# 具有速度、加速度约束的机器人编队避障控制

## 张志伟, 滕英元<sup>†</sup>, 杨慧欣, 倪智宇

(沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要**: 针对轮式移动机器人的编队避障问题, 提出了一种改进的控制算法, 能够有效实现避免碰撞和规避障碍. 首先, 建立多机器人不同控制增益的全员"航标"引导的非线性循环追踪控制编队, 当编队过程某成员监测执行功 能失效(但仍能运行)时, 可对非失效机器人进行系统降级重组, 并继续执行任务且避免机器人之间发生碰撞; 再通 过引入速度和加速度约束, 以满足轮式移动机器人控制接口及保护电机的需要, 从而保证控制算法的稳定与收敛; 最后, 通过引入惩罚因子对该控制算法进行改进, 使编队成功规避障碍物并进行最短路径规划. 结果表明, 改进的 控制算法增加了多机器人编队的鲁棒性、提高了抗干扰能力及编队恢复执行任务的可靠性, 更有效地实现了编队 避障控制.

关键词:编队避障控制;"航标"引导;速度、加速度约束;惩罚因子

**引用格式**: 张志伟, 滕英元, 杨慧欣, 等. 具有速度、加速度约束的机器人编队避障控制. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1388 – 1396

DOI: 10.7641/CTA.2019.90325

# Obstacle avoidance control for robots formation with speed and acceleration constraints

ZHANG Zhi-wei, TENG Ying-yuan<sup>†</sup>, YANG Hui-xin, NI Zhi-yu

(Institute of Aeronautics and Astronautics, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110136, China)

Abstract: In this paper, an improved control algorithm for formation obstacle avoidance of wheeled mobile robots is presented, which can effectively avoid collision and obstacles. Firstly, the control formation of nonlinear cyclic pursuit in "navigation's beacon" to all agents for multi-robot with different control gain is established. When a member of the formation process fails to monitor the execution function (but it can still run), the non-failure robot can be degraded and reorganized, then the tasks can be continued and the collision between the robots can be avoided. Then the speed and acceleration constraints are introduced to meet the requirements of control interface and motor protection of wheeled mobile robot so as to ensure the stability and convergence of the control algorithm. Finally, the penalty factor is introduced to improve the control algorithm, so that the formation can avoid obstacles successfully and plan the shortest path. The results show that the improved control algorithm increases the robustness of multi-robot formation, improves the antijamming ability and the reliability of the formation recovery to perform tasks, and realizes the control of formation obstacle avoidance more effectively.

**Key words:** formation obstacle avoidance control; navigation's beacon guidance; velocity and acceleration constraints; penalty factor

**Citation:** ZHANG Zhiwei, TENG Yingyuan, YANG Huixin, et al. Obstacle avoidance control for robots formation with speed and acceleration constraints. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1388 – 1396

# 1 引言

机器人技术是一项融合跨学科的高科技领域技术, 机器人编队控制广泛应用于巡逻、搜救、侦察、空间 探测等领域<sup>[1-6]</sup>.机器人编队避障控制问题是一项基 础且关键的重要问题,受到人们广泛的关注,已经成 为科技研究的热点<sup>[7-9]</sup>.最新文献表明,机器人可以作 为一个工作组合作完成监视任务或者在敌对地区从 事间谍工作<sup>[10-12]</sup>.在民用应用中,需要系统来自动驾 驶车辆.此外,在物联网中,需要机器人来合作运送物 品.

收稿日期: 2019-05-07; 录用日期: 2019-12-26.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: yyteng2005@aliyun.com; Tel.: +86 13940072590.

本文责任编委: 黄攀峰.

国家自然科学基金项目(11672187)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11672187).

目前比较流行的循环追踪(cyclic pursuit)控制思 想实际上是从生物学的角度得来的,如蚁群算法[13]、 飞行中的鸟群<sup>[14]</sup>等,可以分为线性循环追踪(linear cvclic pursuit, LCvP) 和非线性循环追踪(nonlinear cyclic pursuit, NlCyP). 研究表明<sup>[15-17]</sup>, 当人们用线性 循环追踪的思想描述多个体系统达到平衡状态时,个 体的运动轨迹在平衡点处稳定,而多个体的线性循环 追踪将收敛到编队的初始中心[18-19]. 人们对于非线 性模型下的循环追踪控制问题和稳定性进行了分析, 研究表明<sup>[20-23]</sup>,非线性的循环追踪编队形成稳定构形 时,其编队中心也被初始位置固定.当LCvP与NICvP 应用于即时、在线控制时,可以收敛到期望的构形, 甩 具有较好的稳定性与鲁棒性.稳定运行的编队,其中 心位置与运动过程无关,始终保持在初始几何的中心, 而且在编队达到稳定前,无法提前确定稳定构形的中 心位置.从实际应用角度看,这就降低了其适用性,使 得一些具有特征典型的任务设计无法实施. 要改进编 队中心可变的性质,就需要引入新的控制算法,如引 入非成员的导引参考,用于保证固定信标周围机器人 运动的全局渐近稳定性. Ceccarelli等在研究多个体系 统(multi-agent system, MAS)的集体定位行为时,提 出了引入虚拟参考航标作为运动导引的思想[24],对单 个具有指定旋转方向的成员,设计了具有全局渐近稳 定性的"航标"导引控制法则,较好地解决成员与指 定点的相对位置问题.

同时,在编队运动过程中,对机器人速度和加速度 大小没有限制.而在实际应用中,机器人本身对速度 和加速度的大小有一定的限制, 当速度和加速度大小 超过机器人的截断速度时,机器人只会以自己允许的 最大速度运行. Ren、张玉杰等<sup>[25-26]</sup>利用控制Lyapunov函数方法克服了输入约束对控制器设计带来的困 难. Gu、顾万里等<sup>[27-28]</sup>提出了一种适用于速度受限移 动机器人的跟踪控制器. 该算法考虑了移动机器人的 速度约束,对于移动机器人的执行器,无法跟踪加速 度过大的速度命令. Chen X等<sup>[29]</sup>研究了单机避障问 题,结果表明,在速度和加速度约束条件下,单机的避 障识别和控制效果很好. Wang Zhiteng等<sup>[30]</sup>分析单机 的避障控制原理,在不考虑最短路径时,避障控制效 果显著.对多移动机器人避障问题的研究,以往人们 常采用B rooks<sup>[31]</sup>提出的基于行为的反应式控制及宋 梅萍等[32]提出的基于规则的控制策略等方法,这些方 法适用于任务和环境很简单的情况. 四叉树法[33]更适 用于模型环境不发生动态变化的情况. 张纯刚等[34]提 出的基于局部感知的窗口滚动法,适用于未知环 境,并给出了局部最优解. Giuseppe Franzè和Walter Lucia<sup>[35]</sup>提出了滚动时域策略,用于解决动态环境中 线性定常系统所描述的自主移动机器人的路径规划 问题.

本文在前人工作的基础上,聚焦于避障识别的实 域性,即避障的识别及算法的时效性,即收敛的效率. 设置了不同的局部控制增益,考虑了速度和加速度约 束,同时引入了惩罚因子.采用该优化算法,实现了以 下3个功能:1)实现非失效机器人的降级重组,避免机 器人之间发生碰撞;2)实现控制算法的稳定与收敛; 3)解决了机器人编队构型稳定后向前行进过程中的 避障问题.研究结果验证了所提控制方法的正确性和 有效性.

## 2 多机器人的编队模型

机器人的位姿用[ $x \ y \ \theta$ ]<sup>T</sup>表示,  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ 表示 个体在平面内的位置,  $\theta$ 表示运动方向,  $(u, \omega) \in \mathbb{R}^2$ 表 示切向速度和角速度控制输入.因此, 机器人的运动 方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix}.$$
(1)

因此,动力学模型为

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}.$$
(2)

本文采用的多机器人编队方式如图1-2所示.









Fig. 2 Multi-robot formation configuration

图中:  $(x_i, y_i, \theta_i)$ 表示前边第*i*个机器人的位置和 导向角,  $(x_{i-1}, y_{i-1}, \theta_{i-1})$ 表示跟随的第*i* – 1个机器 人的位置和方向.  $r_{i-1}$ 表示机器人*i*与*i* – 1之间的距 离,  $\alpha_{i-1}$ 指从机器人*i* – 1速度方向与机器人*i*连线方 向的夹角,  $\beta_{i-1}$ 表示机器人*i* – 1速度方向与机器人*i* 速度方向夹角的补角.

因此,多移动机器人编队的运动方程为

$$\dot{T} = Lz_i + Gz_{i-1}, \\ \dot{\varepsilon} = \omega_i - \omega_{i-1},$$
(3)

其中:  $T = [r_{i-1} \varphi]^{\mathrm{T}}$ ;  $\varphi = \pi - \alpha_{i-1} - \beta_{i-1}$ ;  $\varepsilon = \theta_i - \theta_{i-1}$ 是机器人*i*和机器人*i* - 1的相对方位;  $z_i 和 Z_{i-1}$ 分别是机器人*i*和机器人*i* - 1的速度矢量.

$$L = \begin{bmatrix} -\cos\varphi & 0\\ \frac{\sin\varphi}{r_{i-1}} & -1 \end{bmatrix},$$
 (4)

$$G = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\frac{\sin \gamma}{r_{i-1}} & \frac{\cos \gamma}{r_{i-1}} \end{bmatrix},$$
 (5)

其中 $\gamma = \varphi + \varepsilon$ . 值得注意的是 $T, \gamma \pi \varphi \beta$ 别是 $T(t), \gamma(t)$ 和 $\varphi(t)$ 的瞬时值,所以T的值为

$$T = \begin{bmatrix} v_{i-1}\cos\gamma + \omega_{i-1}\sin\gamma - v_i\cos\varphi\\ -v_{i-1}\frac{\sin\gamma}{r_{i-1}} + \omega_{i-1}\frac{\cos\gamma}{r_{i-1}} + v_i\frac{\sin\varphi}{r_{i-1}} - \omega_i \end{bmatrix}.$$
(6)

# 3 控制算法优化

对于NICyP控制的机器人编队,在其期望的编队 中心设置"航标"(navigation's beacon, NB),引导机 器人循环追踪完成均匀分布的同时,通过引入了非成 员的参考功能解决其集体定位问题,使其能够收敛到 相对"航标"的指定距离."航标"示意图如图3所示.



Fig. 3 Diagram of robot relative navigation's beacon

由于定速追踪的运动是变速追踪的稳定情况,所以,设机器人编队达到稳定速率 $v_{\rm R}$ 前,速率按 $v_i = k_{\rm r}r_i$ 变化, $k_{\rm r}$ 为常数.基于 NB 控制律<sup>[24]</sup>对系统实行全员"航标"引导的非线性循环追踪控制编队时(non-

linear cyclic pursuit in navigation's beacon to all agents, NICyP&NB-a), 运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{r}_{i} = -v_{i} \cos \alpha_{i} - v_{i+1} \cos(\alpha_{i} + \beta_{i}), \\ \dot{\alpha}_{i} = \frac{1}{r_{i}} (v_{i} \sin \alpha_{i} + v_{i+1} \sin(\alpha_{i} + \beta_{i})) - u_{i}, \\ \dot{\beta}_{i} = u_{i} - u_{i+1}, \\ \dot{\gamma}_{i} = \frac{v_{i}}{\rho_{i}} \sin \gamma_{i} - u_{i}, \\ \dot{\rho}_{i} = -v_{i} \cos \gamma_{i}, \\ u_{i} = k_{\mathrm{b}} \gamma_{i} \ln(\frac{(c_{\mathrm{b}} - 1) \cdot \rho_{i} + \rho_{0}}{c_{\mathrm{b}} \cdot \rho_{0}}). \end{cases}$$
(8)

机器人组成的MAS编队,假设编队前机器人的初始坐标定义为[x, y].

### 3.1 降级重组

当编队过程中个别成员出现监测执行功能失效问题(但仍能运行)时, NICyP&NB-a控制算法可实现对 非失效机器人进行系统降级重组, 其目的是实现正常 运行的机器人仍保持均匀分布进行工作, 同时也要保 证控制过程中正常机器人与监测执行功能失效机器 人不会发生碰撞.

如果失效机器人成为新的避障问题,本文从识别 到避障会形成合理的闭路循环,新的避障会循环至初 始,形成新的识别和新的避障.可以实现对失效机器 人的处理,从而实现多移动机器人的编队避障.

NICyP&NB-a控制下的相位调整,其关键是机器 人的速率、控制增益 $k_{\alpha}$ 与期望状态的匹配.若各机器 人稳定速率相同,则通过调整局部控制增益 $k_{\alpha}$ 值来达 到目的效果.改变 $u_i$ ,通过分别设定不同的控制增益 值 $k_{\alpha 1}$ ,  $k_{\alpha 2}$ ,  $k_{\alpha 3}$ ,  $k_{\alpha 4}$ 来实现降级重组.

$$u_1 = k_{\alpha 1} \alpha_i + k_{\mathrm{b}} \gamma_i \ln(\frac{(c_{\mathrm{b}} - 1) \cdot \rho_i + \rho_0}{c_{\mathrm{b}} \cdot \rho_0}), \qquad (9)$$

$$u_2 = k_{\alpha 2} \alpha_i + k_{\mathrm{b}} \gamma_i \ln(\frac{(c_{\mathrm{b}} - 1) \cdot \rho_i + \rho_0}{c_{\mathrm{b}} \cdot \rho_0}), \quad (10)$$

$$u_{3} = k_{\alpha 3} \alpha_{i} + k_{b} \gamma_{i} \ln(\frac{(c_{b} - 1) \cdot \rho_{i} + \rho_{0}}{c_{b} \cdot \rho_{0}}), \quad (11)$$

$$u_{4} = k_{\alpha 4} \alpha_{i} + k_{\rm b} \gamma_{i} \ln(\frac{(c_{\rm b} - 1) \cdot \rho_{i} + \rho_{0}}{c_{\rm b} \cdot \rho_{0}}).$$
(12)

#### 3.2 引入速度、加速度约束

考虑到一些轮式移动机器人只提供速度控制接口, 而机器人电机不能跟踪加速度过大的速度指令,对于 不考虑约束的机器人,当控制量超过约束界限时,应 用于物理机器人系统的控制输入会截断,截断控制输 入会降低控制器的性能,甚至使被控系统失稳.因此 引入了速度和加速度约束.

$$|v| \leqslant v_{\rm c}, \ |\dot{v}| \leqslant a_{\rm c},\tag{13}$$

其中v<sub>c</sub>和a<sub>c</sub>是常数.机器人速度和加速度约束大小约

为 $v_{\rm c} = 0.6$  m/s,  $a_{\rm c} = 1.12$  m/s<sup>2</sup>. 当速度超过速度束时,系统会做出截断,截断的响应时间为t = 100 s,因此在此期间内系统会增大控制增益 $k_{\alpha}$ 和 $k_{\rm b}$ 使之迅速达到要求.

当
$$v_i > v_c$$
时, 则  

$$\begin{cases}
k_{\alpha} = 2 \times k_{\alpha}, \ k_{b} = 2 \times k_{b}, \ t > 100 \,\mathrm{s}, \\
k_{\alpha} = k_{\alpha}, \ k_{b} = k_{b}, \ t \leq 100 \,\mathrm{s}.
\end{cases}$$
(14)

#### 3.3 路径规划、避障控制

为了避免机器人在编队形成稳定的构型后,向前 行进过程中与障碍物发生碰撞的危险,提出了引入惩 罚因子的概念以淘汰不安全路径.本文主要研究编队 中心到目标点的最短路径规划.惩罚因子是一个施加 在路径长度的系数,见式(15):

$$\delta = \begin{cases} \frac{\pi \arccos(d_{\rm p}/(\rho_0 + d_0))}{90} - \\ \frac{2\sqrt{(\rho_0 + d_0)^2 - d_{\rm p}^2}}{\rho_0 + d_0}, & 0 \le d_{\rm p} < \rho_0 + d_0, \\ 0, & d_{\rm p} \ge \rho_0 + d_0, \end{cases}$$
(15)

式中: *δ*代表惩罚因子, *d*<sub>0</sub>为单个机器人与障碍物之间 的安全距离, *d*<sub>p</sub>表示选择的路径和障碍物之间的最短 距离.

假设最短路径长度为*l<sub>k</sub>*,综合考虑路径中的障碍,得到安全最短路径长度*L<sub>k</sub>*:

$$L_k = l_k + \delta(\rho_0 + d_0).$$
 (16)

由式(15)-(16)可知, 当 $0 \leq d_p < \rho_0 + d_0$ 时, 说明路径 和障碍物之间的距离过近, 机器人选择的路径为不安 全路径, 惩罚因子 $\delta$ 变大, 得到的安全最短路径长度  $L_k$  也相应变大; 当 $d_p \geq \rho_0 + d_0$ 时, 说明路径和障碍 物之间为安全距离, 机器人选择的路径为安全路径, 惩罚因子 $\delta$ 值为0, 安全最短路径长度 $L_k$  与 $l_k$ 等长.

**证** 定义编队中心初始位置为(*x*<sub>1</sub>, *y*<sub>1</sub>),运动目标 位置为(*x*<sub>2</sub>, *y*<sub>2</sub>),如图4-5所示,其中M1-M4分别代 表不同的机器人.









 $x_2 > x_1$ , 障碍物的位置坐标为(a, b), 且 $0 \le d_p < \rho_0 + d_0$ , 所以最短路径为

$$(y - y_1)/(y_2 - y_1) = (x - x_1)/(x_2 - x_1).$$
 (17)  
急短路径长度1.为

$$l_k = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$
 (18)

由于编队为圆形,所以考虑每个机器人与障碍物的安 全距离时,可直接转化为编队中心与障碍物的安全距 离为( $\rho_0 + d_0$ ),因此在障碍物周边的最短安全路径为

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = (\rho_0 + d_0)^2.$$
 (19)

同时联立式(17)(19)即可求出交点坐标分别为A(m<sub>1</sub>, n<sub>1</sub>), B(m<sub>2</sub>, n<sub>2</sub>), 其中m<sub>2</sub> > m<sub>1</sub>.

所以整个机器人编队到达目标点的安全的最短路 径为

$$y = \begin{cases} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 + y_1, \ x_1 \leq x < m_1, \\ \sqrt{(\rho_0 + d_0)^2 - (x - a)^2} + b, \ m_1 \leq x < m_2, \\ \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 + y_1, \ m_2 \leq x \leq x_2, \end{cases}$$
(20)

所以,此时安全的最短安全路径长度L<sub>k</sub>为

$$L_{k} = \sqrt{(x_{2} - x_{1})^{2} + (y_{2} - y_{1})^{2}} - \frac{2\sqrt{(\rho_{0} + d_{0})^{2} - d_{p}^{2}}}{2\sqrt{(\rho_{0} + d_{0})^{2} - d_{p}^{2}}} + \frac{\pi \arccos(d_{p}/(\rho_{0} + d_{0}))}{90}(\rho_{0} + d_{0}), \quad (21)$$

此时可得惩罚因子为

$$\delta = \frac{\pi \arccos(d_{\rm p}/(\rho_0 + d_0))}{90} - \frac{2\sqrt{(\rho_0 + d_0)^2 - d_{\rm p}^2}}{\rho_0 + d_0}.$$
(22)

证毕.

#### 4 仿真结果

此时,假设由三机器人组成的MAS编队(M1, M2,

M3),初始坐标分别为M1[0.496, -99.999], M2 [86.849, -49.57], M3[-86.354, -50.429]. 当改进 $u_i$ 中的 $k_{\alpha}$ 都为统一值 $k_{\alpha} = \frac{0.003}{\pi}$ 时,对系统实行NlCyP 控制,稳定时编队中心与初始几何中心(原点)不重合, 如图6所示.此时若设 $k_b = 0.01$ ,  $c_b = 2$ ,其余参数保 持不变,对系统实行航标在原点的NlCyP&NB-a控 制时,编队中心在原点附近稳定,运行结果如图7所示. 以下所有图中彩色图形代表了不同机器人的初始位 置,黑色图形代表了不同机器人的最终位置.



图 6 NICyP控制编队运行轨迹

Fig. 6 NlCyP control formation trajectory





相比于以往控制方法, NICyP&NB-a控制可以实现"航标"为原点进行{n/1}追踪运动, 编队中心可变, 整个编队在收敛到稳定构形的同时, 其编队中心也将向"航标"收敛, 当速率均稳定在v<sub>R</sub>, 则该系统将进化为以原点为中心的广义正多边形.

与文献[23]的经典算法进行比较(取稳定值浮动 1%时的计算步step作为对比)见表1.

	表1	算法对比
Table 1	Algo	orithm comparison

	-	-	
参数(N编队 机器人个数)	N = 3	N = 4	N = 5
经典算法 <sup>[23]</sup> 本文算法	8251(step) 532(step)	8629(step) 991(step)	14932(step) 4458(step)

由此可见,本文所采用的算法在效率、稳定性、收 敛速度具有较好的效果.

#### 4.1 降级重组

编队成员为4个机器人 (M1, M2, M3, M4), 假定 M3机器人失效, 令 $k_{\alpha 1} = \frac{0.094}{\pi}$ ,  $k_{\alpha 2} = \frac{0.188}{\pi}$ ,  $k_{\alpha 3} = \frac{0.188}{\pi}$ ,  $k_{\alpha 4} = \frac{0.094}{\pi}$ , 即期望正常机器人均布, 失效 机器人M3位于M2与M4中间. 其他的初始参数设置 见表2,  $\psi$ 为4个机器人的初始相位角, U为控制输入电 压, 单个步长step为100 s.

表 2 初始参数值 Table 2 Value of initial parameters

参数	数值
$ ho_0$	1 m
$c_{ m b}$	2
$k_{ m b}$	0.0785
U	$11\mathrm{V}$
m	$3\mathrm{kg}$
$(\psi_1,\psi_2,\psi_3,\psi_4)$	$(0, \frac{2\pi}{3}, \pi, \frac{4\pi}{3})$
step	1 s

于是,得到的仿真结果如图8-9所示.图8中彩色 图形代表了机器人的初始位置,黑色图形代表了最终 位置.可以看出,编队的半径为1m,失效机器人M3位 于M2,M4之间,所有的机器人达到了稳定的状态,正 常机器人实现了均匀分布状态,编队中心坐标稳定在 原点.仿真达到400步时,机器人相对参考中心距离趋 向稳定.







图 9 四机器人相对航标距离



正常机器人相对距离与正常机器人相对监测执行 功能失效机器人距离分别如图10-11所示.可以看出, 正常机器人之间相对距离约为1.75 m,失效机器人M3 与正常机器人M2, M4之间距离约为1 m,与正常机器 人M1的距离约为2 m.



图 10 正常机器人(M1, M2, M4)相对距离







因此,在个别成员出现监测执行功能失效的情况 下,只要参数匹配,编队仍能达到循环追踪的理想构 形,为多机器人的编队增强了鲁棒性,防干扰和编队 继续执行任务的恢复能力.

# 4.2 引入速度、加速度约束

从图12-13中可以看出,机器人的速度和加速度 最终都趋向稳定,速度约为0.313 m/s,最大约为 0.323 m/s,加速度最大约为8.2 × 10<sup>-4</sup> m/s<sup>2</sup>,最终加 速度趋向于0.





当速度超过0.6 m/s的速度约束时(见图14), 控制 增益变大, 此时,

$$k_{\alpha 1} = \frac{0.376}{\pi}, \ k_{\alpha 2} = \frac{0.752}{\pi}, k_{\alpha 3} = \frac{0.752}{\pi}, \ k_{\alpha 4} = \frac{0.376}{\pi}, \ k_{\rm b} = 0.314$$

机器人在100s内迅速降低到约束值以下,而不被 截断,继续执行任务,见图15.



图 15 增大 $k_{\alpha}$ , $k_{b}$ 后速度 Fig. 15 Speed after increasing  $k_{\alpha}$ , $k_{b}$ 

由此可见,在一定范围内调整 $k_{\alpha}$ , $k_{b}$ 以满足速度 变化的要求,机器人编队调整应使相位、速率与控制 增益 $k_{\alpha}$ , $k_{b}$ 匹配.控制增益参数 $k_{\alpha}$ 与 $k_{b}$ 二者要平衡, 以保证匹配的预期.当较多成员分担的NB控制时, $k_{b}$ 取值也相应减小.控制增益具体参数的选取,以参考 文献[18,24,36]得到大致范围为初始参数,通过多次 反复调试,最终得到识别和收敛效率最好的优化参数 组合.

#### 4.3 路径规划、避障控制

具体参数设置见表3, 其余参数与前边得到的数据 相同.

	表 3 初始参数值
Table 3	Value of initial parameters

参数	数值
$d_0$	$0.3\mathrm{m}$
编队运行速度	$0.2\mathrm{m/s}$
起点位置	[0,0]
目标位置	[7, -3]
障碍物位置	[1, -3], [3, -1], [3, -2]
$(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4)$	$(0,\frac{2\pi}{3},\pi,\frac{4\pi}{3})$

表3中λ为编队完成后4个机器人的相位角.

图16-18分别表示障碍物位置对降级重组后4个 机器人的影响.图16为障碍物远离机器人编队, 图17表示障碍物处于起止点连线下方,图18表示障碍 物处于起止点连线上方,因此图16的障碍物对机器人 编队基本没有影响,图17-18只是有影响,只是因为 障碍物位置不同,运动轨迹不一样.



图 16 无障碍运动轨迹

Fig. 16 Obstacle-free trajectories of motion



图 17 有障碍运动轨迹

Fig. 17 Motion trajectories with obstacles



# 图 18 有障碍运动轨迹



此惩罚因子引入的优点是:无论障碍物多少或处于什么位置,编队规划的路径始终为最短路径,这样 大大节省了机器人编队运行时间.

#### 5 结论

为了实现多机器人复杂情况的编队避障控制,本 文研究了具有速度、加速度约束的改进的控制算法, 并且引入惩罚因子的不同控制增益的NICyP&NB-a 控制方案.该方法关键特征是全局稳定性和鲁棒性, 提高了抗干扰及规避障碍的能力,实现了只有局部控 制信息的多机器人编队.

 1)不同的局部控制增益,可实现非失效机器人的 降级重组,避免机器人之间发生碰撞;

2) 速度和加速度约束的引入,更符合实际情况参数更简单,且实现了控制算法的稳定与收敛;

3) 通过引入惩罚因子, 使多机器人成功规避障碍, 保持编队的同时搜寻出到达目标位置的最短路径, 节 省了运行时间.

#### 参考文献:

- JAVIER A M, EDUARDO M, TOBIAS N, et al. Distributed multirobot formation control in dynamic environments. *Autonomous Robots*, 2019, 43(5): 1079 – 1100.
- [2] GuZEY H M, DIERKS T, JAGANNATHAN S, et al. Hybrid consensus-based control of nonholonomic mobile robot formation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 88(1): 181 – 200.
- [3] PENG L, GUAN F, PERNEEL L, et al. Decentralized multi-Robot formation control with communication delay and asynchronous clock. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, 89(3/4): 465 – 484.
- [4] LIU Haiguang, SUN Mingtai, WANG Guiqin. Remote underwater weapon path planning based on ant colony optimization inspired by field heuristic. *Command Control & Simulation*, 2016, 38(6): 42 – 45.

(刘海光,孙明太,王桂芹.基于势场启发蚁群算法的远程水中兵器 航路规划.指挥控制与仿真,2016,38(6):42-45.)

- [5] SHI Wuxi, WANG Dongwei, LI Baoquan. Formation control based on leader-followers for multiple mobile robots. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2018, 37(2): 72 – 78.
  (师五喜, 王栋伟, 李宝全. 多机器人领航--跟随型编队控制. 天津工 业大学学报, 2018, 37(2): 72 – 78.)
- [6] JIA Yongnan, LI Qing. Research development of multi-robot formation control. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(8): 893 900.
  (贾永楠, 李擎. 多机器人编队控制研究进展. 工程科学学报, 2018, 40(8): 893 900.)
- [7] CHANG Y H, WU C I, LIN H W. Adaptive distributed fault-tolerant formation control for multi-robot systems under partial loss of actuator effectiveness. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2018, 16(5): 2114 – 2124.
- [8] LI Yiming. Principle and analysis of robot obstacle avoidance. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2017, (3): 120 121.
   (李一鸣. 机器人避障的原理及分析. 电子技术与软件工程, 2017, (3): 120 121.)
- [9] XIONG Junqiang, DAI Jiyang, WANG Cunsong. Research on optimal control of robot motion obstacle avoidance. *Computer Simulation*, 2018, 35(3): 252 256, 336.
  (熊俊强,代冀阳, 王村松. 机器人运动避障优化控制研究. 计算机仿 真, 2018, 35(3): 252 256, 336.)

- [10] YOUNG S, KOTT A. A survey of research on control of teams of small robots in military operations. *The 14th CCRTS Symposium*. [S.I.]: [s.n.], 2016.
- [11] MUR-ARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system. *IEEE Transactions* on *Robotics*, 2015, 31(5): 1147 – 1163.
- [12] DEUTSCH I, LIU M, SIEGWART R. A framework for multi-robot pose graph SLAM. 2016 IEEE International Conference on Realtime Computing and Robotics (RCAR). Angkor Wat, Cambodia: IEEE, 2016, 567 – 572.
- [13] ZHAN Shichang, XU Jie, WU Jun. The application of ant colony algorithm in the discrete LQ inverse problem. *Bulletin of Science and Technology*, 2004, 20(2): 138 141.
  (詹士昌, 徐婕, 吴俊. 蚁群算法在LQ最优控制逆问题中的应用. 科技通报, 2004, 20(2): 138 141.)
- [14] QIU Huaxin, DUAN Haibin. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(3): 317 – 322.
  (邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队. 工程科 学学报, 2017, 39(3): 317 – 322.)
- [15] MORBIDI F, RIPACCIOLI G, PRATTICHIZZO D. On connectivity maintenance in linear cyclic pursuit. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009: 363 – 368.
- [16] YANG Xixiang, YANG Tao, ZHANG Weihua. Rendezvous control of spacecraft formation based on cyclic pursuit algorithm. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(1): 1 5.
  (杨希祥,杨涛,张为华. 基于循环追踪算法的编队航天器交会控制. 国防科技大学学报, 2014, 36(1): 1 5.)
- [17] SINHA A, GHOSE D. Some generalizations of linear cyclic pursuit. First India Annual Conference. Kharagpur, India: IEEE, 2004: 210 – 213.
- [18] MARSHALL J A. Coordinated autonomy: pursuit formations of multi-agent system. Toronto, Ontario: University of Toronto, 2005.
- [19] RAMIREZ-RIBEROS J L, PAVONE M, FRAZZOLI E, et al. Distributed control of spacecraft formations via cyclic pursuit: theory and experiments. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(5): 1655 – 1669.
- [20] HU Min, ZENG Guoqiang. Decentralized control for fractionated s-pacecraft based on cyclic pursuit strategy. *Proceedings of the 9th Annual Academic Conference for Doctoral Students*. Changsha: China Association of Science and Technology, 2011: 102 103.
  (胡敏,曾国强. 基于循环追踪策略的集群航天器分散化控制方法研究. 第9届博士生学术年会论文集. 长沙:中国科学技术协会, 2011: 102 103.)
- [21] XIA Yingying. Study on formation control of underactuated ships.
   Xiamen, Fujian: Xiamen University, 2015.
   (夏盈盈. 欠驱动船舶的编队控制研究. 福建, 厦门: 厦门大学, 2015.)
- [22] ZHANG Shijie, DUAN Guangren, CAO Xibin. Stability analysis of multi-agent systems under cyclic pursuit control. *The 2009 Chinese Control and Decision Conference*. Guilin, China: IEEE, 2009: 5034 - 5038.
  (张世杰,段广仁,曹喜滨.循环追踪控制下多个体系统稳定性分析. 2009中国控制与决策会议论文集.中国,桂林: 电气和电子工程师协
- [23] ZHANG Shijie, DUAN Guangren. Distributed control for multiagent system using cyclic pursuit. *Journal of Jilin University*, 2010, 40(2): 506 510.
  (张世杰,段广仁.基于分布式控制的多个体系统的循环追踪控制. 吉林大学学报, 2010, 40(2): 506 510.)

会, 2009: 5034 - 5038.)

[24] CECCARELLI N, DIMARCO M, GARULLI A, et al. Collective circular motion of multi-vehicle systems. *Automatica*, 2008, 44(12): 3025 – 3035.

- [25] REN W, SUN J S, BEARD R W, et al. Nonlinear tracking control for nonholonomic mobile robots with input constraints: an experimental study. *Proceedings of the American Control Conference*. Portland: IEEE, 2005: 4923 – 4928.
- [26] ZHANG Yujie, SUN Liying. SVC nonlinear control design of multimachine power system considering output constraints. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 39(1): 9 – 13.

(张玉杰,孙丽颖.考虑输出约束的多机电力系统SVC非线性控制设计. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 9-13.)

- [27] GU D, HU H. Receding horizon tracking control of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(4): 743 – 749.
- [28] GU Wanli, HU Yunfeng, GONG Xun, et al. Path tracking control and experiments for wheeled mobile robots with given velocity requirement. *Journal of Agricultural Machinery*, 2017, (10): 30 36, 80.
  (顾万里, 胡云峰, 宫洵, 等. 给定速度需求的移动机器人路径跟踪控制与实验. 农业机械学报, 2017, (10): 30 36, 80.)
- [29] CHEN X, JIA Y, MATSUNO F. Tracking control of nonholonomic mobile robots with velocity and acceleration constraints. *The 2014 American Control Conference*. Portland, America: IEEE, 2014: 880 – 884.
- [30] WANG Zhiteng. Research on obstacle avoidance algorithm of robot based on fuzzy control. *Technology Innovation and Application*, 2018, 242(22): 87-88.
  (王志腾. 基于模糊控制的机器人避障算法研究. 科技创新与应用, 2018, 242(22): 87-88.)
- [31] BROOKS R. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(1): 14 – 23.
- [32] SONG Meiping, GU Guochang, ZHANG Rubo. Adaptive action fusion method for mobilerobot. *Journal of Harbin Engineering Univer*sity, 2005, 26(5): 586 – 613.

(宋梅萍,顾国昌,张汝波.移动机器人的自适应式行为融合方法.哈尔滨工程大学学报,2005,26(5):586-613.)

[33] LI Qiang. Reinfrocement learning in complex continuous systemsalgorithm designing and application. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2000. (李强. 复杂连续系统的再励学习算法设计及应用. 上海: 上海交通

[34] ZHANG Chungang, XI Yugeng. Robot path planning based on rolling window when the global environment is unknown. *Science in China(Series E)*, 2001, 31(1): 51 – 91.
(张纯刚,席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划. 中国科学E辑: 技术科学, 2001, 31(1): 51 – 91.)

- [35] FRANZE G, LUCIA W. The obstacle avoidance motion planning problem for autonomous vehicles: A low-demanding receding horizon control scheme. *Systems & Control Letters*, 2015, 77: 1 – 10.
- [36] SCHAUB H, VADALI S R, ALFRIEND K T. Spacecraft formation flying control using mean orbital elements. *Journal of the Astronautical Sciences*, 2000, 48(1): 69 – 87.

作者简介:

大学, 2000.)

**张志伟** 硕士研究生,目前研究方向为非线性动力学运动与控

制、移动机器人的循环编队及避障控制, E-mail: zzw2590@163.com;

**滕英元**博士,教授,硕士生导师,目前研究方向为非线性动力学运动与控制,E-mail: yyteng2005@aliyun.com;

**杨慧欣**博士,讲师,目前研究方向为非线性动力学运动与控制, E-mail: yanghuixin2014@163.com;

**倪智宇**博士,讲师,目前研究方向为航天动力学运动与控制, E-mail: nizhiyu@sauedu.cn.