

移动机器人编队控制的现状与问题

杨甜甜¹, 刘志远¹, 陈虹², 裴润¹

(1. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 吉林大学 控制科学与工程系, 吉林 长春 130025)

摘要:随着机器人向系统应用的方向发展,移动机器人编队控制问题成为研究的热点问题.为此,依据解决编队控制问题的不同思路,总结了编队控制的各种研究方法:基于行为法、人工势场法、跟随-领航法、虚结构法、循环法、模型预测控制法、分布式控制法,分别对几种编队控制方法的基本思想和特点进行总结和分析,最后从通用性、稳定性、鲁棒性和安全性等方面阐述了移动机器人编队控制理论与应用方面有待进一步研究的几个主要问题.

关键词:移动机器人;编队控制;协调;合作

中图分类号:TP24 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2007)04-0021-07

Formation control of mobile robots: state and open problems

YANG Tian-tian¹, LIU Zhi-yuan¹, CHEN Hong², PEI Run¹

(1. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In recent years, research on formation control has received a lot of attention in robotics. This paper presents a comprehensive review of formation control for multiple mobile robots under different scenarios. Proposals for formation control reviewed include a behavior-based approach, an artificial potential field approach, a leader-follower approach, a virtual structural approach, a cyclic approach, a model predictive control approach, and a distributed control approach. Problems identified in working with each model's theoretical and practical properties are discussed from the perspectives of generality, stability, robustness and safety.

Key words: mobile robot; formation control; coordination; cooperation

近年来,随着计算机技术和无线通信技术的发展,多机器人协调合作已经成为可能,而且得到了越来越多的应用.多个机器人协调合作可以完成单一机器人难以完成的任务.其中编队问题是多机器人协调合作中的一个典型性的问题,所谓的编队控制是指多个机器人在到达目的地的过程中,保持某种队形,同时又要适应环境约束的控制技术.多机器人的编队控制是目前国内外研究的热门课题,也是研究其他协调合作问题的基础.通常协调是为了解决机器人之间的冲突和矛盾.对于自主移动机器人编队问题来说,冲突主要就是碰撞,也就是说在同一时刻多个机器人不能处于同一位置.协作是指机器人通过一种机制合作完成一项任务,对于自主移动机

器人编队问题来说合作就是保持队形,在各时刻各机器人的位置满足一种数学关系.对于机器人系统而言,多机器人之间保持一定的队形具有许多优点,比如,空间结构中特定队形的实现可以充分有效地利用多移动机器人完成任务,缩短执行任务的时间,降低系统的成本,提高系统的工作效率,能充分获取当前的环境信息,在对抗性环境中能增强抵抗外界进攻的能力,并且能够提高鲁棒性等.编队控制在军事、娱乐、生产等各个领域有广泛的应用.尤其是在军事领域有着广泛的应用,例如航天器、无人机的编队飞行、自主水下航行器的编队航行.因此,实现一个合理、有效的编队控制方法将具有重要的理论及现实意义.

目前,关于机器人的编队控制国内外的学者作了大量的研究.本文依据解决编队控制问题的不同思路,总结并分析了编队控制的研究现状以及存在

收稿日期:2006-11-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60234030,60374027).

的问题.

1 机器人编队控制方法

1.1 基于行为法

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群体产生所需的整体行为. 编队控制器由一系列行为组成, 每个机器人有基本的行为方式, 每个行为方式又有自己的目标或任务. 一般情况下, 机器人的行为包括避障、避碰、驶向目标和保持队形等. 对于编队控制来说, 队形保持是一个基本的独立行为. 驶向目标的“目标”是指事先指定的状态, 因此队形保持和驶向目标是 2 个不同的行为. 避障是指动态环境下编队机器人运动过程中避免碰到障碍物. 避碰是指运动过程中避免机器人之间的相互碰撞. Balch 和 Arkin 首先提出了基于行为的控制方法^[1]. 文章中考虑一种基于领航的队形, 利用 2 个循环策略设计保持队形行为控制器. 文中同时还考虑了其他几种行为, 包括避障、避碰、驶向目标. 文献[2]提出各子行为加权综合的控制实现方法, 即对每个子行为分别求出控制变量, 然后对这些控制量进行加权平均求得综合的控制变量; 在文献[3]中, 利用遗传算法对加权量进行优化配置, 从而实现多机器人之间的协调编队控制. 文献[4]中, 基于行为编队控制方法解决非线性系统的轨迹生成和避障问题. 文献[5]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. 文献[6]采用 3 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.

基于行为的控制器是由一系列行为组成, 每个行为有自己的目标或任务. 当机器人具有多个竞争性目标时, 可以很容易地得出控制策略, 并且可以实现分布式控制. 但缺点是无法明确地指出达到整体行为的局部控制规则, 队形控制的稳定性很难得到保证.

1.2 人工势场法

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. Khatib^[7]于 1986 年提出了人工势场法, 它的基本思想是机器人在一个虚拟的力场中运动, 障碍物被斥力势场包围, 其产生的排斥力随机器人与障碍物距离的减少而迅速增大; 目标点被引力势场包围, 其产生的吸引力随

机器人与目标点的接近而减少; 在合力的作用下机器人沿最小化势能的方向运动. 文献[8]基于人工势场法提出一种编队控制器, 应用在机器人出现故障或者不完整的传感器信息的情况下. 文献[9]提出了一种基于势函数的、能够有效地对多机器人系统的编队队形进行稳定性分析的分布控制的方法. 通过选择适当的、与目标和结构相关的势函数, 利用图论知识和李亚普诺夫稳定理论, 设计了一种新颖的能够稳定机器人编队队形并有效跟踪目标的分布控制律, 并给出了多机器人系统编队队形稳定及控制问题有解的充分条件. 在文献[10]中用势场函数表示机器人之间设定的队形和运动轨迹, 从而设计编队控制器. 文献[11]中同时考虑存在障碍物环境下的编队控制问题, 提出非完整移动机器人基于势场函数的分布式控制器. 这种分布式控制器能够保证编队机器人达到设定的队形, 同时避免相互间的碰撞以及与动态环境下障碍物的碰撞. 文献[12]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, 通过虚领航者调整队形或控制队形的运动. 文献[13]利用人工势场和虚领航者作为内在的协调框架, 提出了控制队形运动的稳定策略. 文献[14]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. 文献[15]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.

人工势场法计算简单, 便于实现实时控制, 尤其对于处理障碍物空间的避碰问题是比较有效的. 但是势场函数的设计比较困难, 而且存在局部极值点的问题. Rimón 和 Koditschek^[16]在 1992 年提出一种更精确构造势场函数的方法. 为了区别于之前的势场函数, 把这种势场函数描述为导航函数 (navigation function), 它只存在一个局部最小点, 同时也是全局最小点. 这种描述方法也被应用在同时考虑避障问题的编队控制中^[17-19].

1.3 跟随-领航法

跟随-领航法的基本思想是在多机器人组成的群体中, 某个机器人被指定为领航者, 其余作为它的跟随者, 跟随者以一定的距离间隔跟踪领航机器人的位置和方向. 对该方法进行拓展, 可以指定一个领航者, 也可以指定多个, 但群体队形的领航者只有一个.

对于跟随领航者法有 2 种控制器形式: $l-l$ 控制器和 $l-$ 控制器. $l-$ 控制器的控制目标是使跟随者和领航者之间的距离和相对转角达到设定

值^[20]。1-1 控制器考虑的是 3 个机器人之间的相对位置问题。当跟随者和 2 个领航者之间的距离达到设定值的话,就可以认为整个队形稳定了。

文献[20]利用跟随者和领航者之间的相对运动模型设计控制器保证无碰撞地达到指定队形,同时能够处理对象模型中的参数不确定性。多机器人编队控制的另一种方法就是将输入输出反馈线性化控制律施加于跟随机器人,其合乎要求的运动轨迹与领航机器人有一定的关系^[21-22]。使用输入输出反馈线性化控制方法,多机器人能够取得复杂的编队。编队里的每一个机器人可以跟随一个领航机器人并且作为一个或者多个其他机器人的领航者。文献[23]中利用领航者和跟随者之间的相对方程对领航者的状态进行估计,从而求得跟随者的控制器。

目前的跟随-领航模式,如果出现故障的领航机器人后面还有以它为参考点的跟随机器人,其结果将会是出现一个或多个后继机器人掉队,编队无法继续保持,从而直接影响到编队任务的正常完成。文献[24]针对多机器人队伍中某台机器人出现的通信或机械故障,建立一种编队容错控制算法,在机器人出现故障后,机器人队伍能自动重新调整编队,避免故障机器人的后继机器人掉队,实现编队的容错控制。

跟随-领航方法控制简单,只需要控制跟随机器人跟踪领航机器人的轨迹,这样仅仅给定领航者的行为或轨迹就可以控制整个机器人群体的行为。可以把编队控制问题简化为独立的跟踪问题,每个机器人只需要获得它的领航机器人的状态信息,从而大大简化了队形间的合作问题。例如在领航-跟随队形中再增加一个机器人的话只需要增加一个局部控制器并指定一个领航机器人就可以,不需要重新设计控制器。而且当某一个机器人失效时,只有后继的跟随机器人受到影响,通过重新安排跟随机器人就可以消除这种失效带来的问题。但是以上的优点是在损失全局最优性的前提下带来的,这里考虑的只是跟随机器人和领航机器人之间的最优问题而不是全局的最优编队问题。

1.4 虚结构法

虚结构的概念最开始被引用在文献[25]中。虚结构法主要应用在飞行器 and 人造卫星的编队飞行控制中。这类方法的特点是,机器人之间可以保持一定的几何形状,它们之间形成了一个刚性结构,这样的结构称为虚拟结构。虽然每个机器人相对于参考系统位置不变,但它仍可以以一定的自由度来改变自己的方向。多机器人以刚体上的不同点作为各自的

跟踪目标就可以形成一定的队形。实现此方法需要 3 个步骤:首先,定义虚拟结构的期望动力学特性;然后,将虚拟结构的运动转化成每个机器人的期望运动;最后得出机器人的轨迹跟踪控制方法。在文献[26]中,虚结构法、跟随领航法和基于行为法一起用来实现深空飞行器的编队控制。类似的方法也出现在文献[27]中。

虚拟结构方法是用刚体的虚拟结构与结构中的固定位置实现队形控制。利用虚拟结构法可以很容易地指定机器人群体的行为(虚拟结构的行为),并且可以进行队形反馈,能够取得较高精度的轨迹跟踪效果。其缺点是要求队形像一个虚拟结构运动限制了该方法的应用范围,缺乏灵活性和适应性。

1.5 循环法

循环法主要针对带有方向性的图形结构队形。与领航-跟随法类似,它由各个独立控制器组成,不同之处是循环法不具有分级。因为机器人之间的相互联系给循环法的稳定性证明带来较大的困难。因此,一些文章中仅限于用仿真来说明^[28-29]。可以利用循环法使机器人从任意形状达到指定的队形。文献[30]中基于规则法生成线形、圆形、多边形等队形。文献[31]在文献[30]基础上进行扩展能够处理一些更加实际的约束。文献[32]中提出 2 种循环算法,第 1 种方法类似于文献[30]中的方法,第 2 种方法利用势场函数法。文献[33]也对每个循环轨道上的机器人建立势场函数,这里认为每个机器人都被邻近机器人排斥。文献[34]在文献[33]的基础上考虑不同的势场函数形式和队形排列。文献[35]和文献[36]提出基于 GVS 的循环算法。

循环法与跟随-领航法比较类似,但因为各机器人之间不存在等级,循环算法比跟随-领航法有更好的性能并且控制器分配上更均匀。循环控制器可以是分散的,通过各个独立控制器的交互作用可以保持队形。循环法的主要缺点是这种算法的稳定性很难保证,并且大多数情况下信息需求量很大。

1.6 MPC 方法

目前非线性 MPC 理论已较成熟。Dunbar 等人文献[37]中首先提出将模型预测控制用于多机器人编队控制的理论框架,同时研究了系统的稳定性、鲁棒性以及实时实现等问题。文献[38]提出多机器人编队的预测控制方法,通过最小化性能指标解决队形保持问题,这里采用的是集中式的控制思路。文献[39-40]提出一种分布式滚动时域控制方法。文献[40]中利用图论知识和预测控制的理论,提出一种能够使机器人队形保持的跟踪目标的分布式

预测控制方法.与集中式控制相比较,分布式控制系统具有更多的灵活性和更强的鲁棒性、完成任务的高效性和更高的容错能力等优点.

MPC方法的优点是具有较强的理论基础,能保证对信息的充分利用,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,同时在线处理约束(控制约束和状态约束)的能力较强.缺点是对于分布式的模型预测控制方法来说稳定性很难保证,而且计算量较大,在实时计算、以及分布实现等方面还有待进一步的研究.

1.7 分布式控制

20世纪80年代末,受到分布式人工智能、多智能体系统研究的启发,一些学者针对集中式扩展的不足,提出了分散和分布式的多机器人系统合作组织策略、方法和协调机制,开辟了基于智能体思想的机器人体系结构研究领域.集中式和分布式是2种不同的系统设计思路,分布控制法是针对集中控制的不足提出的.分布控制有2类不同的设计思想.一类是从子系统本身的局部控制器出发,考虑关联作用的影响设计保证整个闭环系统稳定的控制器;另一类是从包含全部关联的总系统出发,按有结构约束的控制器来设计各系统的局部控制器.对分布控制的各子系统设计局部控制器能减少从其他子系统获得信息,但需要考虑系统关联作用.文献[41]中基于图形论和李亚普诺夫方法提出一种多智能体分布式编队控制的理论框架,通过独立控制每个机器人来实现整个系统的编队控制.文献[42]基于行为法提出对于移动机器人编队机动的分布式控制方法,文中提出了3种控制策略.文献[43]中基于偶极导航函数提出分布式非连续反馈控制器完成多个非完整移动机器人导航控制,这种控制方法能够保证全局收敛性并能避免机器人间相互碰撞.文献[44]中每个机器人有自己独立的坐标系,它能够获得与其他机器人之间的相对位置和偏转,通过相对位置反馈达到编队控制的目的.文献[40]针对机器人编队控制提出一种分布式滚动时域方法,并且给出保证稳定性的理论证明.

分布式控制可以独立考虑每个机器人的特性,具有较强的灵活性和鲁棒性,完成任务的高效性和容错能力等优点.但是缺点是控制器设计复杂、困难,闭环系统的稳定性很难保证,并非各子系统的局部稳定就可以解决的,还需要考虑各机器人间的关联作用.

1.8 其他控制方法

对于多机器人系统编队问题的研究,除了以上

列举方法外还有一些其他的控制方法.文献[46]利用模糊控制和神经网络控制方法能够实现编队过程中的避障控制.文献[19,46-47]将视觉伺服系统应用到编队控制中.文献[48]中提出一种基于广义坐标的编队控制策略,广义坐标刻画了机器人在队形中的位置、方向和形状.队形的运动轨迹由位置坐标、方向坐标和形状坐标来描述.编队控制器能够保证机器人跟踪指定轨迹的同时保持设定的队形,同样的方法也应用在文献[49-50]中.

以上几种控制方法并不一定独立使用,很多情况下同时出现.比如文献[19]中基于跟随-领航法进行机器人编队控制,而利用势场函数考虑机器人间的避碰问题.文献[13]针对机器人编队控制提出一种分布式滚动时域控制方法.

2 有待解决的问题

尽管机器人编队控制研究近年来有了较大进展,但仍有不少问题有待于进一步研究.

1)没有统一有效的框架来描述机器人编队和控制算法,使得灵活的队形控制难以实现.队形的类型很多,如三角形、菱形、圆形等等,队形表示框架需要能统一表示各种队形,合适的描述有待于进一步开发.而且大多数编队控制算法不具有通用性,每一种控制方法都有它的局限性,并不是所有的编队问题都可以解决.比如领航-跟随法只适用于单向的编队结构,对于无方向性的编队结构用这种方法就无法处理了.

2)稳定性是编队控制的重要因素,有些控制方法从理论上很难得到保证.对于多个机器人系统来说,它的控制策略比单个机器人的控制要复杂得多,这不仅仅由于机器人数量的增多,更重要的是机器人之间还需要协调和协作.例如,基于行为法、循环法等等.有些控制方法关于稳定性的讨论还是基于集中式的系统控制框架.相对于分布式控制来说,集中式控制有很大的局限性.但是对于多机器人系统,由于机器人之间的耦合,分布式控制的稳定性很难保证,并不是各子系统的局部稳定就可以解决的,还需要考虑各机器人间的关联作用.对于耦合系统的分布式镇定控制器设计比较复杂、困难.因此关于稳定性问题,需要进一步的完善和探索.

3)大多数的方法仅仅把机器人看成一个质点,或者是针对机器人的运动学模型,即将系统的速度作为控制输入并忽略机器人系统的动态特性.例如领航-跟随法中大部分是针对机器人的运动学模型,MPC方法中很多都把机器人看作一个质点运

动.这种忽略机器人动态特性的方法存在局限性.这种简化的表达式并不能反映具有未知质量、摩擦、以及间隙影响的移动机器人的实际情况.尽管非完整移动机器人的运动学模型对某些控制目标是适合的,但对其他目标,如考虑模型不确定性、外部干扰以及获得以力和力矩为输入控制律时,就要求包含动态影响(广义力)的动力学模型.因此,控制器的设计应当应用能够将机器人实际参数中的不确定性显式加以考虑的动力学模型.

4)对于机器人编队控制来说还有许多重要但研究很少的问题.这里主要说明一下当存在系统不确定性时所面临的问题,这个不确定性可能来自参数变化或未建模动态.没有研究这类非线性系统鲁棒性的一般方法,由于编队控制问题描述的复杂性,很少有文献对不确定性进行处理.另外,由于实际系统会受到外界各种各样的干扰,使得控制器的设计更加复杂.为了保证实际系统对外界干扰、系统的不确定性等有尽可能小的敏感性,导致了系统鲁棒控制问题,因而需要进一步研究这二者作用下的鲁棒编队控制器设计问题.由于分布式控制的特点使得它在这方面具有一定的优势.

5)系统实际工作中会受到各种各样的约束,比如控制量约束和状态量约束.实际控制输入所受到的约束,在满足输入约束的情况下设计同样给编队控制器设计增加了困难.实际系统可能同时带有状态和输入约束,但这种情况目前研究得还很少.由于预测控制具有良好的强约束处理能力,越来越多的研究人员采用这一方法来解决约束问题.也正是这个原因,已经有一些文献对编队控制中控制量约束进行了处理^[38,40].

6)实际机器人的运动环境往往呈现动态的性质,因此需要研究动态环境下移动机器人避障编队控制问题.关于避障编队控制问题的研究大部分是基于行为法,这种方法很难从理论上保证稳定性.避障编队问题比较复杂,比如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等等.势场法是一种有效的避障处理方法,因此结合势场法与其他的编队控制方法在避障问题方面具有一定的优势.

此外,编队控制中信息需求量也是一个需要考虑的问题,尽量用较少的信息量完成设定的编队任务.比如通过增加相关约束来降低信息需求量,或仅依赖于局部信息达到全局的设定行为等等,另外如果能够确定哪些局部行为能够引起全局的行为也是

非常有意义的问题.

基于以上的分析可以看出,非完整移动机器人编队控制的理论基础已经取得很大的发展.但上述提及的许多未解决的问题有待于进一步开发和研究.同时,相信在将来的研究中,通过理论和实践相结合,非完整移动机器人编队控制的研究将获得更大的突破.

3 结束语

随着机器人研究的不断发展,多机器人的编队控制问题受到越来越多的重视.本文对目前的移动机器人编队控制方法进行了总结,分别对几种编队控制方法的基本思想和特点进行分析,并提出了理论与应用方面有待进一步研究的几个主要问题,对于从事这方面研究的人员具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CAO Z Q, XIE L J, ZHANG B, et al. Formation constrained multi-robot system in unknown environments [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Taipei, China, 2003.
- [3] CAO Z Q, TAN M, WANG S, et al. The optimization research of formation control for multiple mobile robots [A]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Shanghai, China, 2002.
- [4] MONTEIRO S, BICHO E. A dynamical systems approach to behavior based formation control [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Washington, DC, 2002.
- [5] BALCH T, HYBINETTE M. Social potentials for scalable multi-robot formations [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. San Francisco, 2000.
- [6] KOSTELNIK P, SAMULKA M, JANOSIK M. Scalable multi-robot formations using local sensing and communication [A]. Proceedings of the 3rd International Workshop on Robot Motion and Control [C]. Poznan, 2002.
- [7] KHATIB. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 290 - 298.
- [8] DUDENHOEFFER D D, MICHAEL P J. A formation behavior for large-scale micro-robot force deployment [A]. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Confer-

- ence [C]. New York, 2000.
- [9] 贾秋玲, 闫建国, 王新民. 基于势函数的多机器人系统的编队控制 [J]. 机器人, 2006, 28(2): 111 - 114.
JIA Qiuling, YAN Jianguo, WANG Xinmin. Formation control of multiple robot system based on potential function [J]. Robot, 2006, 28(2): 111 - 114.
- [10] GE S S, FUA C H, LIM K W. Multi-robot formations: queues and artificial potential trenches [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. New Orleans, 2004.
- [11] LIANG Y, LEE H H. Decentralized formation control and obstacle avoidance for multiple robots with nonholonomic constraints [A]. Proceedings of the 2006 American Control Conference [C]. Minneapolis, 2006.
- [12] LEONARD N E, FIORELLI E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups [A]. Proceedings of the 40th IEEE International Conference on Decision and Control [C]. Orlando, 2001.
- [13] OGREN P, FIORELLI E, LEONARD N E. Formations with a mission: stable coordination of vehicle group maneuvers [A]. Proceedings of the 15th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems [C]. Notre Dame, 2002.
- [14] STABER R O, MURRAY R M. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions [A]. Proceedings of the 15th IFAC World Congress [C]. Barcelona, 2002.
- [15] BARAS J S, TAN X B, PEDRAM H. Decentralized control of autonomous vehicles [A]. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control [C]. Hawaii, 2003.
- [16] RIMON E, KODITSCHKE D E. Exact robot navigation using artificial potential [J]. IEEE Transactions on Functions Robotics and Automation, 1992, 8(5): 501 - 518.
- [17] PETTER O. Split and join of vehicle formations doing obstacle avoidance [A]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. New Orleans, 2004.
- [18] PETTER O, NAOMI E L. Obstacle avoidance in formation [A]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Taipei, China, 2003.
- [19] COWAN N, SHAKERINA O, VIDAL R, et al. Vision-based follow-the-leader [A]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Las Vegas, 2003.
- [20] CHEN X P, SERRANI A, OZBAY H. Control of leader-follower formations of terrestrial UAVs [A]. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control [C]. Maui, Hawaii, 2003.
- [21] DESAI J, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, 1998.
- [22] DESAI J, 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.
- [23] FUJIMORI A, FUJIMOTO T, GABOR B. Distributed leader-follower navigation of mobile robots [A]. 2005 International Conference on Control and Automation [C]. Budapest, 2005.
- [24] 石桂芬, 方华京. 基于相邻矩阵的多机器人编队容错控制 [J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(3): 39 - 42.
SHI Guifen, FANG Huajing. Fault tolerance of multi-robot formation based on adjacency matrix [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2005, 33(3): 39 - 42.
- [25] TAN K H, LEWIS M A. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control [A]. Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems [C]. Osaka, 1996.
- [26] BEARD R W, LAWTON J, HADAEGH F Y. A coordination architecture for spacecraft formation control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(6): 777 - 790.
- [27] REN W, BEARD R W. A decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach [A]. In Proceedings of the 2003 American Control Conference [C]. Denver, 2003.
- [28] ANDERSON M R, ROBBINS A C. Formation flight as a cooperative game [A]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference [C]. Boston, 1998.
- [29] WANG P K C. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation [J]. J Robotic Systems, 1991, 8(2): 177 - 195.
- [30] SUGIHARA K, SUZUKI I. Distributed algorithms for formation of geometric patterns with many mobile robots [J]. J Robotic Systems, 1996, 13(3): 127 - 139.
- [31] YUN X, ALPTEKIN G, ALBAYRAK O. Line and circle formation of distributed physical mobile robots [J]. J Robotic Systems, 1997, 14(2): 63 - 76.
- [32] WANG P K C, HADAEGH F Y. Self-organizing control of multiple free-flying miniature spacecraft in formation [A]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference [C]. Denver, 2000.
- [33] MCLNNES C R. Autonomous ring formation for a planar constellation of satellites [J]. J Guidance Control Dynamics, 1995, 18(5): 1215 - 1217.

- [34] PALMERINI GB. Guidance strategies for satellite formations [A]. AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference[C]. Girdwood, 1999.
- [35] YOUNG B J. Mobile robots: Coordination and control [D]. Provo: Brigham Young University, 2000.
- [36] YOUNG B J, BEARD R W, KELSEY J M. A control scheme for improving multi-vehicle formation maneuvers [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. Arlington, 2001.
- [37] DUNBAR W B. Model predictive control: Extension to coordinated multi-vehicle formations and real-time implementation [R]. Pasadena: California Institute of Technology, 2001.
- [38] DUNBAR W B, MURRAY R M. Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control [C]. Las Vegas, 2002.
- [39] KEVICZKY T, BORRELLIT F, BALAS G J. Hierarchical design of decentralized receding horizon controllers for decoupled systems [A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control [C]. Nassau, 2004.
- [40] DUNBAR W B, MURRAY R M. Distributed receding horizon control with application to multi-vehicle formation stabilization [J]. Automatica, 2006, 42(4): 549 - 558.
- [41] OLFATI S R, MURRAY R M. Distributed structural stabilization and tracking for formations of dynamics multi-agents [A]. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control [C]. Las Vegas, 2002.
- [42] LAWTON J R T, BEARD R W, YOUNG B J. A decentralized approach to formation maneuvers [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(6): 933 - 941.
- [43] LOIZOU S G. Decentralized feedback stabilization of multiple nonholonomic agents [A]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. New Orleans, 2004.
- [44] YAMAGUCHI H, ARAIB T, BENIC G. A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 36(4): 125 - 147.
- [45] HONG S W, SHIN S W, AHN D S. Formation control based on artificial intelligence for multi-agent coordination [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C]. Pusan, 2001.
- [46] 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.
- [47] VIDAL R, SHAKERNIA O, SASTRY S. Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Taipei, China, 2003.
- [48] SPRY S, HEDRICK J K. Formation control using generalized coordinates [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Decision and Control [C]. Atlantis, Bahamas, 2004.
- [49] GOLDGEIER M, ZHANG F, KRISHNAPRASAD P S. Control of small formation using shape coordinates [A]. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation [C]. Taipei, China, 2003.
- [50] YAMA KITA M, SAITOM. Formation control of SMC with multiple coordinate systems [A]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems [C]. Sendai, 2004.

作者简介:



杨甜甜,女,1980年生,博士研究生,主要研究方向为多移动机器人的滚动时域编队控制。

E-mail: creance @126.com.



刘志远,男,1957年生,教授,博士生导师,主要研究方向为汽车电子控制、机器人控制、鲁棒控制和预测控制,曾获教育部自然科学二等奖,发表学术论文60余篇。

E-mail: liuzy_hit @hit.edu.cn.



陈虹,女,1969年生,教授,1997年以最高荣誉(mit-Auszeichnung)在德国斯图加特大学获工学博士学位,主要研究方向为预测控制、最优控制、鲁棒控制及非线性控制理论及应用。

E-mail: chenh @jlu.edu.cn.