

文章编号: 1001-0920(2011)03-0477-04

## 融合沿墙行为的多移动机器人有序化多模态群集运动控制

程磊<sup>1,2</sup>, 朱全民<sup>2</sup>, 吴怀宇<sup>1</sup>, 王永骥<sup>3</sup>, 方华京<sup>3</sup>

(1. 武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 武汉 430081; 2. 西英格兰大学 计算、工程与数学科学学院, 布里斯托尔 BS161QY; 3. 华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074)

**摘要:** 一类基于势场原理的群集控制理论正逐步应用于多 agent(智能体)/机器人稳定协同运动中. 针对群集运动系统在非规则障碍物环境中运行时易出现的局部极小问题, 引入基于行为的机器人学理念, 构成多移动机器人多模态群集控制系统. 在此框架内, 仿生的动物沿墙行为与有序化群集运动控制策略相融合, 实现了多移动机器人系统快速聚合行为与高效避障行为的统一. 移动机器人仿真实验验证了该方法的有效性.

**关键词:** 多移动机器人; 群集运动控制; 多模态; 有序化群集运动; 沿墙行为

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Multi-mode sequential flocking strategy integrating wall-following behavior for motion control of multiple mobile robots

CHENG Lei<sup>1,2</sup>, ZHU Quan-min<sup>2</sup>, WU Huai-yu<sup>1</sup>, WANG Yong-ji<sup>3</sup>, FANG Hua-jing<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Faculty of Computing, Engineering and Mathematical Sciences, University of the West of England, Bristol BS161QY, United Kingdom; 3. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: CHENG Lei, E-mail: chenglei@wust.edu.cn)

**Abstract:** Flocking control is gradually attended to coordinates the motions among multiple agents or robots stably based on potential principles. To provide a generic and efficient solution to the local minimum problem encountered within various flocking systems in unexpected and irregular obstacle environment, a design of a multi-model flocking control for multiple mobile robots in terms of behavior-based robotics is presented. Within this framework, animal-imitating wall-following behavior modes are integrated with the new sequential flocking strategy. In this way, the unity of stable aggregation in flocking and efficient obstacle avoidance motion can be efficiently and simultaneously achieved. The simulation studies are comprehensively conducted to show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** multiple mobile robots; flocking control; multi-mode; sequential flocking; wall-following

### 1 引言

多移动机器人群集控制理论是一种特殊的多机器人运动协调方法. 群集团队的运动驱动力来源于“势场”原理, 包括群内成员的“势场”吸引/排斥力, 以及经由障碍物产生的“势场”排斥力. 在自然界中, 诸如飞鸟在空中聚集飞行, 鱼群在水中游动等集体运动形式, 都属于群集现象. Tanner 等人构建了基于 agent 的群集控制律, 各成员可以相互避碰, 保持一定的相对距离, 并以相同的速度运动<sup>[1-2]</sup>. 文献 [3] 初

步完善了“有序化”群集运动控制理念, 以此为基础, 群集运动已成为系统整体受控的规则行为.

在基于势场的群集系统避障运动中, 当目标点对个体的吸引力与障碍物斥力之合力为零时, 会产生“局部极小”问题, 从而导致机器人群的运动陷入死区. 相对而言, 解决复杂障碍物环境下的机器人实时控制问题是基于行为机器人学的优势所在. 在本文的研究中, 通过模仿动物群的沿墙过障行为, 设计一类融合沿墙行为的多移动机器人多模态有序化群集运动

收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60705035, 50675161); 武汉市青年科技晨光计划项目(200950431200); 湖北省高校产学研合作重点项目(CXY2009B006); 湖北省教育厅科研优秀中青年项目(Q20091103).

作者简介: 程磊(1976-), 男, 副教授, 从事多机器人系统的研究; 朱全民(1955-), 男, 教授, 从事智能控制等研究.

控制算法. 通过该方法, 在保持现有群集运动系统稳定、容错、可扩展特性的同时, 可以提高其对环境的自适应性.

## 2 多移动机器人有序化群集运动

多移动机器人有序化群集运动算法由两部分构成<sup>[3]</sup>: 无障碍情况下的多 agent 有序化群集运动算法; 从 agent 到移动机器人的控制转化方法. 以下对此进行简要介绍.

### 2.1 多 agent 有序化群集运动

有序化群集运动可分为两部分: leader 运动与 followers 运动. leader 的运动是任意的; followers 需服从相应的有序化群集运动控制律. 考虑一个包含  $N$  个 follower 的群, follower 在绝对坐标系下的动力学方程为

$$\dot{r}_i = v_i, \quad (1a)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1b)$$

设 leader 以速度  $v_L(t)$  运行, follower  $i$  相对于 leader 的位置矢量表示为  $\hat{r}_i = r_i - r_L$ . follower  $i$  相对于 leader 的运动学方程可写为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{r}_i \\ \dot{\hat{r}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_i \\ u_i - v_L \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

follower  $i$  的总势函数  $V_i = \sum_{j \in N_i} V_{ij}(\|r_{ij}\|)$ , 从而有

$$V_i = \chi_{N_L}(i) V_{iL}(\|r_{iL}\|) + \sum_{j \in N_i, j \neq L} V_{ij}(\|r_{ij}\|). \quad (3)$$

其中

$$\chi_{N_L}(i) = \begin{cases} 1, & i \in N_L; \\ 0, & i \notin N_L. \end{cases}$$

$V_{ij}$  为驱动 agent 运动的群内部人工势场函数,  $N_L$  表示 leader 的邻交集,  $N_i$  表示 follower  $i$  的邻交集. 有序化 agent 群集运动控制律  $u_i$  可定义为

$$u_i = - \underbrace{\sum_{j \in N_i} \nabla r_i V_{ij}}_{a_i} - \underbrace{\dot{\hat{r}}_i + v_L}_{\alpha_i}. \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i$  为平衡 agent 之间速度的控制矢量项,  $a_i$  为控制 agent 之间距离的控制矢量项.  $V_{ij}$  选择为

$$V_{ij} = A \cdot \left( \frac{L^2}{\|r_{ij}\|^2} + \log \|r_{ij}\|^2 \right). \quad (5)$$

当  $\|r_{ij}\| = L$  时,  $\nabla r_i V_{ij} = 0$ , 此时  $V_{ij}$  达到最小值, 系统进入稳态.  $L$  定义为结构系数,  $L > 0$ .  $A$  定义为势场调整系数, 以均衡  $\alpha_i$  和  $a_i$  的作用效果,  $A > 0$ .

利用有序化群集原理实现群体运动协调的优势在于: 假设由 agent (leader 和 followers) 组成的群的邻接图  $G$  是连通的 (即没有 agent 孤立于群系统之外), 则 followers 能够自动并迅速地进行彼此无碰的聚集, 并以稳定的队形和共同的速度跟随 leader 运动, 该过

程的实现与个体数目的大小无关<sup>[3]</sup>.

### 2.2 从 agent 到移动机器人的控制转化方法

由 agent 到移动机器人控制转化方法的基本原理如下: 将 agent 的直接控制量输入  $u_i$ , 转化为移动机器人的直接控制量输入  $v_i$  和  $\omega_i$ .  $u_i$  可被认为是作用于移动机器人上的所有虚拟力的合力.

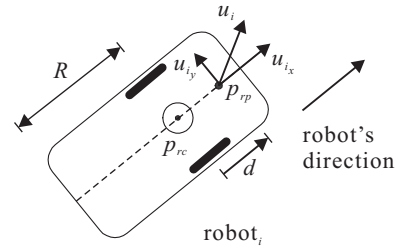


图 1  $u_i$  控制下的机器人“受力”分析图

图 1 中:  $R$  为移动机器人半径;  $p_{rp}$  为移动机器人的参考点,  $p_{rc}$  为移动机器人的自旋转中心,  $p_{rp}$  与  $p_{rc}$  之间的位移为  $d$ , 其正方向为移动机器人的前进方向; 移动机器人位姿为  $(x_{p_{rc}}, y_{p_{rc}}, \theta_i)$ ,  $\theta_i$  为机器人的方位角;  $u_i$  在全局坐标系中的夹角为  $\beta_i$ ;  $u_{ix}$  的正方向为移动机器人的前进方向,  $u_{iy}$  的正方向为以  $p_{rc}$  为圆心取逆时针方向.

由图 1 及由物理学动量公式, 可得

$$v_i(t + \Delta t) = \frac{u_i \cos(\beta_i - \theta_i)}{m_i} \Delta t + v_i(t), \quad (6a)$$

$$\omega_i(t + \Delta t) = \frac{u_i \sin(\beta_i - \theta_i) d}{I_i} \Delta t + \omega_i(t). \quad (6b)$$

式中:  $m_i$  定义为移动机器人的虚拟质量;  $I_i$  定义为移动机器人的虚拟转动惯量, 以作控制之用.

上述递推公式即为从 agent 到移动机器人的控制转化公式.  $v_i(t + \Delta t)$  和  $\omega_i(t + \Delta t)$  便是所需要的直接控制量输入  $v_i$  和  $\omega_i$ .

### 3 融合沿墙行为的单移动机器人避障运动

若移动机器人在运动规划的过程中用到了势场法, 则很可能会遇到局部极小问题, 陷入势场力合力为零的“陷阱”, 不能继续运动. 通过观察自然界的生态现象, 可以发现沿墙行走是动物过障的重要技能. 所谓沿墙行走是沿着墙壁的轮廓, 或者在更一般意义上沿着物体的轮廓进行运动, 并保持一定的距离.

#### 3.1 虚拟伴随机器人

参照 Saber 的“共生”agent 理念<sup>[4]</sup>, 这里提出“虚拟伴随机器人”的概念诠释移动机器人的沿墙行为. 在图 2 中, 虚拟伴随机器人为实体机器人在障碍物上的“投影”. 虚拟伴随机器人的实际位置可为实体机器人探测障碍物时所返回的距离最短的激光点坐标值 (该激光点近似于实体机器人在障碍物表面上的正交投影), 而虚拟伴随机器人的迎角则为障碍物表

面(墙面)的角度. 在沿墙行为中, 由于虚拟伴随机器人的“斥力”作用, 使其“母体”机器人能够与之保持一定的距离(避碰), 以及相同的角度(沿墙走).

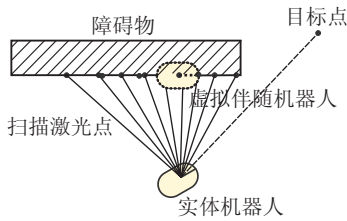


图2 虚拟伴随机器人的表示

图2中, 移动机器人在其头部安装了一台前向扫描式激光雷达(这是较为常见的机器人环境感知配置), 机器人探测墙面所产生的激光点*i*的坐标为( $o_{x_i}, o_{y_i}$ ), 激光点*i*与*i+1*之间矢量连线的角度为

$$\eta_i = \arctan \left( \frac{o_{y_{i+1}} - o_{y_i}}{o_{x_{i+1}} - o_{x_i}} \right), \quad (7)$$

墙面的走向

$$\eta_{\text{wall}} = \sum_{i=1}^{N-1} \eta_i / N - 1. \quad (8)$$

其中: *N* 为反射回的激光点个数,  $N \geq 2$ . 当  $N = 1$  时,  $\eta_i$  不能计算, 机器人仍保持原向运动. 考虑到  $\eta_{\text{wall}}$  的方向与机器人迎角的夹角会大于  $90^\circ$ , 这将导致机器人返过头来沿墙运动, 因此  $\eta'_{\text{wall}}$  为最终的墙面方向.

$$\eta'_{\text{wall}} = \begin{cases} \eta_{\text{wall}}, & \|\eta_{\text{wall}} - \theta_{\text{robot}}\| < \pi/2; \\ \eta_{\text{wall}} + \pi, & \|\eta_{\text{wall}} + \pi - \theta_{\text{robot}}\| < \pi/2. \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 算法描述

融合沿墙行为的避障算法原理如图3所示.

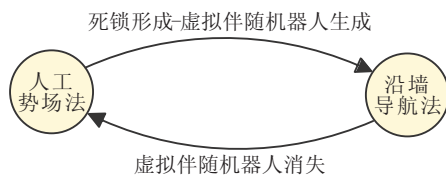


图3 融合沿墙行为的单机器人避障算法中的状态转换

算法步骤如下:

**Step 1** (虚拟伴随机器人生成条件的判定) 当机器人陷入由局部极小问题引起的势场“陷阱”时, 机器人会停止运动, 或产生一定振荡, 称为死锁. 死锁形成后, 虚拟伴随机器人生成, 其坐标为实体机器人探测障碍物时所返回的距离最短的激光点坐标值, 而虚拟伴随机器人的迎角则为障碍物表面(墙面)的角度. 此时, 实体机器人与虚拟伴随机器人之间的距离为初始避碰距离  $d_{s_0}$ .

**Step 2** (沿墙运动状态) 机器人进入沿墙运动状态后, 确定墙面方向, 机器人沿这一方向作匀速运动. 运动过程中, 该机器人不断检测自身与虚拟伴随机

器人的距离  $d_s$ , 若  $d_s < d_{s_0}$ , 则由于虚拟伴随机器人的“斥力作用”, 机器人将会朝着自身与虚拟伴随机器人连线  $\ell$  的反方向旋转一个角度  $\Delta\theta_s$ , 以偏离危险区域. 离开危险域后, 机器人继续进行沿墙运动.

**Step 3** (虚拟伴随机器人消失条件的判定) 机器人在作沿墙运动过程中, 同时在不断地进行虚拟伴随机器人消失条件的判定, 待条件成立时, 进入势场法运动模式. 虚拟伴随机器人的消失条件为: 实体机器人在可探测范围内的任何部分都不再检测到障碍物; 或者虚拟伴随机器人的“斥力”方向与目标点的引力方向的夹角为锐角, 此时虚拟伴随机器人的“斥力”作用与目标点的引力作用相同, 都使得实体机器人向目标点运动.

**Step 4** (基于势场法的运动状态) 进入此状态后, 机器人重新朝目标点移动, 如在此过程中又遇到障碍物, 则重复上述循环 Step 1~Step 3.

## 4 融合沿墙行为的多移动机器人避障运动

现在将研究范围扩展到多机器人系统. 将前述沿墙导航行为与多机器人群集运动相结合, 以克服群集避障运动中的局部极小问题. 融合沿墙行为的单机器人避障算法与多机器人避障算法具有相同的本质, 算法步骤也类似, 其主要区别如下:

1) 在单机器人避障算法的 Step 3 中, 单机器人避障运动中的目标点不再对多机器人系统的所有机器人都具有吸引作用;

2) 在群集运动中, 多个机器人之间可以实现无碰聚合运动, 但由于避障运动中部分机器人可能处于“沿墙走”的非群集状态, 而与其他成员失去了“逻辑联系”, 因此额外的避碰策略是必需的.

具体算法如下:

**Step 1** (虚拟伴随机器人生成条件的判定) 当机器人群在利用势场法进行避障过程中陷入由局部极小问题引起的势场“陷阱”时, 死锁形成, 虚拟伴随机器人生成.

**Step 2** (沿墙运动状态) 基本算法描述与单机器人避障算法相同. 在此过程中, 若有其他机器人进入安全避碰距离  $D$  的范围之内, 则机器人沿墙面作避碰运动, 协调避碰算法参见文献 [5].

**Step 3** (虚拟伴随机器人消失条件的判定) 机器人在作沿墙运动过程中, 同时在不断地进行虚拟伴随机器人消失条件的判定, 待条件成立时, 进入有序化群集运动模式. 判定条件与单机器人避障算法相同, 区别在于引导单机器人进行避障运动的“吸引子”不再是机器人的运动目标点. 令  $\tilde{r}_c$  为仍处于群集状态的机器人群群的群集中心<sup>[5]</sup>.  $\tilde{r}_c = \sum_{i=1}^N \tilde{r}_i / N$ , 其中  $\tilde{r}_i$  为仍

处于群集状态的机器人位置矢量,  $\bar{r}_c = (x_{\bar{r}_c}, y_{\bar{r}_c})^T$ , 此时, 该群集中心成为其摆脱沿墙运动行为的新的“吸引子”。

**Step 4**(基于势场法的群集运动状态) 进入此状态后, 机器人重新加入机器人集群运动. 在此过程中, 若有其他机器人进入安全避碰距离  $D$  的范围之内, 则机器人进行避碰运动; 如在此过程中又遇到障碍物, 则重复上述循环 Step 1~Step 3.

上述算法的优势在于: 不论人工势场中的“引力场”和“斥力场”如何分布, 机器人都可以绕开障碍物: 若没有陷入局部极小, 则以势场原理进行避障; 若陷入局部极小, 则以沿墙行为进行避障. 两者的状态转换由虚拟伴随机器人的生成/消失条件的判定进行切换. 机器人在目标引力、障碍物斥力、虚拟伴随机器人“作用力”的合力影响下进行有效避障.

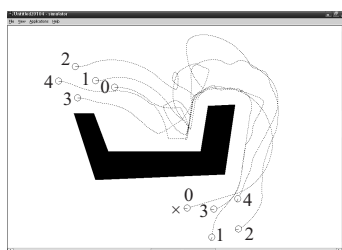
## 5 仿真实验

leader 机器人的运动控制算法采用引入动态目标点的改进势场法<sup>[6]</sup>, follower 机器人的运动控制算法主要参照 2~4 部分. 考虑到实际移动机器人受最大速度  $v_{\max}$  和最大角速度  $\omega_{\max}$  的限制,  $t + \Delta t$  时刻实际控制输入  $v_i$  和  $\omega_i$  为

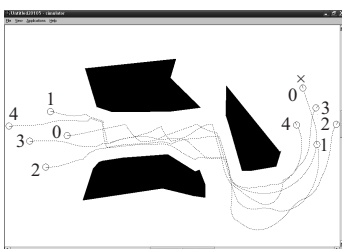
$$v_i = \begin{cases} v_{\max}, & v_i(t + \Delta t) > v_{\max}; \\ v_i(t + \Delta t), & \text{others}; \\ -v_{\max}, & v_i(t + \Delta t) < -v_{\max}. \end{cases} \quad (10a)$$

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\max}, & \omega_i(t + \Delta t) > \omega_{\max}; \\ \omega_i(t + \Delta t), & \text{others}; \\ -\omega_{\max}, & \omega_i(t + \Delta t) < -\omega_{\max}. \end{cases} \quad (10b)$$

followers 最大平动速度  $v_{\max} = 100 \text{ mm/s}$ , leader 最大平动速度为  $v_{\max} = 50 \text{ mm/s}$ ,  $\omega_{\max} = 18^\circ/\text{s}$ ,  $d =$



(a) U型障碍物



(b) T型障碍物

图 4 融合沿墙行为的多机器人集群避障运动

$2 \text{ mm}$ ,  $L = 100 \text{ mm}$ ,  $m_i = 0.1$ ,  $I_i = 0.2$ ,  $A = 1000$ , 仿真中:  $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ , 移动机器人半径  $R = 10 \text{ mm}$ ,  $\Delta\theta_s = 15^\circ$ ,  $T_1 = T_2 = 10$ , 激光测距仪探测距离  $S = 50 \text{ mm}$ , 每隔  $10^\circ$  取一个探测点, 沿墙走时的速度为  $v_{\max} = 70 \text{ mm/s}$ .

图 4 显示了 5 个移动机器人在上述算法控制下进行避障的仿真运动全过程. 此处设定 leader 的序号为 0, 其余序号的机器人为 followers. 图中显示了机器人群的初始位置、结束位置及各机器人的实时运动轨迹. 障碍物环境包括“U”形障碍物(图 4(a))和类“T”形障碍物(图 4(b)). 在所有机器人都通过障碍物后, 系统自动收敛到群集运动状态.

## 6 结 论

群集运动控制是模拟自然界中生物聚合运动的新颖分散式控制方法. 本文展示了一组自主机器人在非规则障碍物环境下进行群集运动的能力, 针对基于势场原理的多机器人避障算法中存在的局部极小问题, 通过将有序化群集运动与仿生沿墙避障运动相结合, 构成了具备一定环境自适应能力的多机器人集群系统.

## 参考文献(References)

- [1] Tanner H G, Jadbabaie A, Pappas G J. Stable flocking of mobile agents, Part I: Fixed topology[C]. Proc of IEEE Conf on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2003: 2010-2015.
- [2] Tanner H G. Flocking with obstacle avoidance in switching networks of interconnected vehicles[C]. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2004: 3006-3011.
- [3] 程磊, 俞辉, 吴怀宇, 等. 一类有序化多移动机器人集群运动控制系统[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1117-1120.  
(Cheng L, Yu H, Wu H Y, et al. A sequential flocking control system for multiple mobile robots[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(6): 1117-1120.)
- [4] Saber R O, Murray R M. Flocking with obstacle avoidance: cooperation with limited communication in mobile networks[C]. Proc of IEEE Conf on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2003: 2022-2028.
- [5] Song P, Kraus P, Kumar V, et al. Analysis of rigid-body dynamic models for simulation of systems with frictional contacts[J]. Applied Mechanics, 2001, 68(1): 118-128.
- [6] 高云峰, 黄海. 复杂环境下基于势场原理的路径规划方法[J]. 机器人, 2004, 26(2): 114-118.  
(Gao Y F, Huang H. A path planning algorithm based on potential field for complex environment[J]. Robot, 2004, 26(2): 114-118.)