

## 基于人工势场法和 Ad-hoc 网络的多机器人编队控制\*

樊玮虹,唐波,蔡宣平,刘云辉

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** ad-hoc 网络具有自组性强、快速组网和高抗毁等特性,以它组网的多机器人编队适用于一些无法预先安装通信设备的特殊场合。但是由于 ad-hoc 网络的通信覆盖范围有限、网络动态性强,在进行编队控制时如果不考虑编队中机器人之间的通信距离,可能导致机器人因与网络失去联系而脱离编队。为了确保多机器人编队的完整性,在使用势场法进行编队控制时,除考虑目标和障碍物的影响外,同时将机器人之间的通信距离作为一种引力加入传统的环境势场模型。仿真实验的结果证明该方法可以有效地控制 ad-hoc 方式组网的机器人编队。

**关键词** 多机器人;编队控制;势场;ad-hoc

**中图分类号** TP242;TP393 **文献标识码** A

## Multi-robot Formation Control Using Potential Field for Mobile Ad-hoc Networks

FAN Wei-hong, TANG Bo, CAI Xuan-ping, LIU Yun-hui

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Mobile ad-hoc networks are characterized by self-organization, rapid deployment and fault tolerance. A multi-robot formation supported by mobile ad-hoc networks is suitable to some special situations where the communication devices of mobile networks cannot be preinstalled. However, ad-hoc networks are of limited communication range and frequent topology change. If the communication distance of robot isn't taken into account, some robots will escape from the formation whenever it is not within the communication range of the networks. In order to ensure the integrality of the multi-robot formation, a potential field based approach was proposed, in which the special attractive force caused by inter-robot distance, together with the attractive force and the repulsive forces respectively caused by goal and obstacles, has been taken into account. The results in simulation demonstrate that the approach can effectively control the change of multi-robot formation in mobile ad-hoc networks.

**Key words** multi-robot; formation control; potential field; ad-hoc

机器人编队有着广泛的应用,如军事上可以用于侦察、搜寻、排雷及安全巡逻等任务,民用上可用于农作物收割、播种等<sup>[1]</sup>。一般情况下,多机器人编队采用的蜂窝网、集群系统、卫星通信系统和无线局域网等无线通信网络可以提供大范围的通信保证。但是在有些特殊场合,如战场上部队快速展开和推进<sup>[2]</sup>、地震或水灾后的营救等,无法采用上述无线通信网络。ad-hoc 网络是一种能够临时快速自动组网,不依赖于任何预设网络设施的移动网络<sup>[3]</sup>,可以满足这样的要求。

然而,ad-hoc 网络的通信能力有限,其通信覆盖范围通常只有几十到几百米,如果受到高山、建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境的影响,通信覆盖范围受到严重影响<sup>[4]</sup>。因此,在对基于 ad-hoc 网络的多机器人编队进行编队控制时,必须考虑其通信距离的影响,以避免某些机器人超出网络通信覆盖范围而失去与编队的联系。本文提出了一种改进的势场法实现基于 ad-hoc 网络的机器人编队控制,并通过两个仿真实验与传统的势场法进行比较,给出了比较的结果,并对将来的工作进行了展望。

\* 收稿日期 2006-02-27

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60334010);国家自然科学基金资助项目(60475029)

作者简介:樊玮虹(1970—),女,副教授,博士生。

### 1 机器人的外界环境模型

编队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,同时又要适应环境约束(例如存在障碍物或者空间的物理限制)的控制技术<sup>[5]</sup>。机器人在合作编队过程中通常要保持一定的队形行进,但是在遇到障碍物等情况下各机器人能够自动避障,并在远离障碍物时自动恢复队形。在不同的任务要求中,编队的形状和维持队形的严格程度也是不同的。在现实中,往往需要多个移动机器人在存在障碍约束的环境下,从初始位置运动到某个指定的目标位置,或者是在指定的区域内进行漫游(搜索),不需要保持很严格的编队形状。

一般情况下进行编队控制时,假设无论队形如何变化,无线网络的通信范围足够覆盖整个编队。然而,ad-hoc网络有限的通信能力和较强的网络动态性无法满足这一假设。编队在避障等过程中机器人之间的距离产生变化,可能使得某个机器人的通讯覆盖范围内没有其它机器人,由于它不能接收编队的命令和发送自身的信息而暂时甚至永远地脱离编队。为了避免这种情况发生,在使用势场法进行编队控制时,除考虑目标和障碍物的影响外,同时将机器人之间的通信距离作为一种引力。

为简单起见,在进行基于 ad-hoc 网络的多机器人合作编队控制之前,先做以下假设:

- (1) 移动通讯网络中的机器人被看作是一个移动节点,使用全向天线进行通信,具有相同的通信能力,采取广播式路由协议进行通信;
- (2) 每个机器人的地理位置信息都是已知的;
- (3) 传感器感知范围为一个圆形区域,并且小于通信范围;
- (4) 把机器人看作是一个近似的质点,并在一个二维的空间运动,它在空间的位置可表示为  $q = [x \ y]^T$ 。

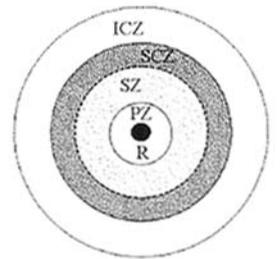


图1 机器人的外界环境模型  
Fig.1 The outer environment model

图1是 ad-hoc 网络中的一个机器人的外界环境模型,包含以下区域:避碰区域(Protected Zone, PZ)、传感器感知区域(Sensing Zone, SZ)、安全通信区域(Safety Communication Zone, SCZ)和产生通信引力区域(Influence Communication Zone, ICZ)。各区域的半径分别表示为  $\rho_P$ 、 $\rho_S$ 、 $\rho_{SC}$  和  $\rho_{IC}$ 。

PZ 是机器人 R 受到保护的区域,它的半径比机器人本身体积稍大,在这个区域内如果检测到障碍物或其它机器人时,产生的斥力为  $\infty$ ,以免机器人与其他物体发生碰撞。机器人在 SZ 内检测到障碍物或其它的机器人则会产生斥力,使机器人可以安全避障。这个区域内如果检测到多个障碍物或其它机器人时,该机器人将受到一个离它最近的障碍物产生的斥力。考虑通信引力时,仅考虑与机器人 R 拓扑结构上相邻的机器人 Q。如果 Q 位于 R 的 SCZ 内,则不产生通信引力,即通信引力为 0;如果 Q 位于 R 的 ICZ 内,则产生一个通信引力,距离越远,产生的引力越大。这种通信引力可以保证编队中的机器人不会脱离整个编队。

### 2 改进的环境势场模型

传统的势场法进行机器人编队控制时,只考虑了目标引力和障碍物产生的斥力的作用,不适合基于 ad-hoc 网络的机器人编队。在引入通信距离产生的虚拟引力后,机器人 q 在运动过程中所受的总势场力  $F_{total}$  由通信引力  $F_{com}$ ,目标引力  $F_{goal}$  和障碍物产生的斥力  $F_{rep}$  三部分组成,如图2所示。

$$F_{total} = F_{com} + F_{goal} + F_{rep} \quad (1)$$

定义  $Q \subset R^2$  为所有机器人的集合,  $q_i \in Q, i = 1, \dots, n$  表示编队中第 i 个机器人的位置,  $\rho(q, q_i)$  表示机器人 q 与  $q_i$  之间的距离,

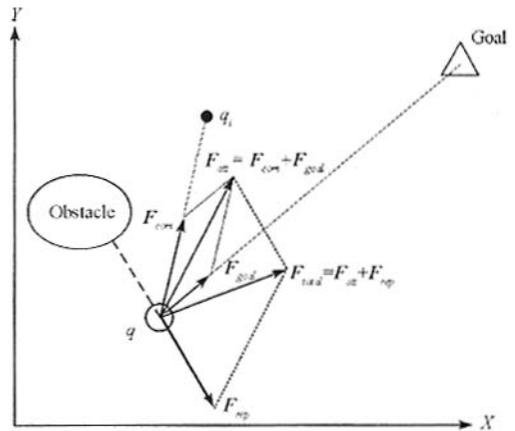


图2 加入通信引力后的新势场合示意图  
Fig.2 Resultant force scheme of leading into the communication force

由机器人  $q_i$  产生的势场  $U_{com,i}$  为

$$U_{com,i}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \xi \rho^2(q, q_i), & \text{if } \rho_{SC} < \rho(q, q_i) \leq \rho_{IC} \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_i) \leq \rho_{SC} \text{ or } \rho(q, q_i) > \rho_{IC} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\xi$  是一个正数比例因子,  $\rho_{SC}$  和  $\rho_{IC}$  分别表示 SCZ 和 ICZ 的半径。相应的吸引力  $F_{com,i}$  是吸引力势场  $U_{com,i}$  的负梯度。

$$F_{com,i} = -\nabla U_{com,i}(q) = \begin{cases} \xi(q_i - q), & \text{if } \rho_{SC} < \rho(q, q_i) \leq \rho_{IC} \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_i) \leq \rho_{SC} \text{ or } \rho(q, q_i) > \rho_{IC} \end{cases} \quad (3)$$

只有拓扑结构中 与机器人  $q$  相邻的机器人 才会对其产生通信引力。用  $Q_{com}$  表示机器人  $q$  拓扑相邻的其它机器人, 则总的通信引力为

$$F_{com} = \sum_{i \in Q_{com}} F_{com,i} \quad (4)$$

用同样的方法可以计算目标引力[6]。  $q_{goal}$  为目标位置,  $\rho(q, q_{goal})$  代表机器人  $q$  与目标  $q_{goal}$  的距离, 则目标引力势场  $U_{goal}(q) \in R^2$  和相应的目标引力  $F_{goal}(q)$  为

$$U_{goal}(q) = \frac{1}{2} \zeta \rho^2(q, q_{goal}) \quad (5)$$

$$F_{goal}(q) = -\nabla U_{goal}(q) = \zeta(q_{goal} - q) \quad (6)$$

其中  $\zeta$  为正比例因子。显然, 目标引力的大小与距离成线性关系, 机器人到达目标位置后其目标引力大小为零。

如图 2 所示, 机器人  $q$  周围的障碍物对它产生斥力。其它的机器人在传感器感知区域内时也将看作是障碍物。设  $O \subset R^2$  是所有障碍物的集合, 并且有  $q_{obs_i} \in O, i = 1, \dots, m$  表示第  $i$  个障碍物的位置。  $q_{obs}$  表示离机器人  $q$  最近的障碍物,  $\rho(q, q_{obs})$  表示它们之间的距离, 则斥力的势场函数  $U_{rep} \in R^2$  为

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

其中  $\eta$  是一个正数比例因子,  $\rho_S$  是传感器感知区域半径。相应地, 斥力函数  $F_{rep}$  为

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\rho(q, q_{obs})} - \frac{1}{\rho_S} \right) \frac{1}{\rho^2(q, q_{obs})} \nabla \rho(q, q_{obs}), & \text{if } \rho(q, q_{obs}) \leq \rho_S \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_{obs}) > \rho_S \end{cases} \quad (8)$$

改进后的势场模型能够在保证编队通信正常的情况下推动机器人远离障碍物, 吸引机器人向着目标位置前进。

### 3 队形控制仿真

在编队控制中研究较多的队形有横队、纵队、菱形和楔形<sup>[7-8]</sup>。对于每一种队形, 每个机器人都有固定的 ID 和队形中指定的位置。图 3 说明了机器人群的队形以及各机器人在各种队形中的位置。编队控制的任务就是从一个给定的初始位置, 在保证编队通讯正常的情况下, 实现自动避障并成功地到达指定的目标位置。

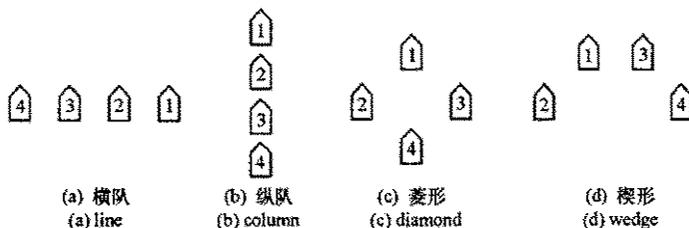


图 3 机器人基本队形

Fig.3 Formations for four robots

为简化起见,做以下假设:

- 1)机器人的运动速度为  $1\text{m/s}$ ;
- 2)每个机器人节点间隔  $1\text{s}$  按通信协议广播一次自己的数据信息,如位置、运动速度、障碍位置、道路环境等。
- 3)机器人受到的总势场力只决定机器人的运动方向;
- 4)队形保持中机器人之间的距离为  $6\text{m}$ 。

为了在仿真实验中较快看到通信距离对队形变换的影响,将通信距离选取得比实际值要小一些。用于仿真的外界环境模型参数见表 1。

表 1 队形控制仿真实验参数

Tab.1 Parameter values used in simulation of formation control

参数	值(m)
避碰区域半径 $\rho_P$	2
感知区域半径 $\rho_S$	4
安全通信区域半径 $\rho_{SC}$	8
产生通信引力区域半径 $\rho_{IC}$	13

在编队行进的道路设置了圆形障碍物,仿真界面的左下角是原点位置,编队的起始位置在原点附近,目标位置在右上角,分别对传统的势场法和改进后的势场法进行了同等条件下的仿真。

### 3.1 仿真实验一

第一个仿真实验的任务是控制机器人编队按四种队形运动到预定的目标位置。采用传统势场法的仿真结果如图 4 所示。采用改进势场法的仿真结果如图 5 所示。从图中比较可以看出,由于受通信引力的影响,机器人的运动路径变得简单了。图 6 描述横队队形运动过程中机器人之间的距离( $D_{1-2}$ ,  $D_{2-3}$ , and  $D_{3-4}$ )在编队运动过程中随时间的变化。这里存在通信引力作用的机器人由队形的拓扑结构决定。图 6(a)是没有考虑通讯引力的结果。机器人 1-2 之间的距离  $D_{1-2}$  和 3-4 之间的距离  $D_{3-4}$  在大部分时间超出了 ad-hoc 网络的通信范围,此时,机器人 1 和机器人 4 与编队失去了联系。图 6(b)表示改进势场法的结果。在考虑了通信引力后,机器人之间的距离都始终保持在编队网络的通信范围内。不过通信引力的加入使得机器人之间存在相互制约的关系,导致编队要花更长的时间才能到达目标位置。

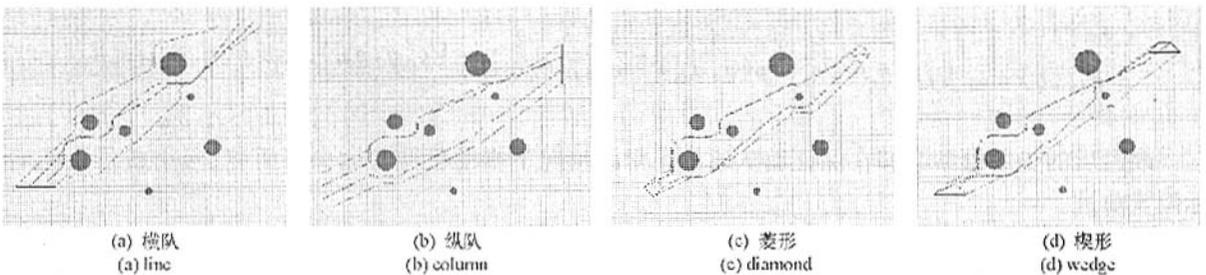


图 4 采用传统势场法机器人编队的运动轨迹

Fig.4 The movement trace by traditional potential field method in simulation I

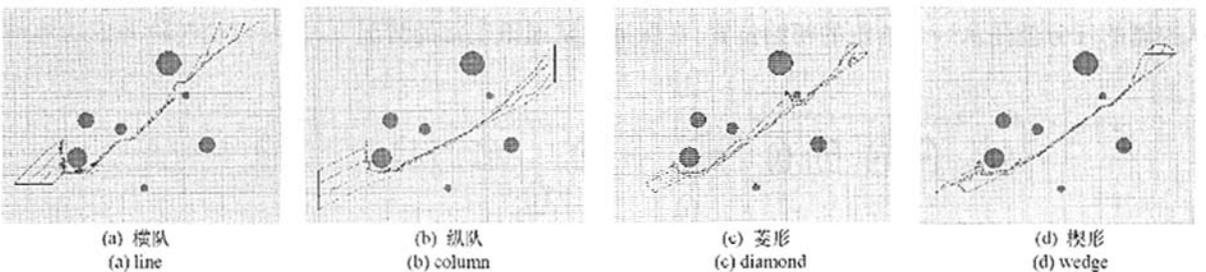


图 5 采用改进势场法机器人编队的运动轨迹

Fig.5 The movement trace by modified potential field method in simulation I

### 3.2 仿真实验二

在第二个仿真实验中,多机器人编队的原目标位置与仿真实验一中相同,但是在到达目标位置之前,由于某种原因,控制器发出命令要求编队在运动过程中改变其目标位置,新的目标位置为仿真界面的右下角。以纵队和菱形两种队形为例,如图7所示。采用传统的势场法进行编队控制时,与编队失去联系的机器人因为不能接收新的指令而继续向原目标位置前进,如图7(a)和(c)所示。采用改进的势场法后,由于通讯引力的加入保证了整个编队的正常通讯,编队中的每个机器人收到新的指令后,朝着新的目标位置前进,如图7(b)和(d)所示。

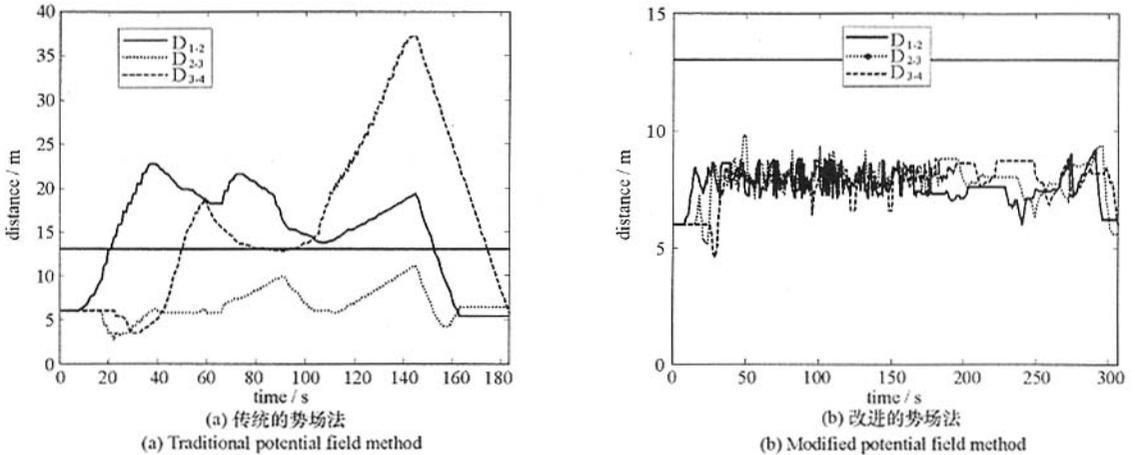


图6 横队队形运动过程中机器人之间的距离( $D_{1-2}$ 、 $D_{2-3}$ 和 $D_{3-4}$ )变化曲线

Fig.6 The variation of the inter-robot distances ( $D_{1-2}$ ,  $D_{2-3}$ , and  $D_{3-4}$ ) of formation of line type on the process of movement

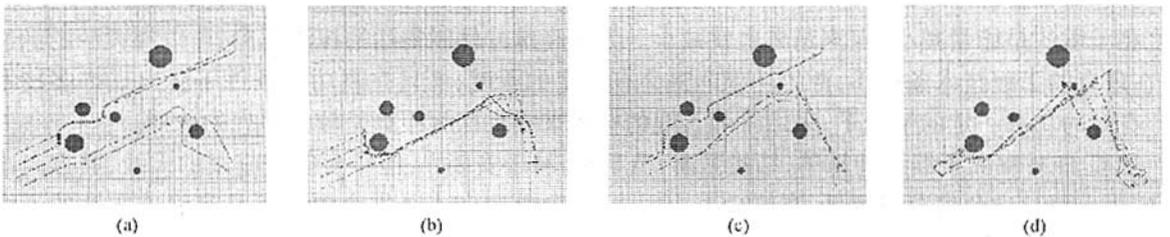


图7 运用传统势场法(a,c)和改进势场法(b,d)对纵队(a,b)和菱形(c,d)两种队形进行第二种仿真的运动轨迹

Fig.7 The movement trace in simulation II for column formation (a,b) and diamond formation (c,d) by using traditional (a,c) and modified potential field method (b,d)

## 4 结论

本文针对 ad-hoc 无线通信网络通信能力有限和网络动态性较强等特点,提出改进的势场法进行编队控制,并通过仿真实验证明了该方法对基于 ad-hoc 网络的机器人编队控制的有效性。下一步的工作将在真实的实验平台<sup>[9]</sup>下进行基于 ad-hoc 网络的移动智能机器人的编队控制研究,提高其容错性和鲁棒性等性能。

## 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] 江元龙, 王世练, 张尔扬. 战术移动 Ad Hoc 网络下的分布式位置辅助功率控制算法[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(1): 78-83.
- [3] 赵志峰, 郑少仁. ad-hoc 网络[J]. 中国数据通信, 2002, 9: 1-5.
- [4] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [5] 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.
- [6] Ge S S, Cui Y J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2000, 16(5), 615-620.
- [7] 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.
- [8] Arkin R C. Motor Schema Based Mobile Robot Navigation[J]. International Journal of Robotics Research, 1989, 8(4): 92-112.
- [9] 樊玮虹, 刘云辉, 李莹莹. 基于移动通讯网络和机器人群的分布式主动传感系统实验平台[J]. 机器人, 2005, 27(6): 486-490.

