打滑状态下的多移动机器人编队自适应控制

彭 滔[1,3], 陆 群[2,3], 苏春翌[3†]

(1. 重庆理工大学 两江人工智能学院, 重庆 400054; 2. 盐城工学院 电气工程学院, 江苏 盐城 224003;

3. 康考迪亚大学 Gina Cody工程与计算机科学学院, 加拿大 魁北克 蒙特利尔 H3G 1M8)

摘要: 本文针对由领航跟随控制策略协调运动的多移动机器人编队, 研究跟随机器人存在打滑状态的自适应控制器设计问题. 首先, 通过移动机器人打滑状态的运动学特性分析, 建立"距离–角度"编队控制模型. 然后, 利用径向基函数神经网络(RBF NN)对系统中由打滑引起的未知信息, 构建非线性逼近器; 并根据李雅普诺夫稳定性理论和非线性有界扰动稳定性理论, 证明了设计的嵌入了RBF NN的自适应控制器能保证闭环控制系统状态的收敛和有界. 通过分析编队误差控制模型, 可将不打滑状态视为系统的一种特殊情况, 而嵌入控制器中的RBF NN能自适应打滑和不打滑两种状态, 从而使得控制器在两种状态下均有效. 最后利用仿真研究, 验证了本文所提方法的正确性和有效性.

关键词: 机器人编队; 打滑; 未知信息; 自适应控制; 非线性参数逼近

引用格式: 彭滔, 陆群, 苏春翌. 打滑状态下的多移动机器人编队自适应控制. 控制理论与应用, 2020, 37(2): 439 – 445

DOI: 10.7641/CTA.2019.90091

Adaptive control of multiple mobile robot formation under slip condition

PENG Tao[1,3], LU Qun[2,3], SU Chun-Yi[3†]

(1. Liangjiang School of Artificial Intelligence, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224003, China;
3. Gina Cody School of Engineering and Computer Science, Concordia University, Quebec Montreal H3G 1M8, Canada)

Abstract: This paper investigates adaptive control of multiple mobile robot formation, which is coordinated by the leader-follower method, under a slip condition of the follower robot. Firstly, a 'distance-angle' formation control model is deduced by the kinematics characteristics analysis under slipping. Secondly, a radial basis function neural network (RBF NN) is used to approximate the unknown information of the control system caused by slipping, and convergence and boundedness of the system states are proved according to the Lyapunov stability theory and stability of perturbed systems. In the process of controller analysis and design, it is found that the non-slip condition can be considered a special case of the system, and the RBF NN nonlinear approximator is adaptive for the slip and non-slip, which makes that the designed controller is correct and effective for both slip and no-slip conditions. Finally, simulation studies are included to demonstrate the correctness and effectiveness of the proposed approach.

Key words: robot formation; slip; unknown information; adaptive control; nonlinear parameter approximation

Citation: PENG Tao, LU Qun, SU Chun-Yi. Adaptive control of multiple mobile robot formation under slip condition. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(2): 439 – 445

1 引言

因移动机器人编队具有广泛的应用前景, 使其在近几十年成为机器人领域中的研究热点[1–2]. 经过多年的研究, 现已形成了领航跟随法[3–5]、基于行为法[6–8]和虚拟结构法[9–10]3种最常用的控制策略, 其中领航跟随法因具有数学分析简单, 编队运动安全高效和易于形成及保持队形等优点, 已被广泛地应用于移动机器人编队的各研究领域中. 通常, 系统中会存在因噪声、扰动、摩擦、负载变化等引起的未知信息和不确定性. 为此, 研究者利用神经网络提出了许多自适应控制方法[11–13]. 这些结果, 只研究了机器人在二维平面内的运动情况. 对三维未知流场中的编队协调

收稿日期: 2019–02–20; 录用日期: 2019–06–20.
[†]通信作者. E-mail: chun-yi.su@concordia.ca; Tel.: +1 514-848-2424-3168.
本文责任编委: 宗群.
重庆市教委科学技术研究项目(KJ1709196, 2018CJ69)资助.
Supported by the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1709196, 2018CJ69).

问题, Ge等利用径向基函数神经网络(radial basis function neural networks, RBF NN), 提出了一种鲁棒自适应控制方法[14]. 在已有的研究结果中, 调用的RBF NN只更新了线性权值, 而未研究高斯函数的中心和方差这两个非线性参数的更新, 这使得中心和方差选取不当时, 将影响控制器的自适应性, 智能性和实用性.

上述研究少有考虑车轮打滑的情况, 打滑会造成机器人线速度与车轴形成一个偏离角而产生轴向和侧向速度分量, 并引发一个附加的角速度, 从而不满足非完整约束条件, 使得针对不打滑设计的控制器性能将受到极大的影响, 甚至失效. 在文献[15]中, Wang等分析了单个轮式机器人在打滑情况下的运动规律, 为后续研究打滑情况建立了模型基础. 在现有的文献中, 许多研究者为打滑状态下的单机人轨迹跟踪控制提出了多种控制方法, 而研究打滑状态下的机器人编队控制成果还较少[16–17]. 文献[17–19]对打滑情况的机器人编队, 分别运用自适应, 输入输出线性化和二阶滑模技术设计了控制器.

本文利用领航跟随法协调编队运动, 建立了"距离–角度"编队误差控制模型. 通过分析控制模型, 发现不打滑状态可视为系统的一种特殊情况, 并在该模型的基础上, 利用RBF NN设计了自适应控制器设计. 控制器中调用的RBF NN能自适应打滑和不打滑两种状态, 且对权值、中心和方差3个参数设计了在线调整的非线性更新律. 因此, 能有效地这提高控制器的自适应性, 智能性和实用性.

2 系统模型

轮式移动机器人的车轮在只滚不滑的相对运动时, 满足非完整约束条件, 其运动学模型为[20]

$$\dot q=\begin{bmatrix}\dot x\\ \dot y\\ \dot\theta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix},\tag{1}$$

其中: $q=[x\ \ y\ \ \theta]^{\mathrm T}$为位姿向量(上标T表示转置), (x,y)表示后轴中点在全局坐标系中的坐标, θ为方向角; v和ω分别为线速度和角速度.

当运动平面比较光滑或轮子受到挤压而发生变形时, 轮子会出现打滑状态, 而造成线速度v发生偏离, 并引发一个附加的偏离角速度$\omega_{\mathrm s}$. 这造成机器人不满足非完整约束条件, 使得其运动学模型变为[15]

$$\dot q=\begin{bmatrix}\dot x\\ \dot y\\ \dot\theta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}v_{\mathrm a}\cos\theta-v_{\mathrm b}\sin\theta\\ v_{\mathrm a}\sin\theta+v_{\mathrm b}\cos\theta\\ \omega+\omega_{\mathrm s}\end{bmatrix},\tag{2}$$

其中$v_{\mathrm a}$和$v_{\mathrm b}$分别是v的径向和侧向分量, 且在不打滑时有$v=v_{\mathrm a}$, 各速度关系如图1所示.

对多个移动机器人构成的机器人编队, 利用领航跟随控制策略来协调编队运动, 则可将编队分解成多组如图2所示的领航–跟随机器人对. 为了方便表示, 下文中用下标1和2分别表示领航机器人(Leader)和跟随机器人(Follower), 则领航机器人和跟随机器人的位姿分别为$q_1=[x_1\ \ y_1\ \ \theta_1]^{\mathrm T}$和$q_2=[x_2\ \ y_2\ \ \theta_2]^{\mathrm T}$. 本文研究在编队运动过程中, 领航机器人不打滑而跟随机器人存在打滑状态的编队自适应控制, 则$\dot q_1$和$\dot q_2$分别满足式(1)–(2).

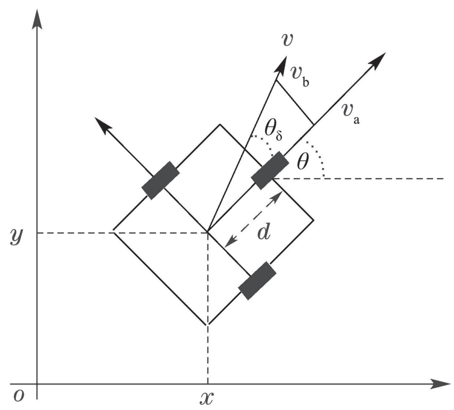

图1 机器人打滑状态的速度关系示意图

Fig. 1 Speed relationship of a robot under slipping condition

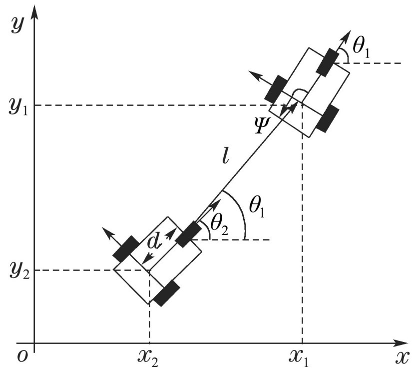

图2 领航–跟随机器人编队结构示意图

Fig. 2 Leader-Follower formation sketch

从图2中可知, 跟随机器人的位姿q_2可由领航机器人的位姿q_1及两机器人间的距离l和角度ψ唯一确定, 且l和ψ满足[20]

$$l=\sqrt{(x_1-x_2-d\cos\theta_2)^2+(y_1-y_2-d\sin\theta_2)^2},\tag{3}$$

$$\psi=\pi+\theta_l-\theta_1,\tag{4}$$

$$\theta_l=\arctan\frac{y_1-y_2-d\sin\theta_2}{x_1-x_2-d\cos\theta_2},\tag{5}$$

其中: θ_l为两机器人连线l与水平轴的夹角, d为机器人后轴到前端的距离.

因此, 编队控制目标是控制距离l和角度ψ分别收敛到期望的距离$l^{\mathrm d}$和角度$\psi^{\mathrm d}$, 即$\lim\limits_{t\to\infty}(l-l^{\mathrm d})=0$和

$\lim\limits_{t\to\infty}(\psi-\psi^{\rm d})=0$. 因此, 可以通过$l$和$\psi$表达编队控制模型.

对式(3)–(5)求导, 并根据式(1)–(2)化简可得

$$\begin{aligned}\dot l=&-v_1\cos\psi+v_{2\rm a}\cos\gamma+d\omega_2\sin\gamma+\\&v_{2\rm b}\sin\gamma+d\omega_{2\rm s}\sin\gamma,\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}\dot\psi=&\frac{1}{l}(v_1\sin\psi-v_{2\rm a}\sin\gamma+d\omega_2\cos\gamma-l\omega_1)+\\&\frac{1}{l}(v_{2\rm b}\cos\gamma+d\omega_{2\rm s}\cos\gamma),\end{aligned}\tag{7}$$

其中: $\gamma=\theta_{\rm e}+\psi,\ \theta_{\rm e}=\theta_1-\theta_2$.

注 1　因l为两机器人间的距离, 所以$l>0$.

定义编队误差$e=[l_{\rm e}\ \ \psi_{\rm e}]^{\rm T}=[l-l^{\rm d}\ \ \psi-\psi^{\rm d}]^{\rm T}$为系统控制状态量, $u=[v_{2\rm a}\ \ \omega_2]^{\rm T}$为控制输入, 则可将式(6)–(7)表示成如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix}\dot l_{\rm e}\\ \dot\psi_{\rm e}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-v_1\cos\psi+v_{2\rm a}\cos\gamma+d\omega_2\sin\gamma+v_{2\rm b}\sin\gamma+d\omega_{2\rm s}\sin\gamma\\ \frac{1}{l}(v_1\sin\psi-v_{2\rm a}\sin\gamma+d\omega_2\cos\gamma-l\omega_1)+\frac{1}{l}(v_{2\rm b}\cos\gamma+d\omega_{2\rm s}\cos\gamma)\end{bmatrix}.\tag{8}$$

注 2　在式(8)中, 因$v_{2\rm b}$和$\omega_{2\rm s}$是跟随机器人打滑所产生的, 且难以准确获知. 如果记

$$h=\begin{bmatrix}v_{2\rm b}\sin\gamma+d\omega_{2\rm s}\sin\gamma\\ \dfrac{v_{2\rm b}\cos\gamma+d\omega_{2\rm s}\cos\gamma}{l}\end{bmatrix},$$

则h为系统的未知信息, 这给控制器设计带来了挑战. 当不打滑时有$v_{2\rm b}=0$和$\omega_{2\rm s}=0$, 即$h=0$. 因此, 式(8)能通过h是否为零, 统一地表达打滑和不打滑两种情况.

3　未知信息的非线性逼近

对于系统未知信息h, 文献[21–22]中证明了RBF NN满足Stone-Weierstrass定理, 能在紧集上对任意的非线性未知函数逼近到任意精度. 文献[23]中, 证明了RBF NN有最佳逼近性质, 有

$$h=W^{*\rm T}S(z,\zeta^*,\delta^*)+\epsilon^*=W^{*\rm T}S^*+\epsilon^*,$$

其中: $z=[l\ \ \psi]^{\rm T}$; W^*, ζ^*和δ^*为最佳常值参数; ϵ^*为最佳逼近误差. 本文中, 选用高斯函数为RBF NN的激活函数$S(z,\zeta,\delta)=[s_1(z,\zeta_1,\delta_1)\ \cdots\ s_n(z,\zeta_n,\delta_n)]^{\rm T}$, 高斯函数$s_i(z,\zeta_i,\delta_i)$为

$$\begin{aligned}s_i(z,\zeta_i,\delta_i)=&\exp(-\frac{\|z-\zeta_i\|^2}{2\delta_i^2})=\\&\prod_{j=1}^{2}\exp[-\frac{(z_j-\zeta_i^j)^2}{2\delta_i^2}],\ i=1,\cdots,n.\end{aligned}$$

因为最佳常值参数W^*, ζ^*, δ^*是未知量, 不能直接应用. 因此在控制中, 用估计值$\hat W$, $\hat\zeta$, $\hat\delta$构建估计神经网络$\hat W^{\rm T}\hat S=\hat W^{\rm T}S(z,\hat\zeta,\hat\delta)$, 并记参数误差为$\tilde W=W^*-\hat W,\ \tilde\zeta=\zeta^*-\hat\zeta,\ \tilde\delta=\delta^*-\hat\delta$.

根据文献[24]中的定理1, 利用S^*在ζ^*和δ^*的泰勒展开式, 可求得未知函数h与估计神经网络$\hat W^{\rm T}\hat S$的误差为

$$\begin{aligned}&\epsilon_1=h-\hat W^{\rm T}\hat S=\\&\tilde W^{\rm T}(\hat S-S'_\zeta\hat\zeta-S'_\delta\hat\delta)+\hat W^{\rm T}(S'_\zeta\tilde\zeta+S'_\delta\tilde\delta)+\epsilon_h,\end{aligned}\tag{9}$$

其中S'_ζ和S'_δ是$S(z,\zeta,\delta)$分别对ζ和δ的微分[24], 有

$$S'_\zeta(z,\hat\zeta,\hat\delta)=[s'_{\zeta1}(z,\hat\zeta_1,\hat\delta_1)\ \cdots\ s'_{\zeta n}(z,\hat\zeta_n,\hat\delta_n)]^{\rm T},$$

$$S'_\delta(z,\hat\zeta,\hat\delta)=[s'_{\delta1}(z,\hat\zeta_1,\hat\delta_1)\ \cdots\ s'_{\delta n}(z,\hat\zeta_n,\hat\delta_n)]^{\rm T},$$

$$s'_{\zeta_i}(z,\hat\zeta,\hat\delta)=s'_{\zeta_i}(z,\hat\zeta,\hat\delta)\frac{\|z_i-\hat\zeta_i\|}{\hat\delta_i^2},$$

$$s'_{\delta_i}(z,\hat\zeta,\hat\delta)=s'_{\delta_i}(z,\hat\zeta,\hat\delta)\frac{\|z_i-\hat\zeta_i\|^2}{\hat\delta_i^3},$$

并且$|\epsilon_h|\leqslant\phi^*\varPsi$, 其中$\phi^*\in\mathbb{R}^4$是一个有界的最优常值向量, $\varPsi=[1\ \ \|\hat W\|\ \ \|\hat\zeta\|\ \ \|\hat\delta\|]^{\rm T}$.

4　控制器设计

为了在下文的控制器设计过程中表示方便, 记

$$f=\begin{bmatrix}-v_1\cos\psi\\ \dfrac{v_1\sin\psi-l\omega_1}{l}\end{bmatrix},\ g=\begin{bmatrix}\cos\gamma & d\sin\gamma\\ -\dfrac{\sin\gamma}{l} & \dfrac{d\cos\gamma}{l}\end{bmatrix},$$

由于$\det(g)=\dfrac{d}{l}\neq0$, 所以$g$是可逆矩阵, 有

$$g^{-1}=\begin{bmatrix}\cos\gamma & -l\sin\gamma\\ \dfrac{\sin\gamma}{d} & \dfrac{l\cos\gamma}{d}\end{bmatrix}.$$

为自适应系统(8)中的未知信息h, 设计如下嵌入RBF NN的自适应控制器

$$u=-g^{-1}\cdot(k_1e+f+\hat W^{\rm T}\hat S+\hat\phi^{\rm T}\varPsi{\rm sgn}\,e).\tag{10}$$

对控制器(10)中的估计参数$\hat W$, $\hat\zeta$, $\hat\delta$和$\hat\phi$, 设计如下的更新律:

$$\dot{\hat W}=k_2e(\hat S-S'_\zeta\hat\zeta-S'_\delta\hat\delta),\tag{11}$$

$$\dot{\hat\zeta}=k_3e(\hat W^{\rm T}S'_\zeta)^{\rm T},\tag{12}$$

$$\dot{\hat\delta}=k_4e(\hat W^{\rm T}S'_\delta)^{\rm T},\tag{13}$$

$$\dot{\hat\phi}=k_5|e|\varPsi,\tag{14}$$

其中: $k_i\in\mathbb{R}^{2\times2}(i=1,\cdots,5)$是正的对角形控制参数矩阵, ${\rm sgn}(\cdot)$为符号函数, $\hat\phi$为ϕ^*的估计值, 记$\tilde\phi=\phi^*-\hat\phi$.

注 3 因f和g与系统编队误差e无关, 能在控制器中直接使用, 不涉及鲁棒性.

定理 1 考虑如图2中所示的利用领航跟随法协调编队运动的多移动机器人编队, 对式(8)描述的编队运动学控制误差模型, 应用自适应控制器(10)和RBF NN参数非线性更新律(11)–(14). 当ω_1有界时, 能选择合适的控制参数$k_i(i=1,\cdots,5)$, 使得系统编队控制误差e渐近稳定和方向角误差θ_{e}有界.

证 将式(10)代入式(8), 可得

$$\dot{e}=-k_1e+h-\hat{W}^{\mathrm{T}}\hat{S}-\hat{\phi}^{\mathrm{T}}\varPsi\operatorname{sgn}e. \tag{15}$$

将式(9)代入式(15)有

$$\begin{aligned}\dot{e}=&-k_1e+\tilde{W}^{\mathrm{T}}(\hat{S}-S'_\zeta\hat{\zeta}-S'_\delta\hat{\delta})+\\&\hat{W}^{\mathrm{T}}(S'_\zeta\tilde{\zeta}+S'_\delta\tilde{\delta})+\epsilon_h-\hat{\phi}^{\mathrm{T}}\varPsi\operatorname{sgn}e.\end{aligned} \tag{16}$$

对式(16), 考虑如下的李雅普诺夫函数:

$$\begin{aligned}V(t)=&\frac{1}{2}(e^{\mathrm{T}}e+\tilde{W}^{\mathrm{T}}k_2^{-1}\tilde{W}+\tilde{\zeta}^{\mathrm{T}}k_3^{-1}\tilde{\zeta})+\\&\frac{1}{2}(\tilde{\delta}^{\mathrm{T}}k_4^{-1}\tilde{\delta}+\tilde{\phi}^{\mathrm{T}}k_5^{-1}\tilde{\phi}^{\mathrm{T}}).\end{aligned} \tag{17}$$

对式(17)两边微分, 并代入式(11)–(12)和式(16), 化简可得

$$\begin{aligned}&\dot{V}(t)=\\&e^{\mathrm{T}}\dot{e}-\tilde{W}^{\mathrm{T}}k_2^{-1}\dot{\hat{W}}-\tilde{\zeta}^{\mathrm{T}}k_3^{-1}\dot{\hat{\zeta}}-\tilde{\delta}^{\mathrm{T}}k_4^{-1}\dot{\hat{\delta}}-\tilde{\phi}^{\mathrm{T}}k_5^{-1}\dot{\hat{\phi}}=\\&-e^{\mathrm{T}}k_1e+e^{\mathrm{T}}\tilde{W}^{\mathrm{T}}(\hat{S}-S'_\zeta\hat{\zeta}-S'_\delta\hat{\delta})+\\&e^{\mathrm{T}}\hat{W}^{\mathrm{T}}(S'_\zeta\tilde{\zeta}+S'_\delta\tilde{\delta})+e^{\mathrm{T}}(\epsilon_h-\hat{\phi}^{\mathrm{T}}\varPsi\operatorname{sgn}e)-\\&\tilde{\zeta}^{\mathrm{T}}k_3^{-1}k_3e(\hat{W}^{\mathrm{T}}S'_\zeta)^{\mathrm{T}}-\tilde{\delta}^{\mathrm{T}}k_4^{-1}k_4e(\hat{W}^{\mathrm{T}}S'_\delta)^{\mathrm{T}}-\\&\tilde{W}^{\mathrm{T}}k_2^{-1}k_2e(\hat{S}-S'_\zeta\hat{\zeta}-S'_\delta\hat{\delta})-\tilde{\phi}^{\mathrm{T}}k_5^{-1}k_5|e|\varPsi=\\&-e^{\mathrm{T}}k_1e+e^{\mathrm{T}}(\epsilon_h-\hat{\phi}^{\mathrm{T}}\varPsi\operatorname{sgn}e)-|e|^{\mathrm{T}}\tilde{\phi}^{\mathrm{T}}\varPsi.\end{aligned}$$

因$e\operatorname{sgn}e=|e|$和$|\epsilon_h|\leqslant\phi^{*\mathrm{T}}\varPsi$, 有$-\phi^{*\mathrm{T}}\varPsi\leqslant\epsilon_h\leqslant\phi^{*\mathrm{T}}\varPsi$, 则$e^{\mathrm{T}}\epsilon_h-|e|^{\mathrm{T}}\phi^{*\mathrm{T}}\varPsi\leqslant 0$. 因此

$$\dot{V}(t)\leqslant-e^{\mathrm{T}}k_1e\leqslant 0.$$

当且仅当$e=0$时$\dot{V}(t)=0$, 所以系统(16)渐近稳定.

对θ_{e}有

$$\dot{\theta}_{\mathrm{e}}=\omega_1-\dot{\theta}_2, \tag{18}$$

其中

$$\dot{\theta}_2=\omega_2+\omega_{2\mathrm{s}}. \tag{19}$$

将控制器(10)中的ω_2分量代入式(19), 因为e渐近稳定, 并经过三角函数的同类项合并与简化可得

$$\begin{aligned}&\dot{\theta}_2=\\&\frac{v_1(\cos\psi^{\mathrm{d}}\sin(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}})-\sin\psi^{\mathrm{d}}\cos(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}}))}{d}-\\&\frac{\cos(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}})}{d}(l^{\mathrm{d}}W_2^{*\mathrm{T}}S^*-l^{\mathrm{d}}\omega_1)-\\&\frac{\sin(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}})}{d}W_1^{*\mathrm{T}}S^*.\end{aligned}$$

对上式利用三角函数的积化和差化简, 可得

$$\dot{\theta}_2=\beta_1\cos(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}}-\beta_2),$$

其中:

$$\begin{aligned}&\beta_1=\sqrt{k_6^2+k_7^2},\ \beta_2=\arctan\frac{k_6}{k_7},\\&k_6=\frac{v_1\cos\psi^{\mathrm{d}}-W_1^{*\mathrm{T}}S^*}{d},\\&k_7=\frac{l^{\mathrm{d}}\omega_1-v_1\sin\psi^{\mathrm{d}}-l^{\mathrm{d}}W_2^{*\mathrm{T}}S^*}{d}.\end{aligned}$$

因此有

$$\dot{\theta}_{\mathrm{e}}=\omega_1-\beta_1\cos(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}}-\beta_2), \tag{20}$$

可将ω_1视为系统(20)的扰动项, 其标称系统为

$$\dot{\theta}_{\mathrm{e}}=-\beta_1\cos(\theta_{\mathrm{e}}+\psi^{\mathrm{d}}-\beta_2). \tag{21}$$

由于标称系统(21)稳定, 且ω_1有界, 根据文献[25]中的引理9.2和引理9.3可知, 有界扰动系统(20)的解有界, 即θ_{e}有界.

注 4 在实际情况中, ω_1的有界性是容易得到保证的.

注 5 因式(8)通过h是否为零, 统一地表达了打滑和不打滑两种状态, 并且嵌入控制器(10)中的RBF NN通过非线性更新律(11)–(12)调整参数对h进行自适应, 这使得本文提出的控制方法对打滑和不打滑两种状态均有效, 在很大程度上提高了控制器的自适应性, 智能性和实用性.

5 仿真研究

本部分运用MATLAB进行仿真研究, 以验证本文所提出的控制方法的正确性和有效性.

设期望距离和角度分别为$l^{\mathrm{d}}=1\,\mathrm{m}$, $\psi^{\mathrm{d}}=120°$. 机器人的$d=0.1\,\mathrm{m}$, 领航机器人(Leader)和跟随机器人 (Follower) 的初始位姿分别为 $q_1=[5.5\,\mathrm{m}\ \ 0.5\,\mathrm{m}\ \ 90°]^{\mathrm{T}}$和$q_2=[5\,\mathrm{m}\ \ 1.5\,\mathrm{m}\ \ 60°]^{\mathrm{T}}$.

对横向打滑速度$v_{2\mathrm{b}}$和角速度$\omega_{2\mathrm{s}}$分别设置如下Case 1和Case 2, 以分别代表跟随机器人处于打滑和不打滑两种状态.

表 1 两种状态

Table 1 Two states

状态	$v_{2\mathrm{b}}/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	$\omega_{2\mathrm{s}}/(\mathrm{rad\cdot s^{-1}})$
Case 1	$0.1\cos t$	$0.1\sin t$
Case 2	0	0

在仿真研究中, 考虑了领航机器人走曲线和直线两种情况, 并通过设置$v_1=0.5\,\mathrm{m/s}$, 角速度分别为$\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$和$\omega_1=0\,\mathrm{rad/s}$来实现.

选择控制参数为 $k_1=I_2,\ k_j=0.5I_2$, 其中: $j=2,\cdots,5$, I_2为2阶单位矩阵; 编队误差初值为$e(0)=$

$[3\,\mathrm{m}\ \ 60°]^{\mathrm{T}}$; RBF NN 节点数 $n=5$, 各参数的初值利用MATLAB的RAND函数产生为

$$\hat{W}(0)=\begin{bmatrix}1.81 & 1.91 & 1.13 & 1.91 & 1.63\\ 1.10 & 1.28 & 1.55 & 1.96 & 1.96\end{bmatrix},$$

$$\hat{\zeta}(0)=\begin{bmatrix}1.16 & 1.97 & 1.96 & 1.49 & 1.80\\ 1.14 & 1.42 & 1.92 & 1.79 & 1.96\end{bmatrix},$$

$$\hat{\delta}(0)=\begin{bmatrix}1.66 & 1.04 & 1.85 & 1.93 & 1.68\end{bmatrix},$$

$$\hat{\phi}(0)=\begin{bmatrix}1.76 & 1.74 & 1.39 & 1.66\\ 1.17 & 1.71 & 1.03 & 1.28\end{bmatrix}.$$

RBF NN参数经过调整为

Case 1

$$\hat{W}=\begin{bmatrix}1.70 & 1.90 & 1.04 & 1.82 & 1.00\\ 1.27 & 1.47 & 1.88 & 1.93 & 1.56\end{bmatrix},$$

$$\hat{\zeta}=\begin{bmatrix}2.06 & 2.23 & 1.84 & 2.03 & 2.23\\ 1.53 & 1.49 & 2.18 & 2.20 & 2.21\end{bmatrix},$$

$$\hat{\delta}=\begin{bmatrix}0.62 & 0.70 & 1.02 & 0.84 & 0.88\end{bmatrix},$$

$$\hat{\phi}=\begin{bmatrix}3.31 & 7.48 & 7.91 & 5.51\\ 3.57 & 10.16 & 10.75 & 8.04\end{bmatrix}.$$

Case 2

$$\hat{W}=\begin{bmatrix}1.05 & 1.10 & 1.82 & 1.69 & 1.32\\ 1.95 & 1.03 & 1.44 & 1.38 & 1.77\end{bmatrix},$$

$$\hat{\zeta}=\begin{bmatrix}1.80 & 1.19 & 1.49 & 1.45 & 1.65\\ 1.71 & 1.75 & 1.28 & 1.68 & 1.66\end{bmatrix},$$

$$\hat{\delta}=\begin{bmatrix}1.16 & 1.12 & 1.50 & 1.96 & 1.34\end{bmatrix},$$

$$\hat{\phi}=\begin{bmatrix}1.70 & 1.58 & 2.13 & 1.62\\ 2.35 & 4.64 & 4.97 & 4.71\end{bmatrix}.$$

仿真结果如图3–10所示, 其中图3–6和图7–10分别是领航机器人走曲线和走直线的仿真效果, 各图分别是编队距离l、角度ψ、方向角误差θ_{e}随时间变化的曲线, 以及编队运动轨迹曲线.

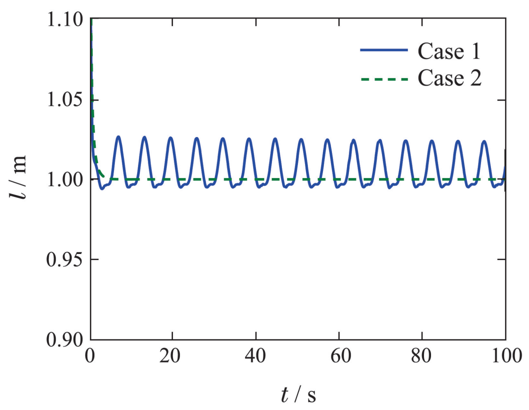

图 3　编队距离误差曲线($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

Fig. 3　Formation distance error curve ($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

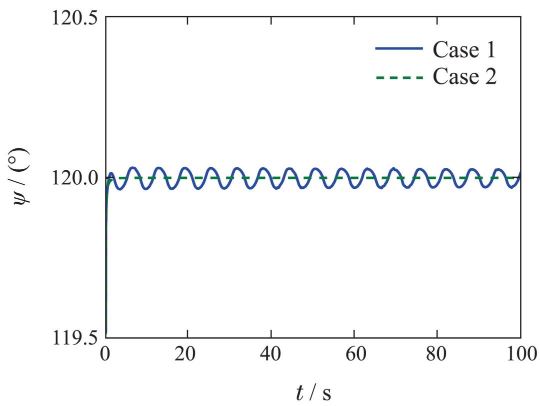

图 4　编队角度误差曲线($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

Fig. 4　Formation angle error curve ($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

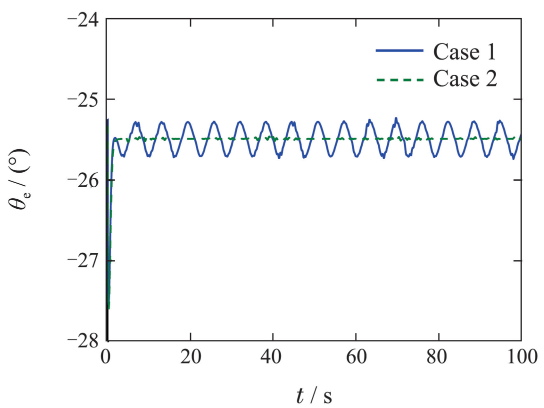

图 5　编队方向角误差曲线($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

Fig. 5　Formation direction angle error curve ($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

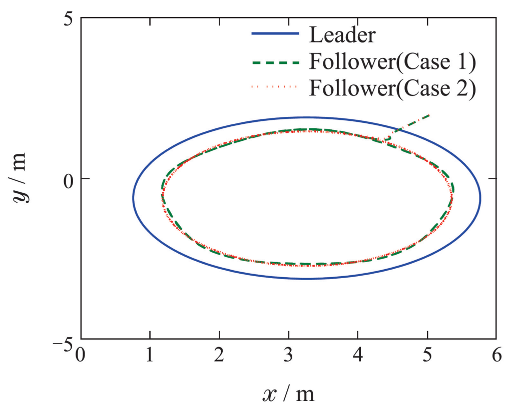

图 6　编队运动轨迹曲线($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

Fig. 6　Formation trajectory curve ($\omega_1=0.2\,\mathrm{rad/s}$)

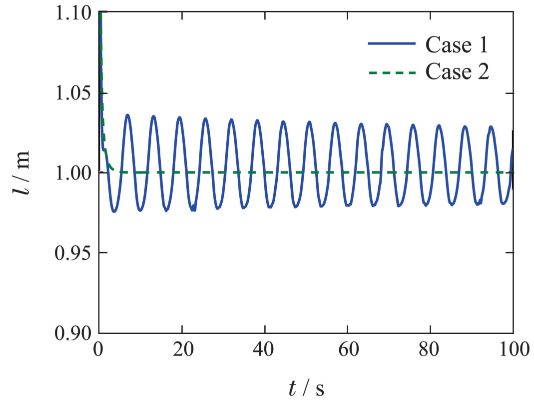

图 7 编队距离误差曲线($\omega_1 = 0$ rad/s)

Fig. 7 Formation distance error curve ($\omega_1 = 0$rad/s)

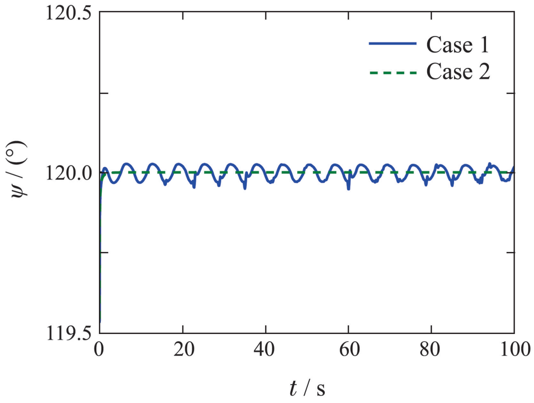

图 8 编队角度误差曲线($\omega_1 = 0$ rad/s)

Fig. 8 Formation angle error curve ($\omega_1 = 0$ rad/s)

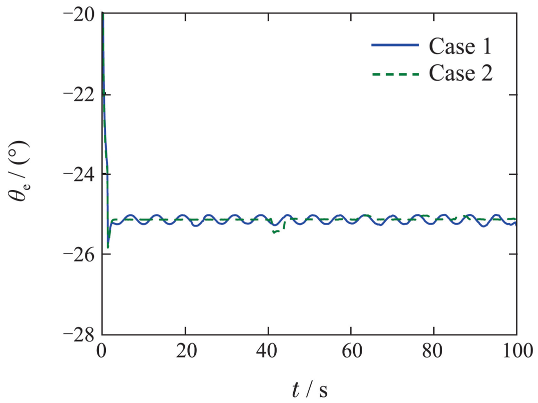

图 9 编队方向角误差曲线($\omega_1 = 0$ rad/s)

Fig. 9 Formation direction angle error curve ($\omega_1 = 0$ rad/s)

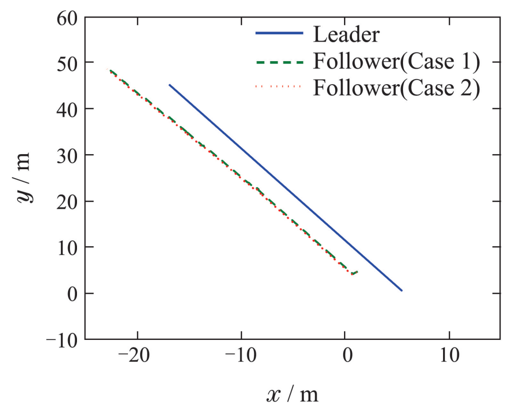

图 10 编队运动轨迹曲线($\omega_1 = 0$ rad/s)

Fig. 10 Formation trajectory curve ($\omega_1 = 0$ rad/s)

从图3–10中可以看出, 本文提出的自适应控制方法在打滑和不打滑两种情况下, 均能使编队距离l和角度ψ收敛到期望值的较小误差范围内, 并保持编队方向角误差θ_e有界, 实现编队控制目标. 分别对比图3、图4、图7和图8中Case1和Case2两条曲线, 可以看出, 在不打滑状态下, 编队距离l和角度ψ在3 s后收敛到目标值的0.01误差范围内, 并一直保持; 在打滑状态下, 编队距离l和角度ψ在5 s后收敛到目标值的0.05的误差范围内, 并一直存在振荡. 这与图6和图10中所展示的跟踪轨迹曲线吻合.

从上述分析可知, 本文提出的控制方法对打滑和不打滑两种状态, 均有很好的响应速度, 控制精度和自适应能力.

6 结论

本文针对运用领航跟随法协调编队运动的多机器人编队, 在跟随机器人打滑状态下, 依据李雅普诺夫稳定性理论设计自适应控制器和RBF NN参数非线性更新律. 因建立的控制模型能统一表达打滑和不打滑两种状态, 通过嵌入控制器中的RBF NN能自适应打滑和不打滑两种状态, 保证了闭环控制系统状态的收敛和有界, 使得控制器对打滑和不打滑两种状态均有效, 这提高了控制器的自适应性, 智能性和实用性.

因本文未考虑领航机器人存在打滑的情况, 所以为了更好地适应实际情况, 对领航机器人和跟随机器人均存在打滑的情况将在后续研究中进行.

参考文献:

[1] DONG X, YU B, SHI Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(1): 340 – 348.

[2] WANG Yintao, YAN Weisheng. Consensus formation tracking control of multiple autonomous underwater vehicle systems. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(3): 379 – 384.
(王银涛, 严卫生. 多自主水下航行器系统一致性编队跟踪控制. 控制理论与应用, 2013, 30(3): 379 – 384.)

[3] DESAI J P, OSTROWSKI J, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven: IEEE, 1998: 2864 – 2869.

[4] LORIA A, DASDEMIR J, JARQUIN N A. Leader – follower formation and tracking control of mobile robots along straight paths. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(2): 727 – 732.

[5] HERRERA D, ROBERTI F, TOIBERO M, et al. Human interaction dynamics for its use in mobile robotics: impedance control for leader-follower formation. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(4): 696 – 703.

[6] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926 – 939.

[7] KUPPAN CHETTY R M, SINGAPERUMAL M, NAGARAJAN T. Behavior based multi robot formations with active obstacle avoidance based on switching control strategy. *Advanced Materials Research*, 2012, 433(440): 6630 – 6635.

[8] QIU Huaxin, DUAN Haibin, FAN Yanming. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1298 – 1304.
(邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298 – 1304.)

[9] BENZERROUK A, ADOUANE L, MARTINET P. Stable navigation in formation for a multi-robot system based on a constrained virtual structure. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(12): 1806 – 1815.

[10] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387 – 403.

[11] DIERKS T, JAQANNATHAN S. Neural network output feedback control of robot formations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2010, 40(2): 383 – 399.

[12] ZHU Ling, LI Yandong, SUN Ming, et al. Sliding mode control of mobile robot formations based on neural networks. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(3): 113 – 118.
(朱玲, 李艳东, 孙明, 等. 移动机器人编队的神经网络滑模控制. 电机与控制学报, 2014, 18(3): 113 – 118.)

[13] PENG Tao, LIU Chengjun. Formation control of wheeled mobile robots with unknown information via deterministic learning. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(2): 239 – 247.
(彭滔, 刘成军. 含未知信息的轮式移动机器人编队确定学习控制. 控制理论与应用, 2018, 35(2): 239 – 247.)

[14] GE Y T, CHEN Y Y, WANG Q L, et al. Robust spherical formation tracking control of first-order agents with an adaptive neural flow estimate. *Proceedings of 2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. Singapore: IEEE, 2018: 556 – 561.

[15] WANG D W, LOW C B. Modeling and analysis of skidding and slipping in wheeled mobile robots: Control design perspective. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(3): 676 – 687.

[16] CHEN M. Disturbance attenuation tracking control for wheeled mobile robots with skidding and slipping. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 3359 – 3368.

[17] PARK B S, YOO S J. Adaptive leader-follower formation control of mobile robots with unknown skidding and slipping effects. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, 13(3): 587 – 594.

[18] TIAN Y, SARKAR N. Formation control of mobile robots subject to wheel slip. *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2012: 4553 – 4558.

[19] SHEN Dongbin, SUN Weijie. Multirobot formation control under slipping condition. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 30 – 35.
(申动斌, 孙伟杰. 打滑状态下的多机器人编队控制. 机械工程学报, 2012, 48(23): 30 – 35.)

[20] GHOMMAM J, MEHRJERDI H, SAAD M. Leader-follower based formation control of nonholonomic robots using the virtual vehicle approach. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2011: 516 – 521.

[21] SU C Y, STEPANENKO Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1994, 2(4): 285 – 294.

[22] PARK J, SANDBERG I W. Universal approximation using radial-basis-function networks. *Neural Computation*, 1991, 3(2): 246 – 257.

[23] GIROSI F, POGGIO T. Networks and the best approximation property. *Biological Cybernetics*, 1990, 63(3): 169 – 176.

[24] HAN H, SU C Y, STEPANENKO Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems with nonlinearly parameterized fuzzy approximators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2001, 9(2): 315 – 323.

[25] KHALIL H K. *Nonlinear Systems*. 3rd edition. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2002.

作者简介:

彭 滔 讲师, 目前研究方向为移动机器人智能控制、非线性系统的智能控制, E-mail: pt@cqut.edu.cn;

陆 群 讲师, 目前研究方向为移动机器人视觉伺服、非线性系统, E-mail: landgod1@126.com;

苏春翌 教授, 目前研究方向为智能机器人、非完整机械系统控制、非线性系统, E-mail: chun-yi.su@concordia.ca.