader 的轨迹以实现队形控制. 优点是队形的运动完全由 leader 的轨迹确定, 控制简单; 不足之处在于 leader 与 follower 相对独立, leader 不容易得到 follower 的跟踪误差反馈.

### 3.2 基于行为的队形控制

基于行为的控制器则是由一系列行为组成. 每个行为有自己的目标或任务, 其输入可以是机器人的传感信息, 也可以是系统中其他行为的输出; 其输出或送到机器人的效应器以控制机器人的运动, 或作为其他行为的输入, 从而构成了互相交互的行为网络. 此外, 每个行为允许有自己的内部状态. 设计基于行为的系统的主要问题是设计各种基本行为以及有效的行为协调机制<sup>[14]</sup>(即行为选择问题).

文献[15]中的“boid”采用 3 个局部行为 Collision Avoidance, Velocity Matching 和 Flock Centering. 仿真实现了整体的聚集行为. Jadbabaie 等<sup>[16]</sup>对此类行为进行了更加深入的分析 and 形式化, 提出了最近邻协调思想. [17]基于[16]中的思想, 使一组具有非完整约束的车辆呈现出类似于“boid”的聚集行为. Arkin 等<sup>[11]</sup>设计了机器人的基本行为, 采用 3 种位置参考点对 4 种基本队形进行了对比研究. 在此基础上, Balch 和 Hybinette<sup>[18]</sup>借用分子形成晶体的方法确定机器人在队形中的目标位置, 从而影响行为的选择. [19]采用 3 层(社会层、逻辑层和反

应层) 基于行为的控制体系结构, 应用 social roles 来代表机器人在队形中的位置, 并动态分配给机器人以形成和保持队形, 用局部通信来提高性能, 从而支持各种队形及其切换 [2, 13, 20, 21] 也采用了基于行为的方法

总之, 基于行为的控制方法主要是通过对机器人基本行为以及局部控制规则的设计使得机器人团体产生所需的整体行为 优点是并行性、分布性和实时性好; 缺点是难以明确设计出能合成指定队形的局部基本行为和局部控制规划, 另外队形控制的稳定性得不到保证

### 3.3 virtual structure

文献[22]提出了基于“virtual structure”即虚拟结构的方法, 其基本思想是将机器人团队的队形看作是一个刚体的虚拟结构, 每个机器人是虚拟结构上相对位置固定的一点 当队形移动时, 机器人跟踪对应刚体固定点的运动即可 基本算法是: 采用双向控制, 首先用虚拟结构尽量匹配各机器人的位置, 然后根据局部或全局生成的轨迹, 微调虚拟结构的位置和方向, 最后机器人确定各自的轨迹并调整速度以跟踪虚拟结构上的目标位置点 如此循环往复

文献[3, 4, 23]提出了加入队形反馈的虚拟结构(见图1)。

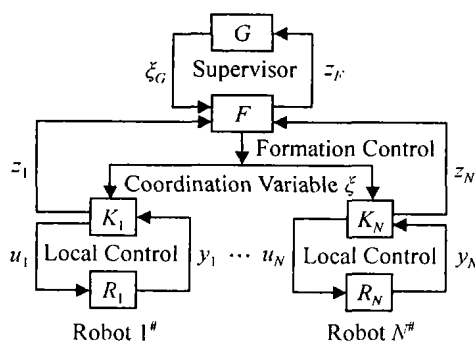


图1 带队形反馈的虚拟结构

图1中,  $R_i$  为队形中的第  $i$  个机器人;  $K_i$  为  $R_i$  的局部控制器;  $u_i$  和  $y_i$  分别为  $R_i$  的输入和输出;  $F$  为队形控制器, 输出队形协调变量;  $G$  为离散事件监控器, 输出  $\xi_G$  用于操纵队形 这种结构能包容 leader-follower 和基于行为的方法, 并且允许集中式或分布式的实现, 有明显的队形反馈机制 (Formation Feedback). [23] 中引入此结构对移动机器人队形控制进行了研究, [4] 将此种结构用于 UAV 的控制, 都取得了良好的效果, 提高了系统性能, 并保证了系统的稳定性

总之, 虚拟结构方法是用刚体的虚拟结构与结构中的固定位置点双向互动, 实现队形控制 优点是容易地指定机器人团体的行为(虚拟结构的行

为), 并可以进行队形反馈, 取得较高精度的轨迹跟踪效果 缺点是当前采用集中式实现, 要求队形按一个虚拟结构运动, 缺乏灵活性和适应性

### 3.4 基于图论的队形控制

该方法首先利用图上的节点表示机器人的动力学或运动学特性, 节点之间的边表示机器人相互之间的约束; 然后再用图论和控制理论知识对以图形表示的队形进行稳定性分析, 进而得到控制策略 此方面研究一般是将图论、控制理论及动态系统理论结合起来研究队形控制方法和稳定性

文献[24]用一个有向无环的控制图表示各机器人之间的依赖关系以及每一个机器人的控制策略 通过表达和枚举所有可能的控制图实现了多机器人在两个队形之间的切换 [25] 提出一种控制图指派算法, 并结合一个 4 层模块化体系结构来实现队形控制 [26] 定义队形为有权图  $G = (V, E, W)$ , 其中:  $V$  为点的集合, 每个顶点  $i$  代表一个机器人;  $E$  为边;  $W$  为权值, 指定了每条边在队形中的理想距离 采用 combinatorial graph rigidity 的概念设计得到边的权值总和最小的图, 从而唯一确定一个队形 [27] 将队形表示为互连无向图, 采用从理想队形的结构约束获得的势场函数对队形进行分析, 并设计了保证队形稳定的队形控制器 [28] 证明了采用图表示的队形的稳定性 Alexander 和 Richard<sup>[29-31]</sup> 应用图论将队形的稳定性与通信网络的拓扑结构联系起来, 指出如果机器人局部控制器稳定, 则队形的稳定性就取决于信息流的稳定性 Yohnnes 和 Gary<sup>[32]</sup> 分析了机器人信息流的更新率以及确切消息对队形稳定性的影响

总之, 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 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, 实现比较复杂

### 3.5 人工势场法

Khatib<sup>[33]</sup> 首先提出了人工势能, 其基本思想是借鉴物理学方面的概念, 环境中的障碍物对机器人产生排斥力, 目标点对机器人产生吸引力, 在合力的作用下机器人沿最小化势能的方向运动

文献[17]引入了“social potential”的概念进行队形控制 [34] 依据在一定范围内吸引远处的邻居并排斥离得太近的邻居的原则, 使用势场法, 通过“virtual leader”调整队形或控制队形的运动 [35] 利用人工势场和 virtual leader 作为内在的协调框架, 提出了控制队形运动的稳定策略 在[10]中每个机器人采用基于势场法的控制器, 并根据队形中其

他机器人的约束在线调节这些控制器 [27]将理想队形的约束表示为势场函数,研究了队形的稳定性及控制器的设计. [36]将环境的信息如邻居、障碍、威胁和目标等编码为一个势场函数,分析了队形的稳定即均衡,并仿真实现了利用多个机器人覆盖某一目标区域的任务

总之,人工势场法主要是通过设计人工势场和势场函数来表示环境以及队形中各机器人之间的约束关系,并以此为基础进行分析和控制;优点是计算简单,便于实现实时控制;缺点是存在局部极值点,势场函数的设计比较困难

### 3.6 模型预测控制(MPC)方法

传统控制方法主要用于具有明确模型和确定性环境的控制,而在现实中环境一般都是动态变化的,而且具有不确定性.模型预测控制顾及了动态环境的变化和过程的不确定性,用反复进行的有限优化代替了一次全局优化的结果,使预测控制在过程中实现了优化与反馈的理想结合以及对信息的充分利用,通过在线滚动优化并结合实时信息的反馈校正,使每一时刻的优化均建立在实际过程的基础上.预测模型、滚动优化以及反馈校正使得预测控制满足了许多实际需要,取得了很大成功. William<sup>[37]</sup>分析并设计了将模型预测控制用于多机器人队形控制的理论框架,同时研究了系统的稳定性、鲁棒性以及实时实现等问题. MPC方法具有较强的理论基础,但计算量较大,在实时计算、可扩展以及分布实现等方面还有待进一步的研究

上面每种方法都有各自的特点,在研究中往往将各种方法相互结合,取长补短.如一般情况下,基于行为的方法通常与基于势场的方法相结合,基于图论的方法常与 leader-follower 方法相结合等.目前国内的研究主要以基于行为的方法和 leader-follower 方法为主,如 [13, 21, 38],涉及机器人队形保持、避障以及队形生成<sup>[39]</sup>等问题.尽管研究有待进一步深入,但本文提到的各种控制方法对国内的研究有很好的借鉴和启发意义

## 4 当前研究存在的问题

1) 没有统一有效的队形表示框架和队形控制算法,这使得灵活的队形控制难以实现.队形表示框架要求能统一表示各种队形,队形控制本身的算法的实现要求具有以下性质:通用性、鲁棒性、稳定性以及扩展性.目前的方法还不能满足这两个要求,需要进一步探索

2) 在多机器人系统中,队形控制是手段,而完成指定的任务是目的,因此队形控制往往是机器人系统中的一个子任务系统.目前的队形控制研究通

常是将队形控制作为一个系统来设计,而不是作为整个系统的一个模块或子任务,不便于与已有的体系相结合.将队形控制作为一个模块与现有的体系结构或控制系统中其他子任务系统有机结合起来,是值得研究的问题

3) 移动机器人队形控制的一般需求偏重于野外环境,这种环境往往呈现动态和不确定的性质,因此要求队形控制要有处理动态和不确定性的能力.基于局部感知和通信的分布式控制方法在这方面具有一定的优势

4) 自适应队形控制和层次性队形控制的研究较少.如何根据任务、机器人约束及环境等因素自动进行队形控制,这一研究基本上还没有.层次性是解决大规模队形控制的一种有效组织方式,对此方面的研究也不多

## 5 具体实现队形控制系统时要考虑的问题

### 1) 整个系统采用何种控制结构

群体的体系结构是系统中机器人之间逻辑上和物理上的信息关系和控制关系,以及问题求解能力的分布模式.它是多移动机器人协作行为的基础,决定了系统的整体行为能力和运行效率.多机器人的体系结构总体上分为集中式和分散式,而分散式结构又分为层次式和分布式

### 2) 机器人采用何种控制策略和方法

机器人只依靠当前的感知信息,或依靠过去和现在的信息进行控制决策;基于行为的还是混合式的控制策略;以及队形控制算法如何在单个机器人上实现

3) 系统中各机器人的感知能力、通信能力及计算能力如何

感知能力是指机器人所具有何种传感器以及传感信息处理能力,能否识别周围的环境(其他机器人和障碍物).有无通信能力,若有,是局部有效的还是全局有效的.能否独立完成所需的运算.在队形控制中机器人需要得到自身以及其他机器人的信息,可以通过感知邻近机器人的位置来确定自己的位置,也可以通过全局定位系统或感知自己与一个已知 landmark 的相对位置再利用通信来确定自己的位置并得到其他机器人的信息.具有局部感知能力以及通信能力的多机器人系统有利于实现分布控制,具有良好的适应性和扩展性<sup>[2, 19]</sup>.

4) 要求队形有何特性(如可实现的队形类型,要求队形是刚性的还是灵活的).

队形的类型很多,如圆形、横队、纵队、菱形、尖三角形、三角形、箭头形、四方形、点阵形或任意类型的队形等.能实现多少?在移动或避障时是否要求严

格保持队形, 这与所要实现的任务有关。如搬运物体时要求严格保持队形位置, 而在搜索任务时则不需要严格同步。

5) 机器人如何确定自己当前以及未来时刻在队形中的位置。

机器人采用相对坐标还是绝对坐标确定位置, 能否得到全局的位置信息以及其他机器人位置信息。机器人在队形中的位置参考点可以采用队形中心位置、团队中的 leader 或 virtual structure 中的虚拟点, 以及相邻机器人的位置。

## 6 队形控制研究的发展方向

队形控制具有广阔的应用范围, 特别是在军事应用及航空航天等领域。作为一个具有实用性和战略性的研究课题, 在国内外得到了广泛的研究, 但国内研究尚处起步阶段。本文对目前队形控制研究采用的方法及思路作了概括总结, 并对国内外的研究情况作了全面的介绍。在目前研究工作的基础上, 今后队形控制研究的方向主要有以下几个方面:

1) 机器人队形控制是依赖于单个机器人控制之上的, 所以与单个机器人能力相关。如与传感信息处理、定位方法研究、导航方法、控制结构、通信等方面的研究密切相关。这涉及到单个机器人的体系结构, 多机器人的体系结构, 以及各功能模块的实现问题。

2) 如何用简单有效的方法实现队形控制, 以及用较少的代价实现大量机器人队形控制是一个研究方向。

3) 机器人之间高效的协调方法的研究以及加入人后的机器人队形控制也是值得关注的问题。

4) 自适应的队形控制研究: 即如何根据任务、环境和约束自适应地进行队形控制; 如何将机器人自身处理问题的能力与群体处理问题的能力互为补充。

5) 机器人队形控制主要应用于搜索、防卫、围捕等军事用途, 以及合作搬运、航空航天中的虚拟探测等。在以上研究中, 多数是以实现队形控制的操作为目的。对队形控制的研究工作应与实际应用相结合, 两者相互促进才能获得理想结果。

## 参考文献(References)

[1] Tucker Balch, Ronald C Arkin. Behavior-based formation control for multi-robot teams [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926-939.

[2] Fredslund J, Mataric M J. A general, local algorithm for robot formations [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 837-846.

[3] Randal W Beard, Jonathan Lawton, Fred Y Hadaegh. A coordination architecture for spacecraft formation control [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2001, 9(6): 777-790.

[4] Wei Ren, Randal W Beard. Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures [J]. *IEEE Proc Control Theory and Applications*, 2004, 15(3): 357-368.

[5] Bauer F, Bristow J, Foltz D, et al. Satellite formation flying using an innovative autonomous control system environment [A]. *Proc of the AIAA GN C Conf* [C]. New Orleans, 1997.

[6] Wang P K C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation [J]. *J of Robotic Systems*, 1991, 8(2): 177-195.

[7] Jaydev P Desai, Jim Ostrowski, Vijay Kumar. Controlling formations of multiple mobile robots [A]. *IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Belgium, 1998: 2864-2869.

[8] Hiroaki Yamaguchi, Joel W Burdick. A asymptotic stabilization of multiple nonholonomic mobile robots forming group formations [A]. *IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Belgium, 1998: 3573-3580.

[9] Hogg R W, Rankin A L, Roumeliotis S I, et al. Algorithms and sensors for small robot path following [A]. *Proc 2002 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Washington D C, 2002: 3850-3857.

[10] Pereira G A S, Das A K, Kumar V, et al. Formation control with configuration space constraints [A]. *Proc of the IEEE/RJS Int Conf on Intelligent Robots and Systems* [C]. Las Vegas, 2003: 2755-2760.

[11] David J Naffin, Gaurav S Sukhatme. Negotiated formations [A]. *Int Conf on Intelligent Autonomous Systems* [C]. Amsterdam, 2004: 181-190.

[12] Das A K, Fierro R, Kumar V, et al. A vision based formation control framework [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 813-825.

[13] 曹志强. 未知环境下多机器人协调与控制的队形问题研究 [D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2002.

[14] Paolo Pirjanian. Behavior coordination mechanisms - state-of-the-art [R]. LA: University of Southern California, 1999.

[15] Craig W Reynolds. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model [J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(4): 25-34.

[16] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(6): 988-1001.

[17] Herbert G Tanner, Jadbabaie A, George J Pappas.

- Coordination of multiple autonomous vehicles [A]. *11th Mediterranean Conf on Control and Automation* [C]. Rhodes, 2003
- [18] Balch T, Hybinette M. Social potentials for scalable multi-robot formations [A]. *Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. San Francisco, 2000, 1: 73-80
- [19] Kostelnik P, Samulka M, Janosik M. Scalable multi-robot formations using local sensing and communication [A]. *Proc of the 3rd Int Workshop on Robot Motion and Control* [C]. Poznan, 2002: 319-324
- [20] Jonathan Lawton, Brett Young, Randal Beard. A decentralized approach to elementary formation maneuvers [A]. *IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. San Francisco, 2000, 3: 2728-2733
- [21] 董胜龙, 陈卫东, 席裕庚. 多移动机器人编队的分布式控制系统 [J]. *机器人*, 2000, 22(6): 433-438  
(Dong S L, Chen W D, Xi Y G. The distributed control system of multi mobile robots formation Control [J]. *Robot*, 2000, 22(6): 433-438)
- [22] Anthony Lewis M, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures autonomous [J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4: 387-403
- [23] Brett J Young, Randal W Beard, Jed M Kelsey. A control scheme for improving multi-vehicle formation maneuvers [A]. *American Control Conf* [C]. Arlington, 2001: 704-709
- [24] Desai J P. A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations [J]. *J of Robotic Systems*, 2002, 19(11): 511-525
- [25] Fierro R, Das A K. A modular architecture for formation control [A]. *Proc of the 3rd Int Workshop on Robot Motion and Control* [C]. Poznan, 2002: 285-290
- [26] Olfati-Saber R, Murray R M. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems [A]. *41st Conf on Decision and Control* [C]. Las Vegas, 2002, 3: 2965-2971
- [27] Olfati-Saber R, Murray R M. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions [A]. *Proc of the 15th IFAC World Congress* [C]. Barcelona, 2002
- [28] Herbert G Tanner, George J Pappas, Vijay Kumar. Leader to formation stability [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2004, 20(3): 443-455
- [29] Alexander Fax J, Richard M Murray. Graph laplacians and stabilization of vehicle formations [A]. *Proc of 15th IFAC Conf* [C]. Barcelona, 2002
- [30] Alexander Fax J, Richard M Murray. Information flow and cooperative control of vehicle formations [A]. *Proc of 15th IFAC Conf* [C]. Barcelona, 2002
- [31] Alexander Fax J, Richard M Murray. Information flow and cooperative control of vehicle formations [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1465-1476
- [32] Yohannes Ketema, Gary Balas. Formation stability with limited information exchange between vehicles [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Denver, 2003, 1: 290-295
- [33] Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *Int J of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-98
- [34] Naomi Ehrlich Leonard, Edward Fierelli. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups [A]. *Proc of the 40th IEEE Int Conf on Decision and Control* [C]. Orlando, 2001, 3: 2968-2973
- [35] Ogren P, Fierelli E, Leonard N E. Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers [A]. *Proc of the 15th Int Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems* [C]. Notre Dame, 2002
- [36] John S Baras, Tan X B, Pedram Hovareshti. Decentralized control of autonomous vehicles [A]. *Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Hawaii, 2003: 1532-1537
- [37] William B Dunbar. Model predictive control: Extension to coordinated multi-vehicle formations and real-time implementation [R]. Pasadena: California Institute of Technology, 2001
- [38] 苏治宝, 陆际联. 基于行为法队形保持中的队形反馈 [J]. *机床与液压*, 2003, (3): 167-169  
(Su Z B, Lu J L. Formation feedback in behavior-based method used for keeping formation [J]. *Machine Tool and Hydraulic Pressure*, 2003 (3): 167-169)
- [39] 韩学东, 洪炳熔, 孟伟. 多机器人任意队形分布式控制研究 [J]. *机器人*, 2003, 25(1): 66-72  
(Han X D, Hong B R, Meng W. Distributed control for generating arbitrary formation of multiple robots [J]. *Robot*, 2003, 25(1): 66-72)