

移动机器人编队的运动控制策略

梁家海^{1,2}

(1. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124; 2. 钦州学院 数学与计算机科学学院, 广西 钦州 535000)

(qzljh@163.com)

摘要:为实现移动机器人编队的多样性、稳定性和队形变换连续性,并解决移动机器人编队运动中的避障、避碰、到达目标的问题,对基本队形进行分析,提出队形参数化的思路,建立基本队形虚结构的参数化数学模型,通过调整参数使队形在基本队形及其衍生的队形间进行变换;机器人在运行的过程中,利用行为融合方法、跟随领航者法、人工势场法和虚结构法对机器人进行运动控制,实现了机器人的避障、避碰、队形归建等目标。对上述策略进行了仿真实验,实验结果表明,使用本策略既保留了虚结构法队形稳定、队形归建迅速的优点,又改进了其灵活性差的不足。

关键词:移动机器人编队;队形参数化;运动控制;虚结构

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Motion control strategy for mobile robot formation

LIANG Jia-hai^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Mathematics and Computer Science, Qinzhou University, Qinzhou Guangxi 535000, China)

Abstract: This paper studied how to achieve the diversity, stability and continuity of formation change for mobile robots, and solved the problem of obstacle and collision avoidance for the robot formation to reach the destination. The basic formation was analyzed and the idea of formation parameterization was presented. Parametric mathematical model was established for the virtual structure of basic formation. Formation alternated between basic formation and derivative formation by adjusting the parameters. Robot motion can be controlled by using behavior fusion method, follow pilot method, artificial potential field method and virtual structure method. The simulation and experimental results show that this strategy not only retains the advantage of stability and rapid formation of virtual structure method but also improves flexibility.

Key words: mobile robot formation; formation parametrization; motion control; virtual structure

移动机器人编队是一个具有典型性和通用性的多机器人协调问题,是多机器人协调问题的基础。所谓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(例如存在障碍物或者空间的物理限制)的控制技术。通过研究开发及实用化,该技术在工农业生产、柔性制造、无人探险(海洋、太空、核环境),特别是在国防工业中的巨大应用前景逐步表现出来。目前实现编队主要方法有产生式方法、行为融合方法、跟随领航者法、虚结构法等^[1-3],这些方法都有着不同的优、缺点。产生式方法的优点是反应速度很快,缺点是规则不容易制定。行为融合方法的优点是每个机器人都可以兼顾到各种行为,完成各种行为的功能,同时控制意义明确利于实时控制;缺点是各子行为的融合具有不可知性,且融合的方法不容易确定,队形难以确定。跟随领航者法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,缺点是保持队形困难。虚结构法的优点是容易制定队列的策略并且在稳定性上有保证,缺点是队形缺乏灵活性^[4-5]。本文提出了一种融合了行为融合方法、跟随领航者法、虚结构法主要思想,并结合人工势场法的多机器人编队控制方法,能较好地克服上述方法存在的不足。

1 主要思想

在军事上,美军机械化突击分队在战场上有四种标准队形,分别为一字形队形、单列纵队形、菱形队形和楔形队

形^[6],如图1所示。这四种队形也被称为移动机器人编队的基本队形,移动机器人编队在工作过程中,常常需要根据执行的任务、环境等因素的变化而改变队形^[7],许多的队形由这几种基本队形变形而来^[8]。

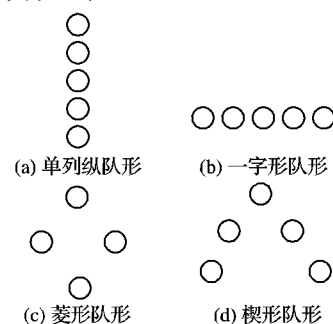


图1 机器人编队的四种基本队形

通过对基本队形的分析,我们发现每个基本队形都可以用函数进行表示,而修改基本队形的函数的参数,可以使其变换到另一种基本队形或其衍生的队形。基于这一特点,结合虚结构法建立基本队形的虚结构,将基本队形进行函数化,建立参数化的基本队形的虚结构数学模型,通过调整参数使队形在四个基本队形及其衍生的队形间进行连续的变换。然后,建立每个机器人与队形顶点对应的关系,并设定一个领航机器人,领航机器人引领整个编队奔向最终目标点,其他机器人按照跟随领航者法奔向其对应的顶点。机器人在运行的

过程中,利用行为融合方法、人工势场法和队形变换法进行避障、避碰。这样使对机器人编队的控制转换为对参数的调整,既提高了队形稳定性、多样性,实现避障、避碰、到达终点的功能,又克服了灵活性差的不足。

2 机器人编队数学模型及运动控制

机器人编队数学模型是机器人编队几何图形中各顶点位置关系的抽象,通过机器人编队的数学模型可以计算出队形中各顶点的位置;利用人工势场法等方法建立机器人的运动控制模型,实现对机器人编队的运动控制。

2.1 机器人编队数学模型

通过对基本队形的分析,我们将基本队形表示在同心圆上, R_0 为领航机器人,其坐标为 (x_0, y_0) , R_i 为第 i 个机器人,其坐标为 (x_i, y_i) , 如图 2 所示。依据图中所示的关系,建立各队形的数学模型。

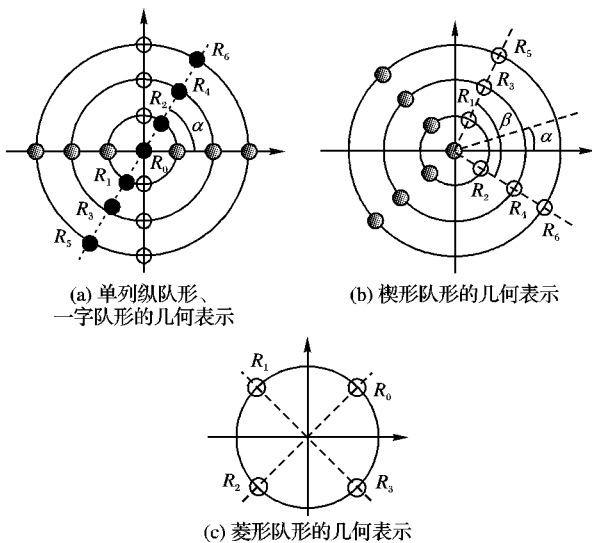


图2 基本队形的几何表示

1) 一字形队形、单列纵队形。

一字形队形、单列纵队形用同一个数学模型来表示,定义如式(1)所示:

$$\begin{cases} x_i = x_0 + (-1)^i \times (i+1)/2 \times \gamma \times \cos \alpha \\ y_i = y_0 + (-1)^i \times (i+1)/2 \times \gamma \times \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中: α 为队形的倾角,改变 α 的值队形的方向随之变化,当 $\alpha = 0$ 时为一字形队形, $\alpha = 90$ 时为列纵队形; γ 为机器人间的距离,如图 2(a) 所示。

2) 楔形队形。

楔形队形的数学模型如式(2)所示:

$$\begin{cases} x_i = x_0 + (i+1)/2 \times \gamma \times \cos [\beta + (-1)^i \times \alpha] \\ y_i = y_0 + (-1)^i \times (i+1)/2 \times \gamma \times \sin [\beta + (-1)^i \times \alpha] \end{cases} \quad (2)$$

其中: α 为队形的方向角, β 为队形的夹角, γ 为机器人间的距离,如图 2(b) 所示。

3) 菱形。

菱形队形的数学模型如式(3)所示:

$$\begin{cases} x_i = x_0 - \gamma + \gamma \times \cos (i \times 360/n + \beta) \\ y_i = y_0 + \gamma \times \sin (i \times 360/n + \beta) \end{cases} \quad (3)$$

其中: β 为队形的夹角, γ 为菱形内切圆的半径, n 为编队机器人的数量,如图 2(c) 所示。

对以上四个基本队形的数学模型进行综合,建立如下的

基本队形通用数学模型:

$$\begin{cases} x_i = x_0 - M \times \gamma + (-1)^{(G \times i + Q) \times K} \times \left(\frac{i+1}{2} \right)^P \times \\ \quad \gamma \times \cos(\beta + H \times \alpha) \\ y_i = y_0 - (-1)^{i \times K} \times \left(\frac{i+1}{2} \right)^P \times \gamma \times \sin(\beta + H \times \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, M, G, Q, K, P, H 为队形的调速参数,其他参数意义同上。通过对这些参数的修改不但可以实现四种基本队形间的变换,而且对每一种基本队进行变形,实现了队形的连续变化。

2.2 机器人编队运动控制

虚结构法在队形保持方面具有良好的控制能力,但不能解决编队在避障和防撞的问题;跟随领航者法能较好解决编队奔向目标上的问题;行为融合方法解决了机器人编队在复杂环境中的避障和防撞问题。本文将机器人编队的运动过程看做是以上三种控制方法共同作用的结果,每一种控制方法对编队的影响力通过人工势场来实现。因此,通过建立每一种方法对编队中的机器人的人工势场,从而融合行为融合方法、跟随领航者法、虚结构法对机器人编队的控制能力,使这三种方法扬长避短。具体的实现过程是:首先指定一个机器人作为编队的领航者(Leader),建立目标点对领航者的人工势场;然后以领航者用作为队形的参照点,利用编队的数学模型计算出队形的所有顶点作为虚结构法队形控制点,建立每个机器人与顶点一一对应的关系,建立顶点除领航者外所有其他机器人的人工势场;再建立机器人之间的人工势场及障碍物对机器人的人工势场,最后根据行为融合的思想将机器人的运动分解为目标跟随运动、避障运动、机器人间的防撞运动,每一种运动都是受相关的势场力的作用的结果,如图 3 所示,合力的方向和强度决定了机器人最终运动的方向和速度。

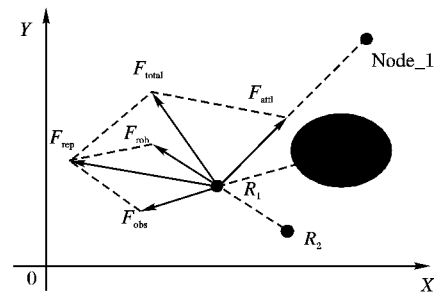


图3 机器人受力关系图

1) 目标跟随运动。

对于领航者而言,跟随运动的目标是整个编队的目标,对于其他机器人而言,跟随运动的目标是该机器人所对应的队形顶点。目标对相关的机器人产生引力势场,从而对该机器人产生引力,引力场函数如式(5)所示:

$$U_{att}(q) = \varepsilon K \rho(q, q_{goal}) \quad (5)$$

其中: ε 是一个正的引力比例因子, K 目标点吸引力强度, $\rho(q, q_{goal})$ 是机器人 q 和目标 q_{goal} 之间的距离。相应的斥力函数可表示如下:

$$F_{att}(q) = -\Delta U_{att}(q) = \varepsilon K \quad (6)$$

2) 避障运动。

避障运动是由于障碍物对机器人所产生斥力引起,避障运动的方向和速度取决于障碍物对机器人的斥力强度和方向,斥力如下式所示。

$$F_{\text{obs}}(q) = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\Delta \rho(q, q_{\text{obs}})}{\rho^2(q, q_{\text{obs}})}, & \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中: η 是一个正的斥力比例因子; $\rho(q, q_{\text{obs}})$ 为机器人到障碍物的距离; ρ_0 为障碍物的影响距离, 超出了这个距离, 障碍物对机器人就没有斥力的作用。

3) 机器人间的防撞运动。

为了防止机器人相互碰撞, 设计了机器人间人工斥力势场, 每个机器人对其他机器人所产生的势力的数学模型与障碍物斥力模型相同, 如式(7)所示, 每个机器人的所受的斥力为其他机器人对该机器人的所施加的斥力合力, 如式(8)所示。

$$F_{\text{rob}} = \sum_i F_{\text{robi}} \quad (8)$$

机器人总受力为目标点的吸引力、所有障碍物对其产生的斥力及所有机器人对其产生的斥力的合力, 即:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{att}} + \sum_i F_{\text{ropi}} + \sum_i F_{\text{repi}} \quad (9)$$

机器人的运动方向为合力的方向, 机器人的运动速度与其所受合力成正比, 即:

$$V = \lambda \times F_{\text{total}} \quad (10)$$

其中 λ 为合力、速度比例因子。

3 仿真实验及结果分析

本研究的仿真程序设计采用 Visual C# 2005 进行开发, 仿真显示在计算机的绘图空间内进行; 机器人设计为智能体 (Agent), 机器人能感知自己的位置信息, 并通过通信获知其他机器人的位置信息。障碍物为 4 个圆形的二维障碍物, 其位置和大小在一定的范围内随机生成, 分别进行了队形变换的仿真实验和避障、避碰仿真实验。

1) 队形变换仿真。

队形变换仿真测试了机器人编队四种队形变换的过程, 队形的数学模型为式(4), 定义 t 为仿真过程的时间。在 $t = 0$ 时刻, 随机产生 5 个机器人, 仿真参数设为 $M = 0, G = 1, Q = 0, K = 1, P = 0, H = 1, \beta = 0, \alpha = 90, \gamma = 70$, 在 $t = 39$ 时刻, 机器人列排成单列纵队, 如图 4(a) 所示; 在 $t = 40$ 时刻队形的倾角 α 设为 45° , 其他参数不变, 编队经过 41 个单位时间, 在 $t = 81$ 时刻, 编队变换成 45° 的斜队形, 如图 4(b) 所示。在 $t = 82$ 时刻队形参数设为: $M = 1, G = 1, Q = 0, K = 2, P = 1, H = (-1)^i, \beta = 0, \alpha = 90, \gamma = 70$, 在 $t = 141$ 时刻, 编队变换成楔形队形, 如图 4(c) 所示; 在 $t = 142$ 时刻队形参数设为: $M = 1, G = 1, Q = 0, K = 1, P = 0, H = 360/n, \beta = 0, \gamma = 70$, 在 $t = 267$ 时刻, 编队变换成菱形队形, 如图 4(d) 所示。从仿真的过程中, 可以看出机器人编队能随着参数的改变迅速改变队形, 队形准确且稳定性好; 在队形的变换过程中, 机器人能避免互相碰撞。

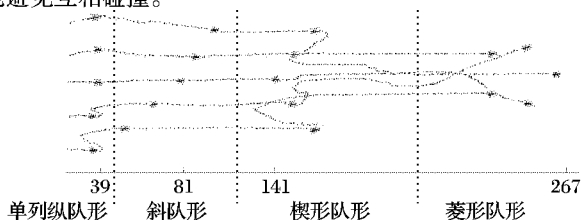


图4 队形变换仿真过程

2) 避障、避碰仿真对比。

在避障、避碰仿真对比过程中, 分别进行行为融合方法和本文策略控制的机器人编队通过障碍物的仿真; 障碍物为 4 个圆形的障碍物, 其位置和大小在一定的范围内随机生成。图 5(a) 所示为采用行为融合方法控制的机器人编队通过障碍物的仿真结果; 图 5(b) 所示为采用本研究策略控制的机器人编队通过障碍物的仿真结果。从图 5(a)、图 5(b) 看出两种方法在通过障碍物时都能顺利避开障碍物, 机器人间没有发生碰撞; 同时还可以看出采用本研究策略的图 5(b) 比图 5(a) 在运行过程中在避障、避碰的前提下保持队形更好, 在通过障碍物区后, 在更短的时间内完成了队形的重整。

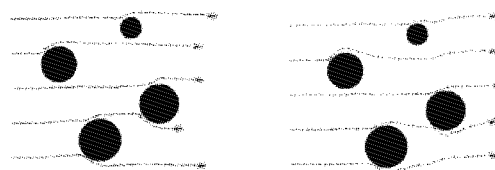


图5 避障、避碰的仿真效果对比

以上的两组仿真实验结果表明: 采用本策略可以使机器人编队在运行过程中通过调整队形数学模型参数的方式实现队形的变换; 同时具有避障、避碰的作用和队形稳定、归建迅速的优点。

4 结语

机器人编队和运动控制是一项复杂的工程, 将目前成功应用于机器人编队和运动控制的策略综合起来扬长避短不失为一种很好的思路。本文通过建立队形的数学模型将队形进行参数化, 实现了队形变换的连贯性; 利用虚结构法对队形进行约束, 从而使队形的稳定; 在机器人运动过程中利用人工势场法、行为融合、领航者法实现机器人的避障、避碰。仿真结果表明该策略既能弥补单一算法的不足又能保留其优点, 达到了预期的目标, 为相关的研究提供了很好的借鉴。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孟伟, 洪炳熔, 韩学东. 一种多机器人协作控制方法[J]. 机器人, 2004, 26(1): 58-62.
- [3] SHI HONG, WANG LONG. Swarming behavior of multi-agent systems[J]. Journal of Control Theory and Application, 2004, 2(4): 313-318.
- [4] GROB R, DORIGO M, YAMAKITA M. Self-assembly of mobile robots: from swarm-bot to super-mechano colony[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Amsterdam: IOS Press, 2006: 487-496.
- [5] 韩逢庆, 李红梅, 李刚, 等. 一种改进的多机器人任意队形控制算法[J]. 机器人, 2003, 25(6): 521-525.
- [6] BALE T, ARKILL R C. Behavior-based formation control for multi robot teams [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 23(14): 926-939.
- [7] 张颖, 陈雪波. 广义蚁群算法及其在机器人队形变换中的应用[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(3): 319-324.
- [8] 熊举峰, 谭冠政. 未知环境中群机器人队形移动[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(4): 896-900.