

基于行为的机器人自适应队形控制^①

李 强, 刘国栋

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

摘 要: 针对多机器人在未知复杂环境下的队形控制问题, 将 leader-follower 法结合到基于行为法中, 提出了机器人在复杂环境下采取跟踪链的方式穿越障碍, 而后再重新组队, 使机器人适应环境的能力增强, 避免了机器人在复杂环境下掉队的现象。在避障活动障碍时, 依据障碍运动趋势有预见的主动避开, 使控制行为既简单又有效, 仿真结果表明该队形控制算法的可行性和有效性。

关键词: 多机器人; 队形控制; 跟踪链; 环境适应性; 避障

Behavior-Based Control for Adaptive Formation of Robots

LI Qiang, LIU Guo-Dong

(College of Internet of things and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aimed at the formation control of multiple robots in complex environment, the leader-follower method is combined with behavior-based method. The proposed robots can track the chain through the barrier in a complex environment and then re-team to adapt to the environment, avoiding the robots' dropping out from other robots in a complex environment. In the obstacle-avoidance activities, the robots can avoid barriers based on the predictable trend, so that the control behavior of both simple and effective. Simulation results show that the formation control algorithm is effective. The feasibility and validity of the formation control strategy are also indicated.

Keywords: multiple robots; formation control; trace chain; environmental adaptation; obstacle avoidance

1 引言

多机器人系统在执行一些特殊任务如团体包围、太空探索、工业制造等^[1]单个机器人无法完成的任务优势越发明显, 其中如何保持一定的队形对任务的完成质量起着关键作用。当前队形控制的主要方法有 leader-follower 法^[2]、基于行为法^[3]、虚拟结构法^[4]和基于图论法^[5]等, 但是每种方法都有着优缺点, 因此队形控制目前还没有形成统一有效的算法^[6]。在未知复杂的环境下机器人的队形控制常出现队形控制失败及个别机器人走失的现象, 因此如何提高队形控制的环境适应性越显重要, 本文结合了 leader-follower 法和基于行为法而提出了一种相对有效的算法来提高机器人在复杂环境下的适应性, 且不失灵活。

2 算法思想的内容

将机器人的队形控制划分为几个基本行为即奔向目标、避障静止障碍、避让活动障碍和队形维持, 而行为中运用 leader-follower 的方法进行控制。在队形控制的过程中给机器人的各行为赋予一定的优先级, 选择优先级高的作为机器人的输出, 其中避让活动障碍优先级最高, 其次是避障静止障碍, 再次是队形维持, 最后是奔向目标。

2.1 奔向目标

设 d_1 为 leader 与目标的距离, θ_1 为 leader 当前运动方向与目标的夹角, v_1 为 leader 奔向目标的速度, ϕ_1 为 leader 奔向目标的调整角度 ($\phi_1 = \theta_1$), 速度控制采用动态死区法^[7]如图 1 所示:

① 收稿时间:2010-07-31;收到修改稿时间:2010-09-04

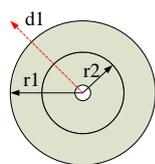


图 1 动态死区法在奔向目标的应用

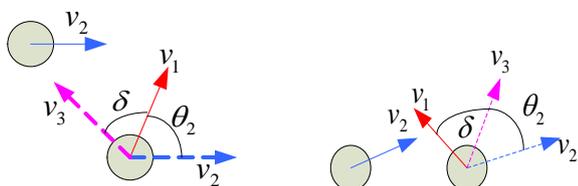
则 leader 奔向目标的速度 v_l 为:

$$v_l = \begin{cases} v_{l_{max}} & d_1 \geq r_1 \\ [(r_1 - d_1) / (r_1 - r_2)]v_{l_{max}} & r_2 < d_1 < r_1 \\ 0 & d_1 \leq r_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中 r_1 为外圆半径, r_2 为内圆半径, d_1 为距离目标的距离, $v_{l_{max}}$ 为 leader 的最大速度, $v_{f_{max}}$ 为 follower 的最大速度, $v_{l_{max}} < v_{f_{max}}$ (队形控制中 follower 跟踪 leader 需要一定的速度差量)。

2.2 避让活动的障碍物

设 d_2 、 θ_2 分别为机器人与障碍物之间的距离和运动方向夹角, d_0 为机器人能感知活动障碍物的临界距离, D 为活动物体的大小 (直径表示), d 为机器人的直径, α 为当前机器人应调整的角度, $\pm\alpha_0$ 为设定的单位偏转角。 v_1 为机器人的运动方向, v_2 为障碍物的运动方向, v_3 为机器人经调整角度后的运动方向如图 2 所示:



(a) 运动夹角 $0 < \theta_2 \leq 90^\circ$ (b) 运动夹角 $90^\circ < \theta_2 \leq 180^\circ$

图 2 避让活动障碍物行为

当 $d_2 \leq d_0$ 时:

$$\alpha = \delta + \theta = \frac{D}{\varepsilon d} (\pm\alpha) + \theta \quad (2)$$

其中 $0 < \theta_2 \leq 90^\circ$, 为 $\pm\alpha_0$; $90^\circ < \theta_2 \leq 180^\circ$, 为 $-\alpha_0$; ε 为偏转角的调整系数, 避让过程中机器人以最大速度躲避。算法借鉴了日常生活中人们对外来物体的运动趋势经过评估后有预见性的主动躲避, 并且考虑了活动物体的大小对偏转角的影响。

2.3 避让静止的障碍物

将机器人在未知复杂的环境下可能遇到的障碍分为: 多个大障碍物、多个小障碍物、单个大障碍物和单个小障碍物, 其中前三个为复杂障碍。

当 leader 或 follower 处于小障碍时如图 3 所示:

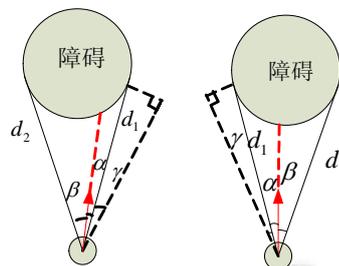


图 3 避让小障碍物行为

则

$$d_1 \sin \gamma = \eta d \quad (3)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{\eta d}{d_1}$$

$$\omega = \alpha + \gamma$$

其中 η 为机器人躲避障碍物的可调参数, 决定了 γ 角的大小, d 为机器人直径, d_1 、 d_2 为机器人与障碍物的两边切线, α 、 β 分别为机器人当前运动方向与两切线夹角中较小的角和较大的角, γ 为切线一侧的避让角, ω 为机器人应调整的偏转角。

若 leader 或 follower 处于复杂障碍时, 为了提高适应性并兼顾 leader 和 follower 的独立性和协作性, 规定 follower 处理事件的优先级高于 leader。当 leader 遇到复杂障碍时, 放弃当前队形并变成前后跟随的跟踪链^[8]运动方式来穿越障碍如图 4 所示:

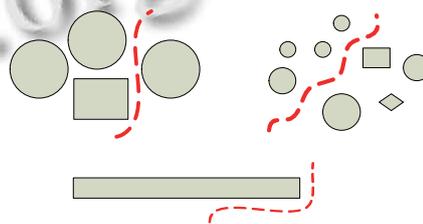


图 4 期望的避让复杂障碍方式

跟踪链的具体策略如下:

规定机器人之间可相互通信且有唯一 ID 地址, 并可相互识别。

设 R 为所有机器人集, 设集合 $q_1 = \{R_i \in R \mid R_i \text{ 看到 } R_{leader}\}$, $q_2 = \{R_{ii} \in R \mid R_{ii} \text{ 看到 } R_j, R_j \in q_1\}$, \dots , $q_L = \{R_{i...j} \in R \mid R_{i...j} \text{ 看到 } R_j, R_j \in q_{L-1}\}$, $L+1 \leq n$ (机器人个数)。

设 $q_i (1 \leq i \leq L)$ 的机器人集为第 i 层, 同层内不同机器人的跟随优先级由共同的参考机器人分配, 采用数字形式由小到大逐次降低。

机器人逐次跟随的原则:

- 1) 从机器人按次序奔向各层的参考机器人位置, 之后跟踪前面的机器人。
- 2) 同层的跟随命令由相邻优先级的大优先级机器人发向次优先级机器人。
- 3) 同层当前机器人若为参考机器人, 则同层下一级跟随命令由当前机器人下一层的最低优先级机器人发出。

具体描述以三层为例, 首先机器人相互通信发送主从关系形成树根形参考机器人关系层网络结构如图 5 所示:

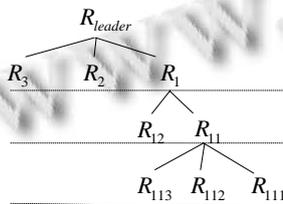


图 5 树根形参考机器人关系层网络结构

接着参考 leader (leader 或被参考 follower) 向子层发送分配的优先级及跟随位置序列。设跟随位置变量为 P , 则 R_{leader} 向 R_1, R_2, R_3 发布的跟随位置 $P[p(x_{leader}, y_{leader})]$ 即 $P[p_{R_{leader}}]$, R_1 向 R_{11}, R_{12} 发送的跟随位置 $P[p_{R_{leader}}, p_{R_1}]$, R_{11} 向 $R_{111}, R_{112}, R_{113}$ 发送的跟随位置 $P[p_{R_{leader}}, p_{R_1}, p_{R_{11}}]$, 从而各机器人按相应的序列跟随。设跟随命令变量为 $L[L_{R_{leader}}, L_{R_1}, L_{R_{11}}]$, 命令信息为 (ID, L) 。

1) R_{leader} 发送命令信息 $(ID_{R_1}, L_{R_{leader}}=1)$, R_1 收到并发送命令信息 $(ID_{R_{11}}, L_{R_1}=1)$ 的同时奔向 $p_{R_{leader}}$, R_{11} 收到并发送命令信息 $(ID_{R_{11}}, L_{R_{11}}=1)$ 的同时奔向 p_{R_1} , R_{111} 收到命令信息 $(ID_{R_{111}}, L_{R_{11}}=1)$ 奔向 $p_{R_{11}}$ 。

2) R_{111} 到达 $p_{R_{11}}, p_{R_1}, p_{R_{leader}}$ 分别发送命令信息 $(ID_{R_{112}}, L_{R_{11}}=1), (ID_{R_{112}}, L_{R_1}=1), (ID_{R_{112}}, L_{R_{leader}}=1)$ 。

3) 同理 R_{112} ; 当 R_{113} 到达 p_{R_1} 发送命令信息 $(ID_{R_{12}}, L_{R_1}=1)$ 则 R_{12} 奔向 p_{R_1} 。

4) R_{11} 到达 $p_{R_1}, p_{R_{leader}}$ 分别发送命令信息 $(ID_{R_{111}}, L_{R_1}=1), (ID_{R_{111}}, L_{R_{leader}}=1)$; 到达发送命令信息 $(ID_{R_{11}}, L_{R_1}=1)$ 。

5) R_2, R_3 到达 $p_{R_{leader}}, R_{12}$ 到达 $p_{R_1}, p_{R_{leader}}$ 同上。

第三层

处理流程如下:

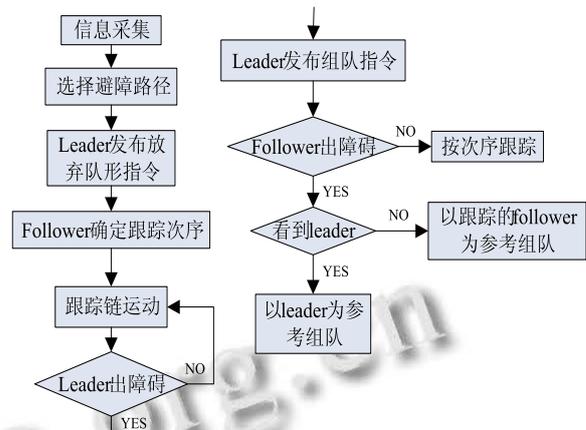


图 6 leader 避障复杂障碍物流程

其中当 leader 处于复杂障碍时, 通过传感探测可能有多条避障路径, 对于避障路径的选择采取以下原则:

选择 leader 的当前方向与路径方向夹角最小的为避障路径, 若夹角相同则随机选择。

当 follower 处于复杂障碍时, follower 放弃队形并跟踪距其最近的机器人, 这个机器人可以是 leader 或某一个 follower, 出来之后再组队, 处理流程如下:

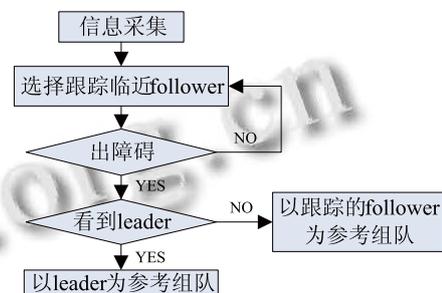


图 7 follower 避障复杂障碍物流程

2.4 队形维持

机器人在各自参考机器人的参照下追踪其目标位置, 不断调整两个控制量即: 运动速度 v_i 和跟踪偏转角 ω_i , 两变量的实现如下:

设机器人的当前坐标为 (x_i, y_i) , 在队形中的期望坐标为 (x_{id}, y_{id}) , 则误差距离^[9]为:

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_{id})^2 + (y_i - y_{id})^2} \quad (4)$$

依据 l_i 确定机器人的速度:

$$v_i = \begin{cases} v_{\max} & l_i \geq r_1 \\ [(l_i - r_2) / (r_1 - r_2)] v_{\max} & r_2 < l_i < r_1 \\ 0 & l_i \leq r_2 \end{cases} \quad (5)$$

这里也是采用动态死区法， r_1 为外圆半径， r_2 为内圆半径。

ω_i 的确定：机器人跟踪偏转角确定分为六种情况如图所示：

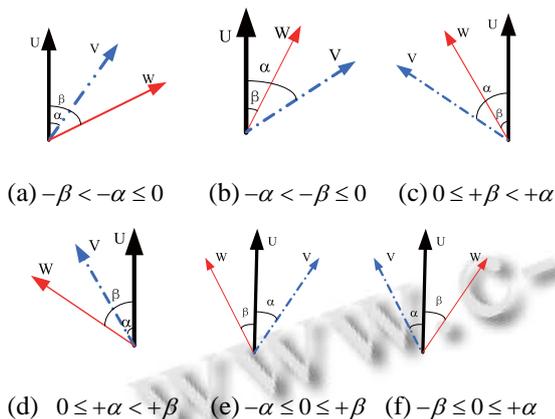


图8 机器人的六种跟踪偏转角

规定在U方向左面的角为正，右面的角为负，其中U为陀螺仪指针方向，W为机器人当前运动方向，V为机器人与目标位置的方向， β 为W与U的夹角， α 为V与U的夹角，归纳分类为：

当 $(+\alpha, +\beta)$ 或 $(-\alpha, -\beta)$ 时：

若 $\begin{cases} |\beta| \geq |\alpha|, \text{则逆时针转} |\beta - \alpha| \\ |\beta| < |\alpha|, \text{则顺时针转} |\beta - \alpha| \end{cases}$ ；

当 $(-\alpha, +\beta)$ 时：顺时针转 $|\alpha| + |\beta|$ ；

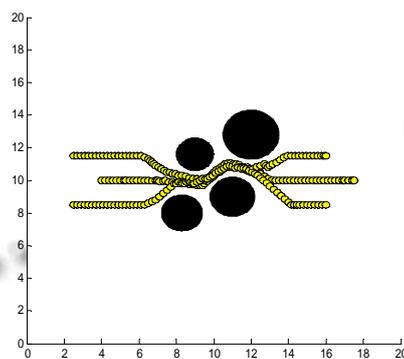
当 $(+\alpha, -\beta)$ 时：逆时针转 $|\alpha| + |\beta|$ ；

机器人通过以上计算，将跟踪的速度和偏转角的调整度通过运动控制板实现，从而 follower 不断调整跟踪目标位置，使机器人动态的以指定队形前行，达到队形维持的功能。

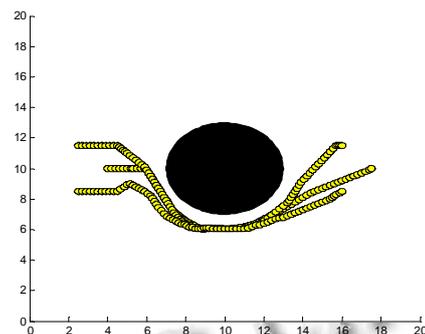
3 仿真及结果分析

在 20×20 的场地中进行机器人绕过复杂障碍物到达目标点并形成指定队形的仿真试验。选取三个机器人 R_1, R_2, R_3 保持三角队形从初始位置 $S_1(4,10), S_2(2.5, 11.5), S_3(2.5, 8.5)$ 奔向目标位置 $O_1(17.5, 10), O_2(16, 11.5), O_3(16, 8.5)$ ，其中 R_1 为 leader，机器人看成是半径为 0.2 的圆，障碍物看成大小不一的椭圆，

机器人的基本速度为步长 0.2，leader 的最大速度为 1.5 倍步长，其奔向目标的动态死区法中 $r_1=2.5, r_2=1$ ，follower 的最大速度为 2.5 倍步长，其奔向目标位置的动态死区法中 $r_1=1, r_2=0.4$ 。经过 137 次循环，机器人穿过多个障碍物及机器人绕过单个大障碍物并形成指定队形到达目标的仿真如图 9 所示：



(a) 机器人避障多个大障碍物



(b) 机器人避障单个大障碍物

图9 机器人避障复杂障碍

仿真图 9(a)中 leader 发现多个障碍物，此时 leader 通过传感器探测周围环境发现三条避障路径，依据避障路径选择原则，选择了偏转角最小的正前方避障路径并通知 follower 放弃队形，follower 按照分配的优先级及跟随命令依次以跟踪链的方式穿越障碍，并在 leader 的组队指令下组队最终到达目标位置；图 9(b)中 leader 发现单个大障碍物，此时 leader 探知到两条避障偏转角相同的路径，依据避障路径选择原则，当偏转角相同时随机选择，从图中看出 leader 选择了下方的避障路径，同样 follower 按照分配的优先级及跟随命令依次以跟踪链的方式避开大障碍物，之后重新组队并到达目标位置。因此机器人遇到这种复杂障碍物时，以跟踪链的方式穿越障碍物，较好的避免了机器

人在复杂环境下因躲避某一障碍物的同时又遇到另一障碍物,致使机器人越走越远,最后掉队的现象,致使跟踪失败。

4 结论

本文针对机器人在未知复杂环境下队形控制的适应性进行研究,文中结合了 leader-follower 法和基于行为法。重点讨论了机器人在复杂环境下的避障行为,提出了采用跟踪链的策略穿越障碍,并融合了 leader 和 follower 处理事件的独立性和协调性,较好的避免了在队形控制中机器人走失或组队失败的现象,使机器人在复杂环境下的灵活处理能力增强,并在机器人避障活动障碍时采用了有预见的避开运动物体的思维方式。仿真结果表明了该方法的有效性。

参考文献

1 张磊,秦元庆,孙德宝.基于行为的多机器人任意队形的控制.控制工程,2005,3:174-176.

- 2 李波,王祥凤.基于动态 Leader 多机器人队形控制.长春工业大学学报,2009,4:210-214.
- 3 苏治宝,陆际联.多移动机器人队形控制的研究方法.机器人,2003,1:88-90.
- 4 Cheng L, Wang YJ. Communication-based multiple mobile robots rigid formation control. International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Kunming, China, 2004,12:729-734.
- 5 谭民,王硕,曹志强.多机器人系统.北京:清华大学出版社,2005.114-116.
- 6 任德华,卢桂章.对队形控制的思考.控制与决策,2005,6:601-606.
- 7 王月海,洪炳熔.基于行为的机器人部队队形控制方案.机器人技术与应用,2001,4:28-32.
- 8 韩逢庆,李红梅,李刚.一种改进的多机器人任意队形控制算法.机器人,2003,11:521-525.
- 9 Huang TY, Chen XB. A geometric method of swarm robot formation controls. Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, china, 2008. 3202-3206.

(上接第 213 页)

6 结束语

针对 Snort 在高网络流量下丢包率高的问题进行分析,从占网络流量比重较大的多媒体数据入手研究,设计了对多媒体数据的识别方法和两种单独处理方法,并提出动态自适应多媒体数据处理方法,该方法能够根据网络流量和 Snort 处理能力的动态变化,对多媒体数据选择最佳的处理方法。实验证明,使用该方法可有效降低 Snort 丢包率。

参考文献

- 1 曾慧惠,袁世忠,胡鹏.入侵检测系统中高效模式匹配算法的研究.计算机应用与软件,2008,5(4):256-257.
- 2 高朝勤,陈元琰,黎芸.入侵检测中一种节约内存的多模式匹配算法.计算机工程与应用,2009,45(11):107-110.
- 3 严书亭.Snort 规则链表结构的分析与改进.燕山大学学报,2006,30(3):272-275.
- 4 胡大辉,刘乃琦.高效的 Snort 规则匹配机制.微计算机信息,2006,(6):10-12.
- 5 袁慰平等.计算方法与实习.上海:东南大学出版社,1991.