

轨迹跟踪级联机器人编队控制方法

韩青, 孙树栋, 智睿瑞

(西北工业大学 a. 机电学院, b. 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 提出一种轨迹跟踪级联机器人编队控制方法. 该方法有效结合距离-角度($l-\varphi$)控制和距离-距离($l-l$)控制方案, 并利用无迹卡尔曼滤波算法对 Leader-Follower 级联机器人系统的状态进行估计; 根据状态估计结果设计输入-输出动态反馈控制规律, 使得跟随机器人(Follower)准确跟踪领航机器人(Leader), 确保编队的稳定性和较快的收敛性, 并达到理想的编队控制效果. 仿真实验验证了所提出方法的可行性.

关键词: 移动机器人; 编队控制; 无迹卡尔曼滤波; 输入-输出动态反馈

中图分类号: TP24

文献标志码: A

Trajectory tracking cascade robot formation control

HAN Qing, SUN Shu-dong, ZHI Rui-rui

(a. School of Mechanical Engineering, b. Key Lab of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: HAN Qing, E-mail: hanqing@mail.nwpu.edu.cn)

Abstract: A trajectory tracking cascade formation control method for robots is proposed. The method effectively combines distance-angle($l-\varphi$) control and distance-distance($l-l$) control scheme, and the unscented Kalman filter(UKF) is employed to estimate the state of Leader-Follower' robots at all levels. The results are used for Follower-robot's movement control via the input-output dynamic feedback control law which can make the Follower-robot accurately track the Leader-robot, so that stability and fast convergence of the robot formation are ensured and the desired formation of the robots is achieved. Simulation results show the feasibility of the proposed approach.

Keywords: mobile robot; formation control; UKF; input-output dynamic feedback

0 引言

多机器人系统具有广泛的应用前景, 是近年来机器人研究的热点. 多机器人编队控制是一个典型的多机器人协调控制问题, 与单机器人系统相比, 多机器人系统在灵活性、适应性、鲁棒性方面具有更好的优越性^[1-4]. 但是, 多机器人编队控制是多机器人研究的一个难点, 尤其是多机器人级联编队控制具有很强的挑战性.

目前, 多机器人编队控制算法主要包括虚拟结构(Virtual Structure)法^[5-6]、基于行为(Behavior-based)的方法^[7]、领航-跟随(Leader-Follower)法^[8-14]等. 文献[8]提出了车式移动机器人动态编队控制方法; 文献[9]提出了一种具有鲁棒性的领航-跟随机器人编队控制方法; 文献[10]提出了适用于2个机器人距离-方位-方向控制方法和适用于3个机器人的距离-距离-

方向控制方法来解决编队控制问题; 文献[11]分析了不确定环境下多机器人的动态编队控制方法; 文献[12]针对车式移动机器人的运动学模型特点, 提出了一种基于轨迹跟踪多机器人编队的控制方法; 文献[13]针对车式移动机器人轨迹跟踪这一典型任务, 提出了一种滑模轨迹跟踪控制方法; 文献[14]利用正则坐标变换, 将误差系统转换为一个非线性串联系统, 然后利用反步法设计车式移动机器人轨迹追踪控制器, 实现了对给定目标的全局渐近追踪; 文献[15]研究了通过拉格朗日动力学建模的多机器人系统编队控制和轨迹跟踪. 上述研究大多集中于对一个领航机器人(Leader)和一个(或多个)跟随机器人(Follower)单级编队进行研究, 而对于每级都有一个(或多个)领航机器人(Leader)和一个(或多个)跟随机器人(Follower)的级联编队的研究则较少.

收稿日期: 2014-11-04; **修回日期:** 2015-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475383, 51075337).

作者简介: 韩青(1973—), 男, 博士生, 从事智能机器人、多机器人协调控制、机电一体化与机电控制技术的研究; 孙树栋(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事先进制造系统及生产调度、机器人控制等研究.

本文提出一种有效结合距离-角度 (l - φ) 控制和距离-距离 (l - l) 控制方案的级联编队控制方法. 距离-角度 (l - φ) 控制对机器人数量和编队形状没有特殊要求; 距离-距离 (l - l) 控制对噪声影响具有更好的鲁棒性且可以实现跟随机器人避碰. 该方法利用 UKF 滤波算法对 Leader-Follower 级联机器人系统状态进行估计, 利用输入-输出动态反馈来稳定编队, 以实现各级跟随机器人对其领航机器人的轨迹跟踪, 确保编队的稳定性和较快的收敛性, 达到理想的编队控制效果.

1 Leader-Follower 级联编队控制及 UKF 算法

1.1 单个移动机器人运动模型

非完整系统是一个带有速度约束的系统, 与完整约束系统相比, 其速度约束为不可积约束. 对于单个非完整约束机器人, 其运动模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \nu + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega, \quad (1)$$

约束条件为

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

其中: (x, y) 是机器人在世界坐标系中的位置坐标, θ 是机器人的方向角.

1.2 Leader-Follower 级联机器人编队运动模型

设 R_1 是 R_2 的 Leader; R_1, R_2 是 R_3 的 Leader; l, L 分别是 Follower 上标记 M 与 Leader 中心和 Follower 中心之间的距离, 为了避免各级 Leader 和 Follower 之间的碰撞, $l > L$; φ 是从 Leader 的 y 轴到 Follower 上标记 M 的观测角. R_1 的坐标位置向量是 $[x_1 \ y_1 \ \theta_1]^T$, R_2 的坐标位置向量是 $[x_2 \ y_2 \ \theta_2]^T$, R_3 的坐标位置向量是 $[x_3 \ y_3 \ \theta_3]^T$; R_1, R_2, R_3 的线速度和角速度分别是 $[\nu_1 \ \omega_1]^T, [\nu_2 \ \omega_2]^T, [\nu_3 \ \omega_3]^T$; 输入向量 $U \triangleq [\nu_2 \ \omega_2 \ \nu_3 \ \omega_3 \ \nu_1 \ \omega_1]^T$. 级联 Leader-Follower 坐标关系如图 1 所示.

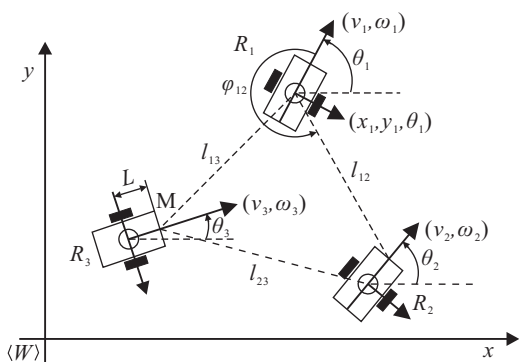


图 1 Leader-Follower 坐标关系

Leader-Follower 的方向角差值

$$\alpha_{ij} = \theta_i - \theta_j; \quad (3)$$

Leader 观测 Follower 的观测角

$$\begin{aligned} \varphi_{ij} = \\ \pi - \arctan 2(y_i - y_j - L \sin \theta_j, x_i - \\ x_j - L \cos \theta_j) - \theta_i; \end{aligned} \quad (4)$$

Leader 与 Follower 之间的距离

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j - L \cos \theta_j)^2 + (y_i - y_j - L \sin \theta_j)^2}. \quad (5)$$

γ_{ij} 定义为

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &\triangleq \varphi_{12} + \alpha_{12}, \\ \gamma_{13} &\triangleq \varphi_{13} + \alpha_{13}, \\ \gamma_{23} &\triangleq \varphi_{23} + \alpha_{23}. \end{aligned} \quad (6)$$

对式 (3)~(5) 分别求导, 并结合所定义的角度之间的关系, 得到 3 个机器人级联编队完整运动模型如下:

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} \dot{l}_{12} \\ \dot{\varphi}_{12} \\ \dot{\alpha}_{12} \\ \dot{l}_{13} \\ \dot{l}_{23} \\ \dot{\alpha}_{13} \\ \dot{\alpha}_{23} \end{bmatrix} = F(s)U = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{12} & L \sin \gamma_{12} & 0 \\ -\sin \gamma_{12} & L \cos \gamma_{12} & 0 \\ \frac{l_{12}}{l_{12}} & \frac{L \cos \gamma_{12}}{l_{12}} & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \gamma_{13} \\ -\cos \varphi_{23} & 0 & \cos \gamma_{23} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -\cos \varphi_{12} & 0 \\ 0 & \frac{\sin \varphi_{12}}{l_{12}} & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ L \sin \gamma_{13} & -\cos \varphi_{13} & 0 \\ L \sin \gamma_{23} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_2 \\ \omega_2 \\ \nu_3 \\ \omega_3 \\ \nu_1 \\ \omega_1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

简化运动模型为

$$\dot{s}_r = \begin{bmatrix} \dot{l}_{12} \\ \dot{\varphi}_{12} \\ \dot{l}_{13} \\ \dot{l}_{23} \end{bmatrix} = F(s)U =$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \cos \gamma_{12} & L \sin \gamma_{12} & 0 \\ -\sin \gamma_{12} & L \cos \gamma_{12} & 0 \\ l_{12} & l_{12} & \\ 0 & 0 & \cos \gamma_{13} \\ -\cos \varphi_{23} & 0 & \cos \gamma_{23} \end{bmatrix} \rightarrow \\ & \begin{bmatrix} 0 & -\cos \varphi_{12} & 0 \\ 0 & \frac{\sin \varphi_{12}}{l_{12}} & -1 \\ L \sin \gamma_{13} & -\cos \varphi_{13} & 0 \\ L \sin \gamma_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_2 \\ \omega_2 \\ \nu_3 \\ \omega_3 \\ \nu_1 \\ \omega_1 \end{bmatrix}. \quad (8) \end{aligned}$$

1.3 级联编队控制方案

在距离-角度 ($l-\varphi$) 控制方案中, 每个跟随机器人都有一个 Leader, 跟随机器人跟随其相应的 Leader 保持一前一后的运动. 在距离-距离 ($l-l$) 控制方案中, 跟随机器人为了确保其在编队中的位置, 必须与两个领航机器人(或者一个领航机器人和一个障碍物)保持一定的距离, 同时要求跟随机器人不位于两个领航机器人的连线上, 且要求两个领航机器人之间的距离不大于理想距离 $l_{13}^{de} + l_{23}^{de}$ 之和, 以确保跟随机器人与两个领航机器人之间满足三角形关系. 如图1所示, R_2 跟随 R_1 采用距离-角度 ($l_{12}-\varphi_{12}$) 控制方案, R_1 与 R_2 之间距离是 l_{12} , R_1 观测 R_2 角度是 φ_{12} . R_3 跟随 R_1 和 R_2 采用距离-距离 ($l_{13}-l_{23}$) 控制方案, R_1 与 R_3 之间距离是 l_{13} , R_2 与 R_3 之间距离是 l_{23} . 通过本文设计的两种控制方案的有效结合, 可以获得更多级的级联编队, 使其具有更好的应用前景.

1.4 UKF 滤波算法对 Leader-Follower 系统状态进行估计

对于基于角度观测信息的级联机器人编队控制, 角度较小的变化容易被辨识, 同时噪声会对控制效果有直接的影响, 因此选择 UKF 算法进行状态估计.

由式(7)可见, 对于距离-角度控制方案, UKF 滤波算法只需要观测 φ 和 α 角度信息, 即输出观测向量 $\mathbf{y}_{12} \triangleq [\varphi_{12} \ \alpha_{12}]^T$; 对于距离-距离控制方案, UKF 滤波算法中需要观测的角度信息更少, 仅观测 α 角度信息, 不用观测 φ , 即输出观测向量 $\mathbf{y}_{13} \triangleq [\alpha_{13}]$ 和 $\mathbf{y}_{23} \triangleq [\alpha_{23}]$.

系统输入向量为 \mathbf{U} , 输出向量为 \mathbf{y} , UKF 算法用来估计状态 s 的角度参数. 带有噪声的状态方程为

$$\dot{s} = F(s)\mathbf{U} + O, \quad (9)$$

观测方程为

$$\mathbf{y} = Ds + N. \quad (10)$$

其中: D 是输出转换矩阵, O 和 N 是零均值、协方差分别为 P_L 和 P_N 的白高斯噪声, 并假定 $s(0)$ 、 O 和 N 不相关. 对式(9)采用前向欧拉方法进行离散化处理,

采样时间为 T_c , 可得到

$$s(k+1) = \Gamma(s(k), u(k)) + T_c O, \quad (11)$$

其中 $\Gamma(s(k), u(k)) \triangleq T_c F(s)U + s(k), k \in N$.

结合文献[16-17], Leader-Follower 系统 UKF 算法如下.

Step 1: 选取 sigma 点. 取 $\{s_j, [W_j^{(m)}, W_j^{(c)}]\}_{j=0}^{6q}$ 一组 sigma 点, s_j 的均值和协方差是 \bar{s} 和 P . 对于 $\xi = 1, 2, \dots, 3q$, 有

$$S_0 = \bar{s}, \quad W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{3q + \lambda};$$

$$S_\xi = \bar{s} + (\sqrt{(3q + \lambda)P})_\xi,$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{3q + \lambda} + 1 + \delta - \alpha^2;$$

$$S_{\xi+3q} = \bar{s} - (\sqrt{(3q + \lambda)P})_\xi,$$

$$W_{\{1,2,\dots,6q\}}^{(m)} = W_{\{1,2,\dots,6q\}}^{(c)} = \frac{1}{2(3q + \lambda)}. \quad (12)$$

其中: $\lambda = \alpha^2(3q + \kappa) - 3q, \alpha \in [10^{-4}, 1], \lambda = 0$ (或 $3 - 3q$), $\delta = 2$.

Step 2: 预测.

Step 2.1: 当 $\{W_j^{(m)}, W_j^{(c)}\}_{j=0}^{6q}$ 确定时, 根据 $\{\hat{s}(k|k), P(k|k)\}$ 计算式(12)的 $S_j(k|k)$, 并根据式(9), 变换 $S_j(k|k)$ 得到

$$S_j^*(k+1|k) = \Gamma[S_j(k|k), u(k)]. \quad (13)$$

Step 2.2: 计算预测均值和方差

$$\hat{s}(k+1|k) = \sum_{j=0}^{6q} W_j^{(m)} S_j^*(k+1|k), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P(k+1|k) = & \sum_{j=0}^{6q} W_j^{(c)} \{S_j^*(k+1|k) - \\ & \hat{s}(k+1|k)\} \{S_j^*(k+1|k) - \hat{s}(k+1|k)\}^T + P_L. \end{aligned} \quad (15)$$

Step 2.3: 计算预测观测点. 根据 $\{\hat{s}(k+1|k), P(k+1|k)\}$ 计算式(12)的 $S_j(k+1|k)$, 并定义预测点为

$$Y_j(k+1|k) = DS_j(k+1|k). \quad (16)$$

Step 2.4: 计算预测观测值

$$\hat{y}_j(k+1|k) = \sum_{j=0}^{6q} W_j^{(m)} Y_j(k+1|k). \quad (17)$$

Step 2.5: 更新协方差和关联矩阵

$$\begin{aligned} P_{yy}(k+1|k) = & \sum_{j=0}^{6q} W_j^{(c)} \{Y_j(k+1|k) - \\ & \hat{y}(k+1|k)\} \{Y_j(k+1|k) - \hat{y}(k+1|k)\}^T + P_N, \end{aligned} \quad (18)$$

$$P_{sy}(k+1|k) = \sum_{j=0}^{6q} W_j^{(c)} \{S_j(k+1|k) -$$

$$\hat{s}(k+1|k)\{Y_j(k+1|k) - \hat{y}(k+1|k)\}^T. \quad (19)$$

Step 3: 校正.

$$\hat{s}(k+1|k+1) =$$

$$\hat{s}(k+1|k) + K(k+1)[y(k+1) - \hat{y}(k+1|k)], \quad (20)$$

$$P(k+1|k+1) =$$

$$P(k+1|k) - K(k+1)P_{yy}(k+1|k)K(k+1)^T, \quad (21)$$

其中 $K(k+1) = P_{sy}(k+1|k)P_{yy}^{-1}(k+1|k)$.

2 输入-输出动态反馈控制规律

2.1 输入-输出动态反馈控制

为了设计输入-输出动态反馈控制,对式(8)的状态方程进行变形,得到如下与其等价的公式:

$$\dot{s}_r = M(s)U_1 + N(s)U_{2,3}, \quad (22)$$

并对 $\alpha_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 两边求导,得到

$$\dot{\alpha}_{12} = \omega_1 - \omega_2, \quad \dot{\alpha}_{13} = \omega_1 - \omega_3, \quad \dot{\alpha}_{23} = \omega_2 - \omega_3. \quad (23)$$

其中: $M(s)^{4 \times 2}$ 和 $N(s)^{4 \times 4}$ 分别为式(8)中的 F 从第 5 列开始的子矩阵和从第 1 列开始的子矩阵, $s_r = [l_{12} \ \varphi_{12} \ l_{13} \ l_{23}]^T$.

借鉴文献[18]I/O 标准线性化技术和文献[19]的方法,提出应用于级联机器人编队控制的输入-输出动态反馈控制规律

$$U_{2,3} \triangleq [v_2 \ \omega_2 \ v_3 \ \omega_3]^T = N^{-1}(s)(C - M(s)U_1); \quad (24)$$

$$C = -K(s_r - s_r^{\text{ide}}), \quad K = \text{diag}[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]. \quad (25)$$

其中: C 是辅助控制变量,控制增益 $k_1, k_2, k_3, k_4 > 0$, $s_r^{\text{ide}} = [l_{12}^{\text{ide}} \ \varphi_{12}^{\text{ide}} \ l_{13}^{\text{ide}} \ l_{23}^{\text{ide}}]^T$, 上标“ide”指理想值. 将式(24)代入(22)并结合(23),得到简化的闭环运动学方程式

$$\dot{s}_r = C = -K(s_r - s_r^{\text{ide}}) = \begin{bmatrix} k_1(l_{12}^{\text{ide}} - l_{12}) \\ k_2(\varphi_{12}^{\text{ide}} - \varphi_{12}) \\ k_3(l_{13}^{\text{ide}} - l_{13}) \\ k_4(l_{23}^{\text{ide}} - l_{23}) \end{bmatrix},$$

$$\dot{\alpha}_{12} = \omega_1 - \omega_2, \quad \dot{\alpha}_{13} = \omega_1 - \omega_3, \quad \dot{\alpha}_{23} = \omega_2 - \omega_3. \quad (26)$$

2.2 闭环系统稳定性分析

系统(26)是稳定的,输出向量 s 以较快的速度收敛于 s_r^{ide} . 完整的稳定性分析还需对方向角 α_{ij} 进行分析.

定理 1 设 $\nu_i > 0, |\omega_i| < \omega_{\max}$, 初始相对角度有界且不等于 $\pm\pi$, 即 $|\alpha_{ij}(0)| < c_k\pi, c_k < 1$, 控制输入(24)和(25)用来稳定系统(22)和(23), s_r 指数收敛到 s_r^{ide} .

证明 系统误差 $e = [e_l \ e_\varphi \ e_\alpha]^T, e_l = l_{ij}^{\text{ide}} - l_{ij}, e_\varphi = \varphi_{ij}^{\text{ide}} - \varphi_{ij}, e_\alpha = \alpha_{ij}$. 根据式(26), e_l, e_φ 指数收敛到 0.

下面证明方向角误差 $e_\alpha = \theta_i - \theta_j$. 经过一系列代数运算,可得到

$$\dot{e}_\alpha = -\frac{\nu_i}{L} \sin e_\alpha + \sigma_1(\omega_i, e_l, e_\varphi, e_\alpha), \quad (27)$$

$$\sigma_1(\omega_i, e_l, e_\varphi, e_\alpha) =$$

$$\omega_i \left(1 - \frac{l_{ij}}{L} \cos(e_\alpha + \varphi_{ij})\right) -$$

$$\frac{1}{L} (k_1 e_l \sin(e_\alpha + \varphi_{ij}) + k_2 e_\varphi l_{ij} \cos(e_\alpha + \varphi_{ij})). \quad (28)$$

对于标称系统,满足 $\sigma_1(t, e_\alpha) = 0$, 得到

$$\dot{e}_\alpha = -\frac{\nu_i}{L} \sin e_\alpha.$$

当 $\nu_i > 0, \|e_\alpha\| < \pi$ 时, $\dot{e}_\alpha = -\frac{\nu_i}{L} \sin e_\alpha$ 局部性指数稳定.

因为 ν_i 有界,从而得到 $\|\sigma_1(t, e_\alpha)\| < \delta_1$. 根据扰动系统稳定性理论^[18], 加上条件 $|\alpha_{ij}(0)| < c_k\pi$, 鉴于文献[20], 对于有限时间 t_1 和正数 ε_1 , 可得到 $\|e_\alpha(t)\| < \varepsilon_1, \forall t \geq t_1$. \square

3 实验验证

本文通过 3 个 Pioneer-3at 机器人组成的 Leader-Follower 级联编队来验证上述算法的有效性. Pioneer-3at 机器人具有激光雷达、全景相机、声呐、红外等传感器,很容易获取角度和距离信息.为了使仿真更为真实,利用功能强大的 Webots 7 搭建 3D 仿真平台,能够精确地模拟真实环境,也可以将仿真数据导入 Matlab 中进行研究分析.实验仿真场景如图 2 所示, R_1 是 R_2 的 Leader, R_1, R_2 是 R_3 的 Leader.

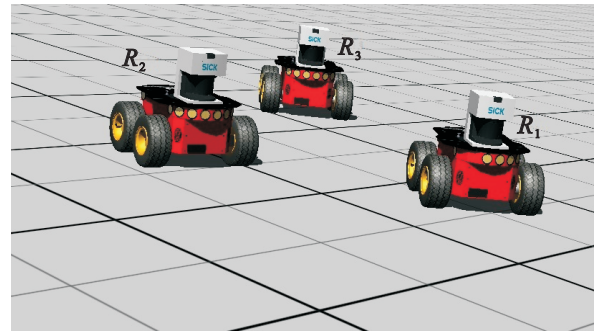


图 2 移动机器人仿真场景

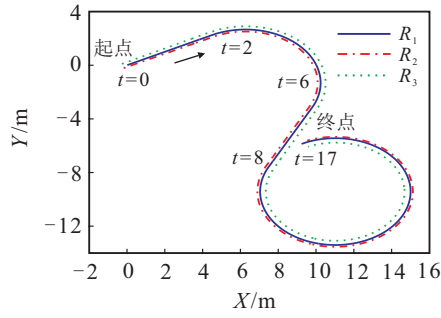
Leader-Follower 级联机器人编队经过分段直线-曲线组合轨迹 1 和 8 字形轨迹 2 及螺旋形轨迹 3, 仿真实验效果如图 3~图 5 所示.

3.1 初始条件

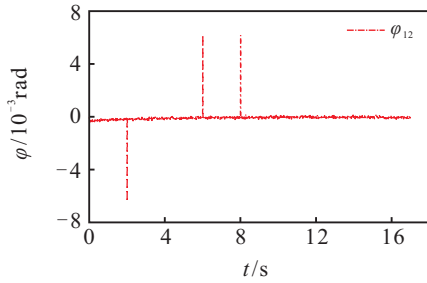
机器人编队经过直线-曲线组合的轨迹 1 时, Leader (R_1) 线速度和角速度分别为

$$\nu_1(t) = 2.5 \text{ m/s};$$

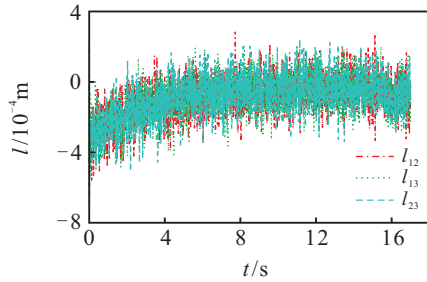
$$\omega_1(t) = \begin{cases} 0 \text{ rad/s}, & t \in \{[0, 2), (6, 8]\}; \\ -\pi/5 \text{ rad/s}, & t \in [2, 6]; \\ \pi/5 \text{ rad/s}, & t \in (8, 17]. \end{cases}$$



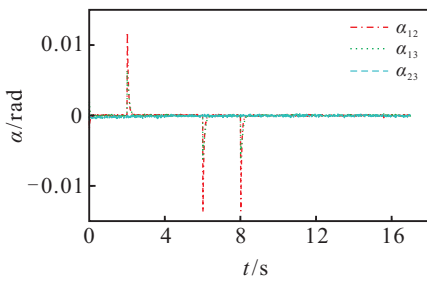
(a) 机器人轨迹 1



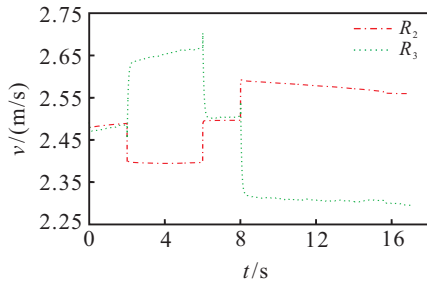
(b) 观测角误差与时间的关系



(c) 距离误差与时间的关系

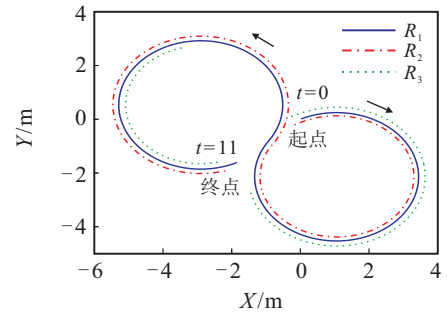


(d) 方向角误差与时间的关系

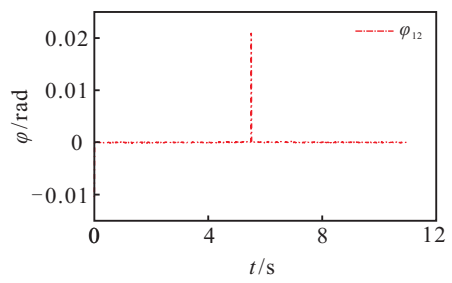


(e) R_2, R_3 的速度与时间的关系

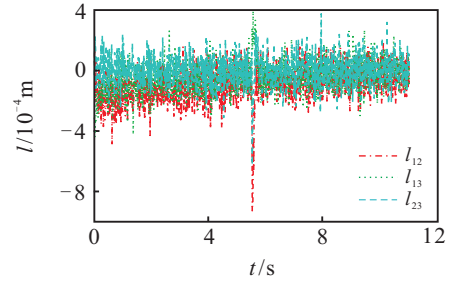
图3 仿真结果 1



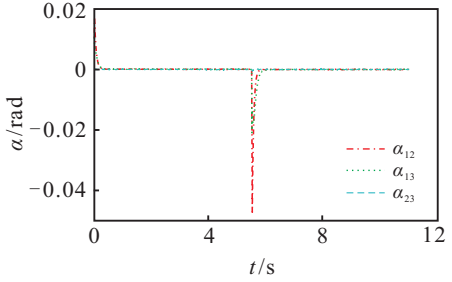
(a) 机器人轨迹 2



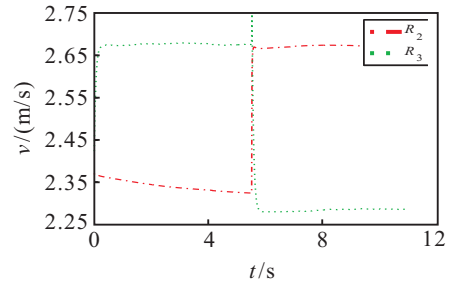
(b) 观测角误差与时间的关系



(c) 距离误差与时间的关系



(d) 方向角误差与时间的关系



(e) R_2, R_3 的速度与时间的关系

图4 仿真结果 2

机器人编队经过8字形轨迹2时, Leader (R_1) 线速度和角速度分别为

$$\begin{aligned} \nu_1(t) &= 2.5 \text{ m/s}; \\ \omega_1(t) &= \begin{cases} -\pi/3 \text{ rad/s}, & t \in [0, 5.5]; \\ \pi/3 \text{ rad/s}, & t \in [5.5, 11]. \end{cases} \end{aligned}$$

机器人编队经过螺旋轨迹3时, Leader (R_1) 线速

度和角速度是时间 t 的函数, $\nu_1(0) = 2.5 \text{ m/s}$.

R_1, R_2, R_3 初始位置及方向角分别为

$$\begin{aligned} [x_1(0) \ y_1(0) \ \theta_1(0)]^T &= [0.0 \ 0.0 \ 0.4636]^T, \\ [x_2(0) \ y_2(0) \ \theta_2(0)]^T &= [-0.2 \ -0.223 \ 0.4636]^T, \\ [x_3(0) \ y_3(0) \ \theta_3(0)]^T &= [-0.285 \ -0.09 \ 0.4636]^T. \end{aligned}$$

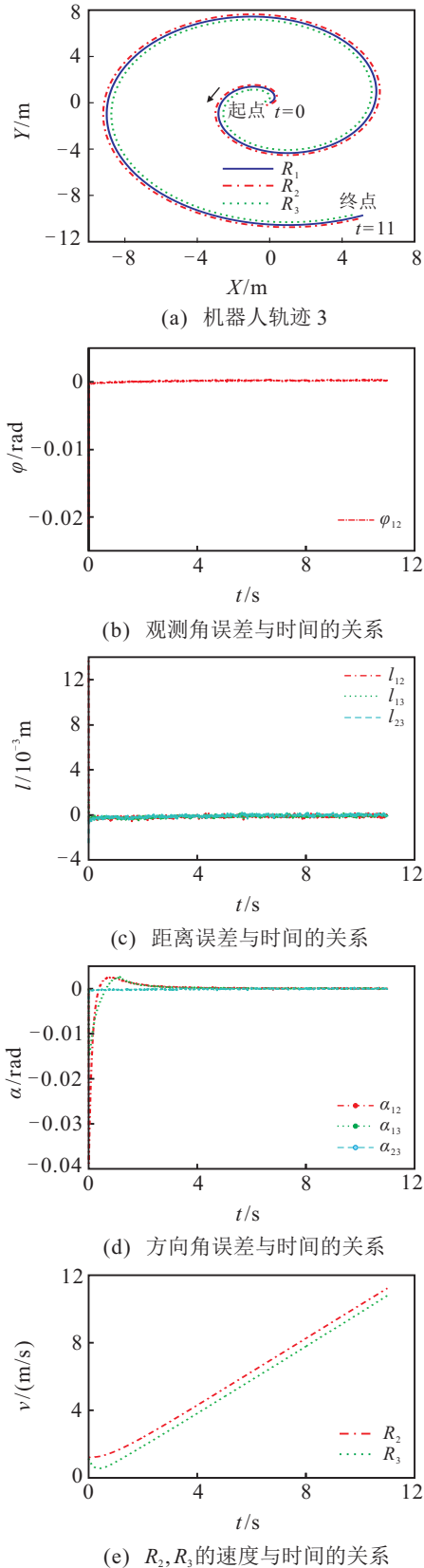


图5 仿真结果3

UKF 和反馈控制相关参数如下:

$$s = [0.261 \quad 2.183 \quad 0.261 \quad 0.261]^T,$$

$$s^{\text{ide}} = [0.3 \quad 5\pi/4 \quad 0.3 \quad 0.3], \quad h = 0.9186 \times 10^{-4} \text{ rad}^2,$$

$$k_1 = 0.15, \quad k_2 = 0.08, \quad k_3 = 0.15, \quad k_4 = 0.08,$$

$$T_c = 0.01 \text{ s}, \quad P_L = \text{diag}([h \quad h]), \quad P_N = \text{diag}([h \quad h]),$$

$$L = 0.15 \text{ m}, \quad P = ([1.13 \quad 1.13]).$$

在开始瞬间, 机器人需要调整初始位姿到理想位姿, 误差相对较大, 对于编队正常运动没有影响, 所以在各种仿真分析时未考虑初始时刻。

3.2 仿真分析

1) 轨迹 1.

从图3(a)可见: 有效结合 $(l-\varphi)$ 和 $(l-l)$ 级联编队控制方案, 使 R_1, R_2, R_3 沿直线-曲线组合轨迹 1 运动时, 保持了比较理想的编队。

从图3(b)可见: 级联机器人编队沿轨迹 1 运动时, 观测角度 φ 误差几乎是零; 在运动方向突然发生变化时, 最大误差是 -0.006417 。

从图3(c)可见: 级联机器人编队在沿着轨迹 1 运动时, 距离误差非常小, 达到 10^{-4} 数量级, 几乎是零。

从图3(d)可见: 机器人编队沿轨迹 1 运动时, 方向角 α 误差很小, 几乎是零; 在运动方向发生突然变化时, 最大误差是 -0.01372 。

从图3(e)可见: 级联机器人编队沿轨迹 1 运动时, 一直沿着直线或曲线运动, 速度变化不大, 但当运动轨迹发生变化时, 速度的方向和大小变化比较明显; 沿着直线轨迹运行时, 跟随机器人的速度接近领航机器人的初始速度。

2) 轨迹 2.

从图4(a)可见: 有效结合 $(l-\varphi)$ 和 $(l-l)$ 级联编队控制方案, 使 R_1, R_2, R_3 沿轨迹 2 运动时, 保持了比较理想的编队。

从图4(b)可见: 级联机器人编队沿轨迹 2 运动时, 观测角度 φ 误差几乎是零; 在运动方向突然发生变化时, 最大误差是 -0.02107 。

从图4(c)可见: 级联机器人编队在沿着轨迹 2 运动时, 距离误差非常小, 达到 10^{-4} 数量级, 几乎是零。

从图4(d)可见: 机器人编队沿着轨迹 2 运动时, 方向角 α 误差几乎是零; 在运动方向突然发生变化时刻, 最大误差是 -0.0472 。

从图4(e)可见: 级联机器人编队沿轨迹 2 运动, 当运动方向发生比较大的变化时, 速度的方向和大小变化比较明显; 跟随机器人在领航机器人的内侧运行时, 速度小于领航机器人的初始速度, 在领航机器人的外侧运行时, 速度大于领航机器人的初始速度。

3) 轨迹 3.

从图5(a)可见: 有效结合 $(l-\varphi)$ 和 $(l-l)$ 级联编队控制方案, 使 R_1, R_2, R_3 沿轨迹 3 运动时, 保持了比较理想的编队。

从图5(b)可见: 级联机器人编队沿轨迹 3 运动时, 观测角度 φ 的误差几乎是零。

从图5(c)可见: 级联机器人编队在沿着轨迹3运动时, 距离误差非常小, 达到 10^{-3} 数量级, 几乎是零.

从图5(d)可见: 级联机器人编队沿着轨迹3运动时, 方向角 α 误差收敛速度比较快, 在 $t = 3\text{s}$ 时刻几乎收敛到零.

从图5(e)可见: 级联机器人编队沿轨迹3运动时, 跟随机器人速度呈现增大趋势.

4 结 论

本文提出了一种有效结合距离-角度($l-\varphi$)控制和距离-距离($l-l$)控制方案的轨迹跟踪级联机器人编队控制方法. 应用UKF算法对轨迹跟踪级联机器人编队系统的状态进行估计, 并设计了输入-输出动态反馈控制规律稳定编队. 仿真结果表明, 多个机器人能快速形成级联编队, 并以很小的误差做复杂轨迹运动, 保证了机器人轨迹跟踪的准确性和稳定性, 保持了比较理想的编队. 后续研究将包括实现多机器人队形变换实现及避障方法.

参考文献(References)

- [1] Gustavi T, Hu X. Observer-based leader-following formation control using on board sensor information[J]. IEEE Trans on Robotics, 2008, 24(6): 1457-1462.
- [2] Tanner H G, Piovessan J L. Randomized receding horizon navigation[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(11): 2640-2644.
- [3] Peng Z, Wen G, Rahmani A. Leader-follower formation control of multiple nonholonomic robots based on backstepping[C]. The 28th Symposium on Applied Computing. Coimbra Portugal, 2013: 211-216.
- [4] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
(Tan M, Wang S. Research progress on robotics[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 963-972.)
- [5] Lewis M A, Tan K. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4): 387-403.
- [6] Ren W, Beard R W. Formation feedback control for multiple spacecraft via virtual structures[J]. IEEE Proc of Control Theory Application, 2004, 151(3): 357-368.
- [7] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [8] 张瑞雷, 李胜, 陈庆伟. 车式移动机器人动态编队控制方法[J]. 机器人, 2013, 35(6): 651-656.
(Zhang R L, Li S, Chen Q W. Dynamic formation control for car-like mobile robots[J]. Robot, 2013, 35(6): 651-656.)
- [9] Biglarbegian M. A novel robust leader-following control design for mobile robots[J]. J of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 71(3): 391-402.
- [10] Chen J, Sun D, Yang J, et al. Leader-follower formation control of multiple non-holonomic mobile robots incorporating a receding-horizon scheme[J]. The Int J of Robotics Research, 2010, 29(6): 727-747.
- [11] 杨丽, 曹志强, 谭民. 不确定环境下多机器人的动态编队控制[J]. 机器人, 2010, 32(2): 283-288.
(Yang L, Cao Z Q, Tan M. Dynamic formation control for multiple robots in uncertain environments[J]. Robot, 2010, 32(2): 283-288.)
- [12] 王保防, 张瑞雷, 李胜, 等. 基于轨迹跟踪车式移动机器人编队控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(1): 176-180.
(Wang B F, Zhang R L, Li S, et al. Formation control for car-like mobile robots based on trajectory tracking[J]. Control and Decision, 2015, 30(1): 176-180.)
- [13] 曹政才, 赵应涛, 付宜利. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2012, 40(4): 632-635.
(Cao Z C, Zhao Y T, Fu Y L. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 632-635.)
- [14] 李胜, 马国梁, 胡维礼. 基于Backstepping方法的车式移动机器人轨迹追踪控制[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35(2): 248-252.
(Li S, Ma G L, Hu W L. Tracking control of car-like mobile robot based on Backstepping[J]. J of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(2): 248-252.)
- [15] Mastellone S, Mejía J S, Stipanović D M, et al. Formation control and coordinated tracking via asymptotic decoupling for Lagrangian multi-agent systems[J]. Automatica, 2011, 47(11): 2355-2363.
- [16] Wan E A, Van Der Merwe R. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation[C]. Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium. Lake Louise: IEEE, 2000: 153-158.
- [17] Mariottini G L, Morbidi F, Prattichizzo D, et al. Leader-follower formations: Uncalibrated vision-based localization and control[C]. Robotics and Automation, 2007 IEEE Int Conf. Automat: IEEE, 2007: 2403-2408.
- [18] Slotine J J E, Li W. Applied nonlinear control[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1991: 207-265.
- [19] Das A K, Fierro R, Kumar V, et al. A vision-based formation control framework[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 813-825.
- [20] Fierro R, Song P, Das A, et al. Cooperative control of robot formations[C]. Cooperative Control and Optimization. Netherlands: Kluwer, 2002: 73-93.

(责任编辑: 曹洪武)