

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.026

基于虚拟群集中心的局部信息下多移动机器人编队控制研究

史 骏

(西安铁路职业技术学院, 陕西 西安 710026)

摘要:针对移动机器人感知能力有限,仅能根据周围邻居的行为对自身的运动进行调节的问题,在 REYNOLDS 提出的群集运动规则的指导下,设计了一种基于虚拟群集中心的多移动机器人编队控制算法。通过设计分布式虚拟群集中心估计器,使每个个体都向自身的虚拟群集中心靠拢,并通过理论分析证明了所设计的虚拟群集中心都能最终收敛到实际的群集中心。在此基础上,利用人工势场法和速度一致准则实现了多移动机器人的编队运行。实验结果表明:移动机器人群集在领航机器人的带领下最终会进入稳定运行状态,个体速度趋于一致,相互间的距离保持稳定。

关键词:多移动机器人;编队控制;局部信息;虚拟群集中心;人工势场

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0948-05

Virtual flocking center based multiple mobile robot formation control under local information

SHI Jun

(Xian Railway Vocational and Technical Institute, Xi'an 710026, China)

Abstract: Aiming at the problem of limited sensing capability of mobile robots who could only adjust their movement according to the motion behavior of their neighbors, a virtual flocking center based multi-robots formation control algorithm was designed according to REYNOLDS'S flocking control rules. A distributed virtual flocking center estimator was designed to make individuals move toward their own virtual flocking center, which was proved by theoretical analysis that the virtual flocking center would ultimately converge to the real flocking center. Moreover, artificial potential approach and velocity consensus rule were adopted to realize the formation control of multi-robots. The results indicate that the mobile robots eventually enter the steady state under the leadership of the robot, the individual's speed tends to be the same, and the distance between each other is stable.

Key words: multiple mobile robot; formation control; local information; virtual flocking center; artificial potential field

0 引 言

随着移动机器人应用范围的不断扩展,单个机器人已很难满足复杂工作任务的需求,多移动机器人在诸如协同工作、联合搜索、任务合作等领域的优势日益凸显,其协调控制技术成为机器人技术的研究热点^[1],而编队控制作为众多移动机器人协调中一个最基本而又十分重要的问题,受到广泛关注。目前有关多移动机器人的编队控制方法主要有领航者-跟随者法、基于行为的方

法、人工势场法和虚拟结构法等。但受单个机器人感知能力的限制,只能获取邻域范围内有限个体的运动信息,无法掌握群集的整体运动情况,如何利用局部信息设计分布式控制规则,使机器人群集在宏观上展现出可控的编队行为是目前的研究难点。

有关多移动机器人的编队控制,研究人员已经做了大量卓有成效的工作。文献[2]提出了一种多移动机器人编队的分布式控制系统,将机器人的编队行为分解成若干个子行为,并通过在不同时刻对各个子行

为进行加权综合实现了针对不同任务要求的编队优化;文献[3]针对 Ad-hoc 网络自组织性强、快速组网和高抗毁性的特点,设计了基于 Ad-hoc 网络的多机器人编队控制系统,并利用改进的人工势场法实现了多个机器人的编队控制;文献[4]针对人工势场法在移动机器人编队中容易出现“局部极小”的问题,模仿动物群集的沿墙行为,设计了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算法,提高了多机器人编队的环境适应能力。上述研究成果对多机器人的编队控制起到了极大的推动作用,但均假设机器人能与群集中的所有个体进行交互,然而这种假设在实际应用中是不现实的,也是不科学的,因此非全局信息下的多移动机器人编队控制是一个很值得研究的问题。

本研究根据 REYNOLDS^[5]提出的群集运动规则,设计一种基于虚拟群集中心的多移动机器人编队控制算法,并通过仿真证明所提算法的可行性和有效性^[6]。

1 多移动机器人建模及相关预备知识

1.1 移动机器人建模

以双后轮差分驱动的移动机器人为研究对象,其几何模型如图 1 所示。

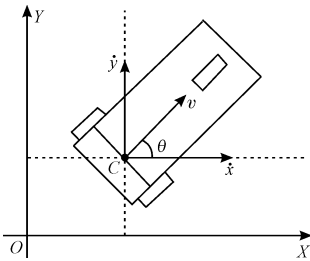


图1 两轮驱动移动机器人的结构示意图

q —移动机器人的广义坐标, $q = [x, y, \theta]^T$; (x, y) —移动机器人两个驱动轮的几何中心 C 在 XOY 坐标系中的坐标;
 θ —机器人的方向角,即运动方向与 X 轴的夹角; v —移动机器人的线速度; ω —移动机器人的角速度

根据图 1 可以建立单个移动机器人的运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)可得移动机器人的一阶动力学模型为:

$$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{p}_i \quad (2)$$

式中: \mathbf{q}_i —移动机器人的位置向量, \mathbf{p}_i —移动机器人的速度向量。

根据式(2)建立单移动机器人动态方程,定义 $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_N]^T$ 为群集中 N 个移动机器人个体的状态向量集,采用速度向量集 $\mathbf{p} = [v_1, \dots, v_N]^T$ 为群集输入向量集,则多移动机器人群集的动态方程可表示为:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{p} \quad (3)$$

在此,定义移动机器人群集中心 q_c 为:

$$q_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i \quad (4)$$

则:

$$\dot{q}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{q}_i \quad (5)$$

$$p_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (6)$$

结合式(3 ~ 6)可知,群集中心满足以下关系:

$$\dot{q}_c = p_c \quad (7)$$

1.2 矩阵论及代数图论相关知识

移动机器人群集构成一个复杂的网络拓扑结构,其个体相互间的关系可用图论的有关内容进行描述^[7]。其中,用邻接图 $G = (V, \mathcal{E}(q))$ 表示群集网络的拓扑结构, $V = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ 表示由 N 个移动机器人个体组成的顶点集, $\mathcal{E}(q) = \{(n_i, n_j) \in V \times V\}$ 表示由机器人个体间的邻接关系确定的边集。将顶点 i 的度定义为 $d_i = |N_i|$, Δ 表示度矩阵, $\Delta = \text{diag}(d_i)$ 。邻接阵 A 为整数矩阵。

邻接图 G 的拉普拉斯矩阵 L 可以定义为:

$$L = \Delta - A \quad (8)$$

对于一个连通图而言,其拉普拉斯矩阵 L 为对称和半正定的,且最小特征值为零,对应的特征向量 $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]^T$ 或 $L\mathbf{1} = 0$ 。当群集网络随时间动态变化和切换时,由于通信限制移动机器人个体 i 的邻居集 N_i 也会发生变化,因此邻接图 G 也是随时间动态变化的。

2 基于虚拟群集中心的多机器人编队算法

2.1 虚拟群集中心估计算法

由于移动机器人在编队运行过程中都有向群集中心靠拢的趋势,但受个体感知能力所限无法获取群集中心的实际位置,在此设计群集中心估计算法作为每个机器人的虚拟群集中心,并通过理论分析证明所设计的虚拟群集中心最终会收敛到实际的群集中心。

本研究将群集中心的位置定义为所有机器人位置的均值,每个机器人可以通过与其相邻机器人的通讯获得群集中心的位置信息。智能体在运动过程中,通过

该信息向群集中心移动,从而保证整个群集网络的连通性。基于这种思想,本研究将机器人 i 的虚拟群集中心估计算法设计为:

$$\dot{\mathbf{q}}_i^c = - \sum_{j \in \mathbf{N}_i} (\mathbf{q}_i^c - \mathbf{q}_j^c) - \mathbf{q}_i^c + \mathbf{q}_i + \beta \quad (9)$$

写成向量形式为:

$$\dot{\mathbf{q}}_i^c = -L\mathbf{q}^c - \mathbf{q}^c + \mathbf{q} + \mathbf{I} \otimes \beta \quad (10)$$

式中: \mathbf{q}^c — N 个机器人的估计的虚拟群集中心向量集, $\mathbf{q}^c = [q_1^c, q_2^c, \dots, q_N^c]^T$; β —用于进行速度匹配,取为期望轨迹的最大速度。

定理 1:对于由式(3)描述的多移动机器人群集系统,假设单体机器人只能与其邻域范围内的机器人进行信息交互,则在虚拟群集中心估计算法的作用下,第 i 个机器人的估计虚拟群集中心 \mathbf{q}_i^c 渐近收敛于群集实际中心 \mathbf{q}_c ,即:

$$\mathbf{q}_i^c \rightarrow \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{q}_i \quad (11)$$

证明:由式(4)可知,移动机器人实际群集中心 \mathbf{q}_c 可写成如下的向量形式:

$$\mathbf{q}_c = \frac{1}{N} \mathbf{I}^T \mathbf{q} \quad (12)$$

定义 e 为群集实际中心向量 \mathbf{q}^c 与估计的群集中心向量 \mathbf{q}_i^c 之间的误差,可得:

$$e = \mathbf{q}_c - \mathbf{q}_i^c = \frac{1}{N} \mathbf{I}^T \mathbf{q} - \mathbf{q}_i^c \quad (13)$$

对误差 e 求导数,可得:

$$\dot{e} = -(L + I)e + \frac{1}{N} \mathbf{I}^T \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{N} \mathbf{I}^T \mathbf{q} - \mathbf{q} - \mathbf{I} \otimes \beta \quad (14)$$

因为邻接图 G 是连通的,故 $L(1/N) \mathbf{I}^T \mathbf{q} = 0$ 。则

$\frac{1}{N} \mathbf{I}^T \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{N} \mathbf{I}^T \mathbf{q} - \mathbf{q} - \mathbf{I} \otimes \beta$ 可以写成如下形式:

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \dot{\mathbf{q}}_j + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i) - \beta \quad (15)$$

假设 $\dot{\mathbf{q}}_i$ 和 \mathbf{q}_i 一致有界,则有:

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \dot{\mathbf{q}}_j + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i) - \beta \right) \leq c \quad (16)$$

式中: c —正常数。

由于在连接图中, $\mathbf{e}^T(L + I) \geq \lambda_{\min}(L + I) \|\mathbf{e}\|^2$ 。 $\lambda_{\min}(L + I)$ 为矩阵 $L + I$ 的最小特征值。在此选取正定 Lyapunov 函数: $W = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e}$,并对其求导可得:

$$W = -\mathbf{e}^T(L + I)e + \mathbf{e}^T \left(\frac{1}{N} \mathbf{I}^T \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{N} \mathbf{I}^T \mathbf{q} - \mathbf{q} - \mathbf{I} \otimes \beta \right) \leq -\|\mathbf{e}\|^2 + \mathbf{e}^T c \mathbf{I} \quad (17)$$

根据詹森不等式 (Jensen's Inequality), $\mathbf{e}^T \mathbf{I} \leq \sqrt{N} \|\mathbf{e}\|$,可得:

$$W \leq -\|\mathbf{e}\|^2 + c\sqrt{N} \|\mathbf{e}\| \quad (18)$$

令 $\varepsilon = c\sqrt{N}$,可得

$$W \leq -\left(\|\mathbf{e}\| - \frac{\varepsilon}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2 \quad (19)$$

定义集合 $\Omega_c = \{e: V(e) \leq \varepsilon^2/2\}$,由于 $W < 0$,根据 LaSalle 不变集定理,对于任意不属于集合 Ω_c 的误差 e ,将会最终趋向于集合 Ω_c 并稳定在 Ω_c 中。因此,误差 e 是渐近稳定的,智能体的估计群集中心 \mathbf{q}_i^c 渐近收敛于群集实际中心 \mathbf{q}_c 。

2.2 基于虚拟群集中心的多移动机器人编队控制律设计

在多移动编队运行中,既要使机器人个体向群集中心移动,形成编队队形,又要避免个体间的碰撞,人工势场法是实现此目的的一种常用方法^[8-9]。在此定义如下势场函数:(1) 避免相邻机器人间碰撞的分离势场函数 $U_s(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)$; (2) 保持群集聚集的势场函数 $U_c(\mathbf{q}_i^c, \mathbf{q}_j^c)$; (3) 实现群集中心一致性的势场函数 $U_a(\mathbf{q}_i^c, \mathbf{q}_j^c)$ 。除此之外,引入额外的势场函数 $U_l(\mathbf{q}_{li}, \mathbf{q}_r)$ 实现领航者机器人对已知轨迹 \mathbf{q}_r 的跟踪。

综合所有势场函数,可将整个群集系统的势场函数定义为:

$$U = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathbf{N}_i} U_a(\mathbf{q}_i^c, \mathbf{q}_j^c) + \sum_{i=1}^N U_c(\mathbf{q}_i^c, \mathbf{q}_j^c) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathbf{N}_i} U_s(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j) + \sum_{i=1}^L U_l(\mathbf{q}_{li}, \mathbf{q}_r) \quad (20)$$

将各势场函数写成二次型的形式: $U_c(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j^c) = \frac{1}{2} k_c \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j^c\|^2$, $U_a(\mathbf{q}_i^c, \mathbf{q}_j^c) = \frac{1}{2} k_c \|\mathbf{q}_i^c - \mathbf{q}_j^c\|^2$, $U_l(\mathbf{q}_{li}, \mathbf{q}_r) = \frac{1}{2} k_l \|\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_r\|^2$ 。其中: k_l, k_c —正常数。并选取分离势场函数为:

$$U_{ij} = \begin{cases} A \frac{L^2}{\|\mathbf{q}_{ij}\|^2}, & \|\mathbf{q}_{ij}\| < R \\ U_r, & \|\mathbf{q}_{ij}\| \geq R \end{cases} \quad (21)$$

式中: A, L —一起调整作用的正常数; R —个体的通讯作用范围。

在本研究中的移动机器人编队控制算法设计中,采用领航-跟随模式^[10]。假设领航者拥有已知运行轨迹信息,能对已知轨迹进行有效跟踪,跟随者移动机器人不知道群集中哪个个体为领航者,仅基于其周围邻居的运动信息在运动控制律的作用下实现群集的编队运行。

综合上述分析,可将跟随者的运动控制器设计为:

$$\dot{\mathbf{q}}_{fi} = - [k_c(\mathbf{q}_{fi} - \mathbf{q}_{fi}^c) + \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{q}_{fi}} U_s(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)] + \beta \quad (22)$$

领航者的运动控制器设计为:

$$\dot{\mathbf{q}}_{li} = - [k_c(\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_{li}^c) + \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{q}_{li}} U_s(\mathbf{q}_{li}, \mathbf{q}_j) + k_t(\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_r)] + \dot{\mathbf{q}} \quad (23)$$

定理 2:考虑由 N 个移动机器人组成的群集系统,其动力学方程由式(2)描述,群集中心一致算法由式(9)描述,跟随者运动控制律由式(22)描述,领航者运动控制律由式(23)描述,假设该群集的邻接图是连通的,则所有跟随者机器人的速度将渐近收敛于领航者的速度,相邻的机器人之间可以实现避碰,群内部的势能将达到最小,群形状将趋于稳定^[11]。

证明:考虑式(20)给出的势场函数,对其求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{U} = & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} k_c(\mathbf{q}_i^c - \mathbf{q}_j^c) \dot{\mathbf{q}}_i^c + \sum_{i=1}^N k_c(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_i^c)^T \dot{\mathbf{q}}_i - \\ & \sum_{i=1}^N k_c(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_i^c)^T \dot{\mathbf{q}}_i^c + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{p}_i} U_s^T \dot{\mathbf{q}}_i + \\ & \sum_{i=1}^L k_t(\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_r)^T \dot{\mathbf{q}}_{li} - \sum_{i=1}^L k_t(\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_r)^T \dot{\mathbf{q}}_r \quad (24) \end{aligned}$$

定义:

$$\begin{aligned} E = & \sum_{i=1}^N k_c \left(\sum_{j \in N_i} (\mathbf{q}_i^c - \mathbf{q}_j^c) - (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_i^c) \right)^2 + \\ & \sum_{i=1}^F \left(k_c(\mathbf{q}_{fi} - \mathbf{q}_{fi}^c) + \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{q}_{fi}} U_s \right)^2 + \\ & \sum_{i=1}^L \left(k_c(\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_{li}^c) + \sum_{j \in N_i} \nabla_{\mathbf{q}_{li}} U_s + k_t(\mathbf{q}_{li} - \mathbf{q}_r) \right)^2 \quad (25) \end{aligned}$$

将移动机器人编队运动控制器式(22 ~ 23)和群集中心一致算法式(9)以及式(25)代入到式(24)中,可得:

$$\dot{U} \leq -E \quad (26)$$

根据 LaSalle 不变集定理^[12-13],当集合 $\Omega = \{\mathbf{q}, \mathbf{q}^c \mid E = 0\}$ 为不变集时, U 会逐渐减小直至 $U = 0$ 。由此可知,移动机器人群集最终会进入稳定运行状态,群集中的个体速度趋于一致,相互间的距离保持稳定。

3 仿真实验及结果分析

为验证本研究所设计的基于虚拟群集中心的多移动机器人编队运动控制算法的正确性和有效性,笔者在 Matlab 环境下,选择 4 个移动机器人进行仿真验证,其中 1 个作为领航者,其余 3 个为跟随者,领航者已知群集运行轨迹,跟随者在领航者的带领下实现稳定的群集运动。

假设领航者移动机器人的参考运行轨迹为已知圆直线^[14-17],其方程为:

$$\begin{cases} x_r = 2\ 200\cos(\omega t) + 500 \\ y_r = 2\ 200\sin(\omega t) \end{cases} \quad (27)$$

式中: (x_r, y_r) —参考轨迹, mm; ω —角速度, $\omega = 0.01$; t —更新步长, $t = 0.1$ 。

4 个移动机器人初始位置分别设定为: $\mathbf{q}_{l1} = [3\ 100, -800]$, $\mathbf{q}_{f1} = [2\ 300, -1\ 100]$, $\mathbf{q}_{f2} = [2\ 300, -1\ 600]$, $\mathbf{q}_{f3} = [3\ 100, -1\ 600]$ 。

其他仿真控制参数分别为: $k_c = 1$, $k_t = 2$, $\beta = 10$ mm/s, $A = 8\ 000$, $L = 800$, $R = 1\ 500$ mm。

仿真结果分别如图(2 ~ 5)所示。

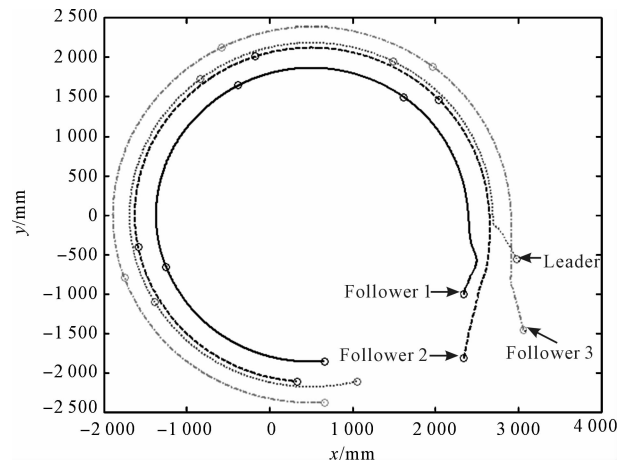


图 2 群集运动轨迹

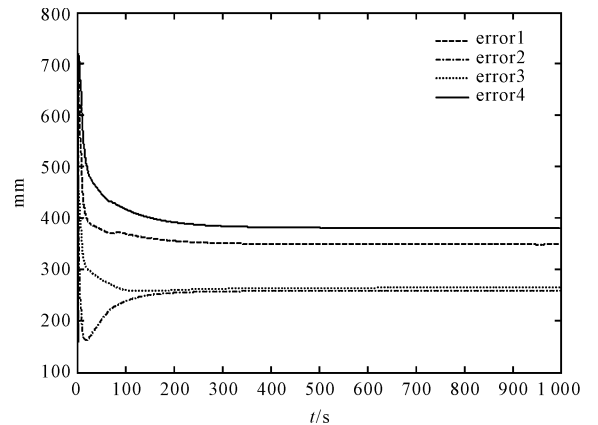


图 3 虚拟群集中心估计误差

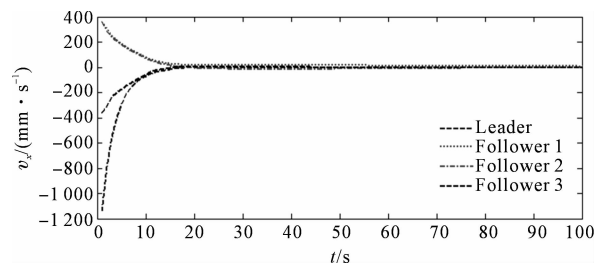


图 4 移动机器人 x 方向上的速度曲线

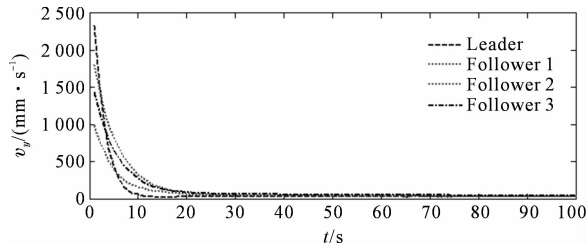


图 5 移动机器人 y 方向上的速度曲线

从图 2 可以看出,根据式(21), R 表示个体的通讯作用范围,在 $R = 1\ 500\ \text{mm}$ 范围内,在领航者的带领下,从各自的初始位置向群集中心靠拢,最终形成稳定的运行编队,个体之间在势场力的作用下保持一定的间距,无碰撞现象发生。

从图 3 可知,估计的虚拟群集中心最终与实际的群集中心误差收敛到很小的范围之内 ($< 400\ \text{mm}$)。

从图 4 和图 5 可以看出,群集中个体的运动速度在 x 方向和 y 方向最终趋于一致,达到了以稳定的速度编队运行的目的。

以上仿真结果表明:该算法使移动机器人群集在领航者的带领下最终会进入稳定运行状态,个体速度趋于一致,相互间的距离保持稳定。

4 结束语

本研究对局部信息约束下的多移动机器人编队控制问题进行了研究。首先针对机器人个体仅能通过局部交互获取周围邻居运动信息的特点,设计了虚拟中心算法对群集中心进行估计,使所有机器人都向群集中心移动,并通过理论分析证明了虚拟群集中心渐进趋近与实际群集中心。在此基础上,本研究利用人工势场法和速度一致理论实现了机器人个体间的避碰和速度一致,实现了多移动机器人的编队运行,并通过理论分析证明了算法的稳定性和收敛性。最后通过仿真实验验证了所提算法的可行性和有效性。

参考文献 (References):

[1] 原 魁,李 园,方立新. 多移动机器人系统发展研究近况[J]. 自动化学报,2007,33(8):785-794.

[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[J]. 机器人,2000,22(6):433-438.

[3] 樊玮虹,唐 波,蔡宣平等. 基于人工势场法和 Ad-hoc 网络的多机器人编队控制[J]. 国防科技大学学报,2006,28(4):49-53.

[4] 程 磊,朱全民,吴怀宇,等. 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[J]. 控制与决策,2011,26(3):477-480.

[5] REYNOLDS C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavior model [J]. **Computer Graphics**, 1987, 21(4):25-34.

[6] DOUGLAS B WEST 著,李建中,骆吉州译. 图论导引 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[7] 贾秋玲,闫建国,王新民. 基于势函数的多机器人系统的编队控制[J]. 机器人,2006,28(2):111-114.

[8] 方华京. 人工势场法在多机器人运动中的研究[J]. 控制工程,2007,14(2):115-117,150.

[9] 庄 未. 一种独轮车机器人的动力学建模及俯仰平衡控制[J]. 中国机械工程,2016,27(4):85-87.

[10] 史恩秀. 基于蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法研究[J]. 农业机械学报,2014,45(6):53-57.

[11] 蒋美云. 基于任务分解的机器人路径规划导航[J]. 计算机与现代化,2014(8):16-20.

[12] 王奎民. 一种改进人工势场的 UUV 动碍航物规避方法 [J]. 智能系统学报,2014,9(1):47-52.

[13] 蒲兴成. 细菌趋化行为的移动机器人路径规划方法 [J]. 智能系统学报,2014(1):69-75.

[14] 白亮亮,平雪良,仇恒坦. 分布室内移动机器人的定位与导航 [J]. 轻工机械,2016,34(4):54-57.

[15] 周邵云. 基于分布式的移动机器人控制系统设计与实现 [J]. 电子测试,2016(3):1-2.

[16] 郭小宝,赵 振,陈落根. 基于能量法的重载码垛机器人重力平衡分析与设计 [J]. 包装与食品机械,2015(6):43-46.

[17] 梁 娟. 自适应神经模糊推理结合 PID 控制的并联机器人控制方法 [J]. 计算机应用研究,2016,33(12):3586-3590.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

史 骏. 基于虚拟群集中心的局部信息下多移动机器人编队控制研究 [J]. 机电工程,2017,34(8):948-952.

SHI Jun. Virtual flocking center based multiple mobile robot formation control under local information [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(8):948-952.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>