

文章编号: 1002-0446(2003)01-0088-04

多移动机器人队形控制的研究方法*

苏治宝 陆际联

(北京理工大学机器人研究中心 北京 100081)

摘要: 本文从基本思想、优缺点等方面论述了进行多移动机器人队形控制的三种研究方法. 介绍了一种包含这三种方法的系统体系结构, 并对该体系结构进行了评价, 指出了需要进一步研究的问题.

关键词: 多移动机器人; 队形控制方法; 体系结构

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCH APPROACH TO FORMATION CONTROL OF MULTIPLE MOBILE ROBOTS

SU Zhibao LU Jilian

(The Robotics Research Center of Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: In this paper, 3 kinds of research approaches to formation control of multiple mobile robots are discussed from the aspects of essential idea, advantage, weakness and so forth. An architecture that subsumes the 3 approaches is introduced and evaluated, then some issues need to be investigated in depth are presented.

Keywords: multiple mobile robots, approach to formation control, architecture

1 引言(Introduction)

随着计算机、电子、通信、控制、传感器以及其它相关技术的发展, 机器人的应用领域在不断扩展. 由于多机器人系统较单个机器人有许多优点, 因此多机器人系统的研究已经得到了越来越多的重视^[1]. 在多机器人系统的许多应用领域中, 要求多机器人在作业和运动过程中保持一定的队形, 尤其是在完成军事任务的过程中, 保持队形显得更为重要.

所谓队形控制就是指多个移动机器人在前进的过程中, 保持某种队形, 同时又要适应环境(例如障碍物)约束的控制技术^[2]. 研究较多的队形^[3]有横队形、纵队形、菱形和楔形, 这主要是从军事需要的角度考虑的.

多移动机器人保持一定的队形至少有以下几点好处^[1-6]:

- 充分获取当前环境信息. 单个机器人的传感器获取信息的能力是有限的, 如果多个机器人保持一定的队形, 而每个机器人的传感器负责获取自己

周围的环境信息, 这样就可以保证比较完整地获得机器人当前活动区域的环境信息. 对于实现侦察、搜寻、排雷及安全巡逻等任务是有利的.

- 增加抵抗外界入侵的能力. 作战过程中, 机器人士兵通过保持队形可以抵抗多方向的入侵, 增加自身安全性. 群居动物按一定队形行进可以有效抵抗掠食者的现象就是一例.

- 提高工作效率. 如果选择的队形适当, 可以加快任务的完成. 例如, 多个机器人推箱子, 机器人与箱子之间必须保持一定的几何关系才能够将箱子推向期望的方向. 这样的任务还有农作物收割、播种等.

- 提高系统的鲁棒性.

另外, 研究多机器人的队形保持问题, 对于自动公路系统及战斗机编队等也有指导意义, 因为它们共同之处都是多个智能体协作实现共同的目标.

2 研究现状(Current states of study)

美国是最早进行多军用机器人技术研究的国家

之一, 国防部高级研究计划局资助的 Dem o II 计划的目标就是为部队建立野外机器人侦察小队, 其中的机器人是配备有多种传感器的无人驾驶车辆 (UGV). 研究人员采用基于行为的队形控制技术, 实现了多个 UGV 协调工作^[7]. 另外, 还有将队形控制技术应用到飞行器上的报道, 并且美国航空和宇宙航行局和空军已将飞行器保持队形技术确定为 21 世纪的关键技术. 目前, 大部分研究工作仍然停留在仿真和实验室阶段.

队形保持控制一般分为两步: 首先根据当前环境确定各机器人的目标位置; 然后根据一定的控制策略生成控制命令, 驱动机器人以一定队形驶向目标位置. 到目前为止, 研究队形控制的方法大致有三种^[8], 分别是:

- 跟随领航者法 (leader-following);
- 基于行为法 (behavior-based);
- 虚拟结构法 (virtual structure).

3 三种队形控制方法的介绍 (Introduction to the 3 formation control strategies)

下面分别对这三种方法的基本思想、优缺点等进行讨论.

3.1 跟随领航者法

跟随领航者法的基本思想是: 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, 即不仅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. 这与一个步兵班在进攻中可以划分为若干战斗小组是类似的. 根据领航者与跟随机器人之间的相对位置关系, 就可以形成不同的网络拓扑结构, 也就是说, 形成不同的队形. 该方法中, 协作是通过共享领航机器人的状态等知识实现的.

跟随领航者法的优点是, 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. 该方法的主要缺点是系统中没有明确的队形反馈. 例如, 如果领航机器人前进得太快, 那么跟随机器人就有可能不能及时跟踪. 另一个缺点是如果领航机器人失效, 那么整个队形就会无法保持.

针对该方法的缺点, 一些文献提出了相应的解决办法. 文献[9~11]将反馈线性化技术引入到跟随领航者法中, 克服了该方法的第一个缺点, 并根据机器人之间的不同拓扑位置关系, 设计了适用于不同情况的三种控制器. 仿真和实验结果表明, 系统具有

很好的稳定性、可扩展性和灵活性. 文献[6]提出了“Leader 更换”法, 来克服跟随领航者法的第二个缺点, 当领航机器人失效时, 按一定的规则由其它机器人作为领航者.

3.2 基于行为法

这里的基于行为是指机器人个体采用基于行为的体系结构. 基于行为法的基本思想是: 首先为机器人规定一些期望的基本行为, 一般情况下, 机器人的行为包括避碰、避障、驶向目标和保持队形等. 当机器人的传感器接受到外界环境刺激时, 根据传感器的输入信息作出反应, 并输出反应向量作为该行为的期望反应 (例如, 方向和运动速度). 行为选择模块通过一定的机制来综合各行为的输出, 并将综合结果作为机器人对环境刺激的反应而输出. 该方法中, 协作是通过共享机器人之间的相对位置、状态等知识实现的.

对该方法的拓展和改变主要体现在对各行为输出的处理上, 即行为选择机制上. 目前主要有三种行为选择机制^[3,12]:

(1) 加权平均法, 将各个行为的输出向量乘以一定的权重再求出它们的矢量和, 权值的大小对应相应行为的重要性. 矢量和经过正则化后作为机器人的输出.

(2) 行为抑制方法, 对各个行为按一定的原则规定优先级, 选择高优先级行为的输出作为机器人的输出, 即高优先级的行为抑制低优先级的行为.

(3) 模糊逻辑法, 根据模糊规则综合各行为的输出, 从而确定机器人的输出. 其实这种方法是加权平均法的变异, 它根据具体情况来确定权值大小.

确定机器人在队形中的位置需要选定一个参考点, 有三个参考点可以考虑^[3,13]:

(1) 单位中心: 单位中心的坐标就是队形中各个机器人位置坐标的平均值. 每个机器人根据单位中心的位置来确定自己在队形中的位置.

(2) 领航机器人位置: 每个机器人根据领航机器人的位置来确定自己在队形中的位置. 领航机器人不负责保持队形, 仅由跟随机器人负责.

(3) 邻居位置: 每个机器人根据和它邻近的机器人来确定自己的位置.

针对不同的队形和选择不同的参考点, 队形保持效果就可能不同. 根据文献[3], 当队形转弯时, 采用单位中心为参考点, 菱形队形打乱的时间最短, 队形保持效果最好; 采用领航机器人位置为参考点, 楔形和横队形保持效果较好, 纵队形效果最差. 当队形

穿越有障碍区域时,纵队形效果最好.在大多数情况下,选择单位中心为参考点优于选择领航机器人位置为参考点.

基于行为法的优点是,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.另外,由于机器人根据其它机器人位置进行反应,所以系统中有明确的队形反馈.该方法的另一个优点是可以实现分布式控制,但主要缺点是不能明确地定义群体行为,很难对其进行数学分析,并且不能保证队形的稳定性等.

3.3 虚拟结构法

我们知道,当刚体以多自由度在空间中运动时,虽然刚体上的各点位置在变化,但它们之间的相对位置保持不变.假想将刚体上的某些点用机器人代替,并以刚体上的坐标系作为参考坐标系,那么刚体运动时,机器人在参考坐标系下的坐标不变,机器人之间的相对位置也保持不变,即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.

实现此方法需要三个步骤:

- (1) 定义虚拟结构的期望动力学特性;
- (2) 将虚拟结构的运动转化成每个机器人的期望运动;
- (3) 得出机器人的轨迹跟踪控制方法.

该方法中,协作是通过共享虚拟结构的状态等知识实现的.

虚拟结构法的优点是,可以很容易地指定机器人群体的行为(虚拟结构的行为),并可以进行队形反馈,能够取得较高精度的轨迹跟踪效果;机器人之间没有明确的功能划分,不涉及复杂的通信协议.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,目前的文献中,只将该方法用于二维无障碍的平面环境中.

3.4 其它方法

文献[14]提出一种采用分布式控制结构形成队形的方法.假设二维空间的平面上有 n 个机器人,且机器人可在平面上自由运动,它们之间要形成一定的队形.给每个机器人 R_i 提供一个两维向量 $(dxi, dyi)T$,该向量称为“队形向量”,它的物理意义是指定 R_i 与它所能感知到的机器人之间的相对位置.每个机器人控制它与周围机器人之间的相对位置.如

果队形向量与目标值有差异,就会引起机器人进行运动.每个机器人的运动规则由某数学公式(公式中包含 $(dxi, dyi)T$)决定.这就是说,该机器人系统由 n 个队形向量来控制队形,这样队形控制问题就变成一个控制队形向量的问题.文献提出了一种控制方案,并证明了系统是稳定和可控的.

文献[15]对随机分布在平面上的多移动机器人,如何才能形成一定的队形(直线和圆)进行了研究.在分析了已有算法的基础上,考虑到实际机器人的物理约束,提出了自己的改进算法.其主要思想是采用简单的几何方法来实现编队,并采用势场法来实现机器人之间的避碰.

这两种方法只讨论了编制静态队形问题,即分布在平面上的机器人如何形成一定形状的队形,队形是静止的,不涉及运动过程中的队形保持问题.

4 一种用于队形控制的体系结构(An architecture applied to control formation)

为了弥补各种方法的缺点,文献[5]和文献[8]介绍了一种新的队形控制体系结构.

如图1所示,结构分为三层.最低层是机器人个体和它们的控制器,机器人的输入就是其控制器的输出向量 u_i ,代表控制力或力矩;机器人的输出向量 y_i 代表机器人的位姿.局部控制器的输入为机器人的输出向量 y_i 和协调变量 ξ ,它的输出为控制向量 u_i 和执行变量 z_i ,它的目标是控制机器人位姿,使它符合队形协调变量的要求.

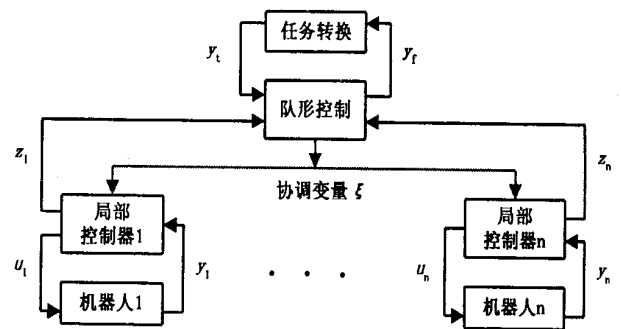


图1 队形控制体系结构

Fig. 1 Architecture for formation control

中间层进行队形控制,实现系统主要的协调机制.它的输出是协调变量 ξ ,通过广播输入给各局部控制器.另一个输出 y_f 代表了队形的性能,并作为最高层的输入.它的输入为来自于各机器人的执行变量 z_i 和最高层的输出 y_t .

最高层为离散事件监控器, 它根据队形的性能 y_f 来决定输出 y_t , 实现子任务的动态转换. 该体系结构有几个优点:

- 将集中控制和分散控制有机结合起来;
- 三层之间都有反馈, 系统的特性可以用控制理论进行分析;
- 可以将多种控制策略用于中间协调层和局部控制器, 使设计更灵活, 并且可在同一框架中比较各种控制策略的优劣.

这种体系结构包含了跟随领航者法、基于行为法和虚拟结构法. 跟随领航者法中, 通过领航机器人完成协调, 因此中间层就是领航机器人. 但当前关于跟随领航者法的文献中, 还没有实现各局部控制器与中间层间的连接, 还需要进行进一步的探讨. 基于行为法中, 协调机制是机器人之间的相对方位向量, 因此中间层输出的协调变量 ξ 中要包括相对位置、速度、角速度和姿态向量. 但当前关于基于行为法的文献中, 还没有引入离散事件监控器, 这一点也需要研究. 虚拟结构法中, 通过虚拟结构实现协调. 文献[8]将该体系结构和虚拟结构法结合, 实现了队形控制, 通过引入队形反馈保证了系统的稳定性和较强的鲁棒性.

5 结论(Conclusion)

本文对几种常见的队形保持控制方法进行了讨论, 分析了各自的优缺点, 并介绍了一种能包含这几种方法的体系结构, 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 (References)

- [1] M B Dias, A Stentz. A Market Approach to Multirobot Coordination. Technical Report CMU-R I-TR-01-26. Robotics Institute, Carnegie Mellon University, August, 2001
- [2] 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. 机器人, 2000, 20(6): 433- 438
- [3] T Balch, R C Arkin. Behavior-based Formation Control for Multi-robot Teams. IEEE Trans on Robotics and Aut, 1998, 14(6): 1- 15
- [4] Lynne E. Parker. Adaptive Heterogeneous Multi-robot Teams. Neurocomputing, 1999, 28: 75- 92
- [5] Randal W. Beard, Jonathan Lawton, Fred Y. Hadaegh. A Coordination Architecture for Spacecraft Formation Control. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(6): 777 - 790
- [6] 曹志强, 张斌, 谭民. 基于行为的多移动机器人实时队形保持. 高技术通信, 2001, 10: 74- 77
- [7] Chun W H, Jochem T M. Unmanned Ground Vehicle Demonstration A. Proceedings of SPIE Mobile Robots IX, 1994, 2352: 180- 191
- [8] Brett J Young, Randal W Beard, Jed M Kelsey. A Control Scheme for Improving Multi-Vehicle Formation Maneuvers. American Control Conference, Arlington, VA, June 25- 27, 2001, 704- 709
- [9] J P Desai, J Ostrowski, V Kumar. Controlling formation of multiple mobile robots. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998, 2864- 2869
- [10] R Fierro, A K Das, V Kumar, J P Ostrowski. Hybrid Control of Formation of Robots. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Sponsored by: IEEE, 2001, 1: 157- 162
- [11] J Desai, V Kumar, J Ostrowski. Control of Changes in Formation for a Team of Mobile Robots. Proceedings of 1999 International Conference on Robotics and Automation, 1999, 1556- 1561
- [12] Steven G. Goodridge. A Fuzzy Behavior-Based Nervous System for an Autonomous Mobile Robot. Master thesis, North Carolina State University, 1994
- [13] Hiroaki Yamaguchi, Tamio Arai, Gerardo Beni. A Distributed Control Scheme for Multiple Robotic Vehicles to Make Group Formations. Robotics and Autonomous Systems, 2001, 36: 125 - 147
- [14] Xiaoping Yun, Gokhan Alptekin, Okay Albayrak. Line and Circle Formation of Distributed Physical Mobile Robots. 1997, 14 (2): 63- 76
- [15] T Balch, R Arkin. Motor Scheme-based Formation Control for Multiagent Robot Teams. In proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems, 1995, 17- 24
- [16] Suzuki, Sekine, Fujii, Asama. Cooperative formation among multiple mobile robot teleoperation in inspection task. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control Sponsored by: IEEE, 2000, 1: 358- 363
- [17] Y U Cao, A S Fukunaga, A B Kahng, F Meng. Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. Proc IEEE/RSJ IROS, Pittsburgh, PA, 1995, 1: 226- 234
- [18] Q Chen, J Y S Luh. Coordination and Control of a Group of Small Mobile Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994, 2315- 2320
- [19] J Lawton, B Young, R Beard. A Decentralized Approach to Elementary Formation Maneuvers. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, April 2000

作者简介:

苏治宝 (1971-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机电系统控制及自动化, 智能控制.

陆际联 (1939-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 机器人学、测量与控制、无人驾驶车辆.