

纵向打滑状态下的轮式移动机器人编队控制

王保防,张瑞雷,郭 健,陈庆伟

(南京理工大学自动化学院,江苏南京 210094)

摘 要: 针对轮式移动机器人车轮纵向打滑时的编队控制问题,提出一种基于滑移率补偿和模糊逻辑的多机器人编队控制器设计方法.首先,利用速度传感器获取机器人的实际速度信息,并进行滤波减少传感器噪声.结合速度输入指令信号得到滑移率估计值,用以描述机器人纵向打滑的程度.然后根据领航跟随法,设计补偿纵向打滑的编队控制策略,并采用模糊逻辑设计控制器参数.最后在 Microsoft Robotics Developer Studio 4 (MRDS4)中搭建 3D 物理仿真平台,进行编队控制仿真,验证了领航、跟随机器人发生打滑的情况下所提方法的有效性.

关键词: 轮式移动机器人;纵向打滑;模糊控制;编队控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)01-0206-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.01.028

Formation Control for Car-Like Mobile Robots Under Slip Conditions

WANG Bao-fang, ZHANG Rui-lei, GUO Jian, CHEN Qing-wei

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: For the formation control problem of the car-like mobile robot with longitudinal slip, a formation control algorithm is proposed based on the compensation of slip ratio and fuzzy logic. Firstly, the real velocity of the robot is acquired by sensors. And decrease the noise through filtering. Then the real velocity is compared with the input velocity signal to get the estimation of slip ratio, which represents the degree of slip. According to the leader-follower method, a formation control strategy with compensation of slip ratio is designed, and fuzzy logic is adapted to design controller parameters. Finally, simulations are designed in the Microsoft Robotics Developer Studio 4. The simulation results show the effectiveness of the presented method in many situations when the leading or following robot slips.

Key words: car-like mobile robot; longitudinal slip; fuzzy control; formation control

1 引言

近几年来,随着机械、电子、传感器、驱动与控制等多个领域的迅速发展,机器人行业越来越受到人们的关注,多机器人编队控制逐渐成为研究的热点^[1].多机器人系统与单机器人相比具有更高的工作效率和稳定性,因此多机器人编队控制在运输、侦查、救援、扫雷和地理勘测等众多领域有广阔的应用前景.

目前,轮式移动机器人编队研究领域的绝大多数文献都使用了机器人车轮“纯滚动无滑动”的假设条件^[2-4].然而,在实际环境中,路面结冰、车轮沾水、沙地行驶、轮胎纹理磨损等多种原因,经常导致车轮发生一定程度的空转,致使轮式移动机器人产生滑动,不能满足假设条件.因此,需要对打滑状态下的轮式移动机

人编队控制进行研究.

滑移率是指车轮运动中滑动成分所占的比例,路面附着系数是指附着力与车轮法向压力的比值,附着系数越大,可利用的附着力越大,越不容易打滑^[5].在车辆工程领域,已经有许多对滑移率和路面附着系数研究的文献.文献[6]对汽车行业研究领域常用的路面附着系数的识别方法进行了介绍,并给出了路面附着系数与滑移率之间的关系曲线.文献[7]介绍了近年来汽车行驶状态参数估计的研究进展,指出了利用车上已有的传感器获得汽车行驶状态信息进行路面附着系数估计的必要性.由此可知,路面附着系数和滑移率与路面和车轮的状态有关,一般不可预知.

对打滑状态下轮式移动机器人轨迹跟踪以及编队控制的研究已经从多方面展开.文献[8]针对车轮存在

纵向打滑的轨迹跟踪问题,利用 LMI 的方法设计了控制器.文献[9]提出了轮子发生纵向和侧向滑动的两轮差动机器人运动学模型,测试了其能控性.文献[10]将与滑移率有关的参数设为未知参数,通过自适应方法进行在线辨识,并设计了自适应轨迹跟踪控制器.文献[11]提出了纵向打滑条件下,两轮差动机器人的二阶滑模控制方法.文献[12]研究了侧向滑动影响下,轮式移动机器人的离散时间滑模控制方法.上述文献中,通常在滑移率参数慢时变或者定常的假设条件下进行仿真,对提出的算法进行了验证.文献[13]利用多种传感器获取存在打滑的轮式移动机器人的精确位姿信息,并设计了轨迹跟踪控制控制器,避免了不连续参数难以进行参数在线辨识的问题,但其使用了高精度的传感器来获取机器人的精确位姿信息,成本较高.

本文针对纵向打滑情况下轮式移动机器人的编队控制问题,结合文献[7]中利用车上已有传感器估计滑移率的思想,解决高精度传感器成本高的问题,并避免自适应控制等方法在参数辨识的过程中需要满足滑移率慢时变条件的难题.利用速度传感器的输出,经过滤波后得到滑移率估计值,采用领航跟随法,进行速度补偿,设计模糊编队控制器,实现轮式移动机器人的编队控制.应用 MRDS 设计三维物理仿真,验证所提方法的有效性.

2 问题描述

2.1 轮式移动机器人数学模型

轮式移动机器人的运动学示意图如图 1 所示,前轮可绕垂直于地面的轴转动,后轮与运动方向保持一致, l 表示前后轮轴间距,机器人的位姿向量为 $\boldsymbol{p} = [x, y, \theta]^T$.其中, $[x, y]^T$ 为后轮轮轴中心坐标, θ 为车身方向与 x 轴方向的夹角, $[v, \phi]^T$ 是机器人的控制输入, v 为后轮前进速度, ϕ 为前轮转动角度,顺时针方向为正.在车轮纯滚动无滑动条件下,即滑移率为 0,轮式移动机器人的运动学模型如下^[14,15]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = v \tan \phi / l \end{cases} \quad (1)$$

2.2 纵向滑移率

轮式机器人在实际环境中行驶,遇到湿滑路面、沙土路面,或者轮胎纹理受到磨损等多种情况时均会导致机器人发生纵向打滑;而转弯速度过快,横向受力大于路面附着力时,则会产生横向打滑.由于轮式移动机器人纵向打滑的情况比较普遍,故本文中只对纵向打滑的情况进行研究,纵向滑移率与附着系数之间的关系曲线如图 2 所示^[6],本文只考虑滑移率 $\leq 20\%$ 的稳定情况,不稳定的情况可控性低不予考虑.

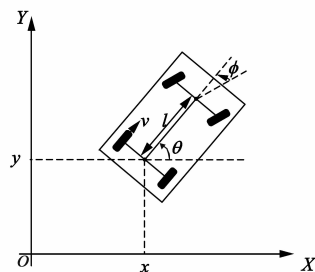


图1 轮式移动机器人结构示意图

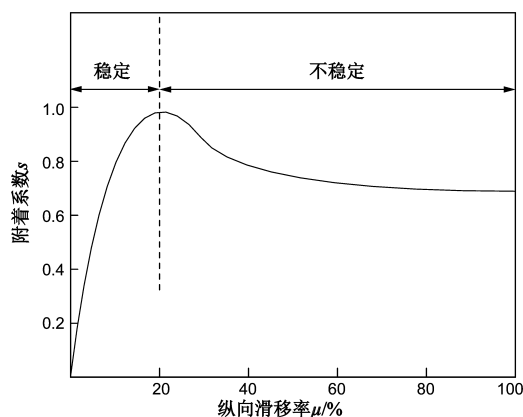


图2 纵向滑移率与附着系数之间的关系曲线

由于路面粗糙度和干湿状况无法预测,所以路面附着系数 s 是可突变且无规律的变量,结合上述 $\mu - s$ 曲线的关系,可知滑移率 μ 也是无规律变化的.

$$\mu = \frac{v^* - v}{v}, \quad v^* = \omega R \quad (2)$$

式(2)为滑移率计算公式^[5],其中 v 是机器人移动的实际速度, v^* 是车轮纯滚动条件下的期望速度,其大小等于车轮转动的角速度与车轮半径的乘积.由式(2)和式(1)可得,纵向打滑条件下轮式移动机器人的运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v^* \cos \theta / (1 + \mu) \\ \dot{y} = v^* \sin \theta / (1 + \mu) \\ \dot{\theta} = v^* \tan \phi / (l + l\mu) \end{cases} \quad (3)$$

2.3 编队队形位姿误差动态模型

采用领航跟随法,跟随机器人通过对比自身与相应虚拟机器人的位置姿态信息,来确定是否移动,当两者状态信息达到一致时,可形成设定的编队队形,以典型三角形编队为例,如图 3 所示.

图 3 中 R_L 为领航机器人, R_{F1} 和 R_{F2} 为跟随机器人, R_V 是 R_{F1} 要跟随的虚拟机器人. R_V 的位置和姿态信息 $[x_V, y_V, \theta_V]^T$ 可以根据领航者 R_L 和队形参数 $[\rho, \varphi]^T$ 确定^[16],即:

$$\begin{cases} x_V = x_L - \rho \cos(\theta_L + \varphi) \\ y_V = y_L - \rho \sin(\theta_L + \varphi) \\ \theta_V = \theta_L \end{cases}, \quad \begin{cases} v_V = v_L \\ \varphi_V = \varphi_L \end{cases} \quad (4)$$

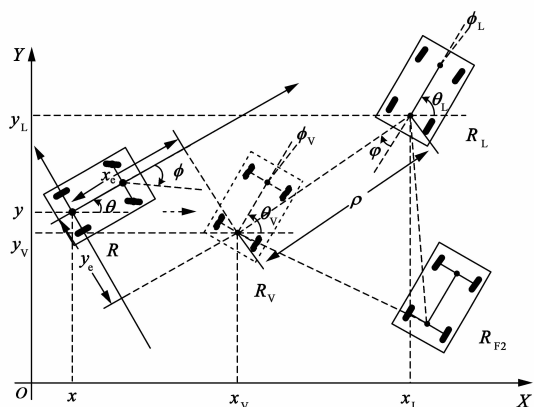


图3 轮式移动机器人三角形编队

对 R_{F1} 与 R_V 间的位姿误差 $e^* = [x_v - x, y_v - y, \theta_v - \theta]^T$ 进行坐标变换, 得到机器人 R_{F1} 坐标系下的误差向量 $e = [x_e, y_e, \theta_e]^T$ 如下所示:

$$e = Te^*, \quad T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对式(5)误差 e 求导, 并将式(3)代入, 可得领航以及跟随机器人存在纵向打滑的情况下的误差系统, 如下:

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} v_v^* \cos\theta_e / (1 + \mu_L) + v^* y_e \tan\phi / (l + l\mu_F) \\ -v^* / (1 + \mu_F) \\ v_v^* \sin\theta_e / (1 + \mu_L) - v^* x_e \tan\phi / (l + l\mu_F) \\ v_v^* \tan\phi_v / (l + l\mu_L) - v^* \tan\phi / (l + l\mu_F) \end{bmatrix} \quad (6)$$

至此, 已得到平坦地形下的编队误差动态模型式(6). 而在实际环境中, 存在上坡和下坡的起伏地形情况更加常见且更容易产生打滑, 故此处选取标准斜坡环境为例进行分析, 如图4所示. 斜坡上, 存在纵向打滑的机器人的运动学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v^* \cos\alpha \cos\theta / (1 + \mu) \\ \dot{y} = v^* \cos\alpha \sin\theta / (1 + \mu) \\ \dot{z} = v^* \sin\alpha / (1 + \mu) \\ \dot{\theta} = v^* \tan\phi / (l + l\mu) \end{cases} \quad (7)$$

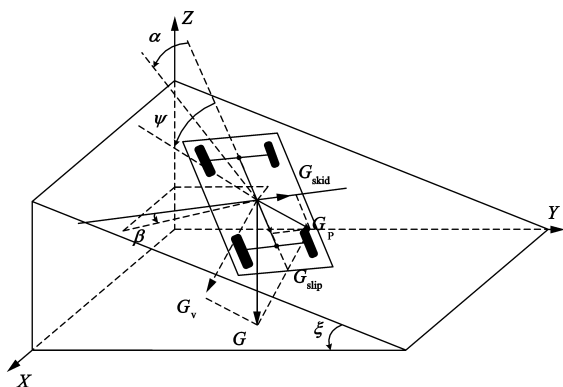


图4 标准斜坡机器人模型

图4中, α 为机器人的俯仰角, β 为横滚角, ψ 为机器人纵向坐标与斜坡梯度方向夹角, ξ 为斜坡的坡度. 轮式移动机器人所受的重力为 G , G_v 和 G_p 分别为重力在垂直、平行于斜面方向的分量. 由于垂直分量 G_v 仅产生路面附着力, 与滑移率无关, 故将平行分量 G_p 沿机器人前进方向的纵横向分解, 得到分量 G_{slip} 和 G_{skid} , 其大小直接影响纵向和横向打滑的程度, 此处仅考虑纵向滑移的情况, 计算可得:

$$G_{slip} = G \sin\xi \cos\psi \quad (8)$$

又因为俯仰角 α 、机器人纵坐标与梯度方向夹角 ψ 以及斜坡坡度 ξ 之间存在如下关系:

$$\cos\psi = \frac{\sin\alpha}{\sin\xi} \quad (9)$$

所以,

$$G_{slip} = G \sin\alpha \quad (10)$$

即在路面状况不变的理想条件下, 滑移率 μ 的大小受俯仰角 α 影响. 而实际环境中, α 和 ξ 都是时变的, 且路面状况不确定, 所以导致滑移率 μ 可能不连续, 给自适应控制等需要参数辨识的控制方法带来了一定困难^[17].

为了验证控制方法的普适性, 本文考虑滑移率时变的情况, 采用标准斜坡环境下的编队问题进行分析, 考虑纵向打滑, 对式(5)进行求导, 并结合式(7)起伏地形下存在打滑的轮式移动机器人的运动学方程, 可得斜坡上存在纵向打滑的机器人误差系统 $\dot{e} = [x_e, y_e, \theta_e]^T$ 如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= v_v^* \cos\alpha_v \cos\theta_e / (1 + \mu_L) + v^* y_e \tan\phi / (l + l\mu_F) \\ &\quad - v^* \cos\alpha_F / (1 + \mu_F) \\ \dot{y}_e &= v_v^* \cos\alpha_v \sin\theta_e / (1 + \mu_L) - v^* x_e \tan\phi / (l + l\mu_F) \\ \dot{\theta}_e &= v_v^* \tan\phi_v / (l + l\mu_L) - v^* \tan\phi / (l + l\mu_F) \end{aligned} \quad (11)$$

存在纵向打滑的机器人编队问题转化为跟随机器人对虚拟机器人的轨迹跟踪问题. 通过滤波后的速度传感器信号得到滑移率 μ 的估计值 $\hat{\mu}$, 然后设计控制器, 得到控制律 $[v^*, \phi]^T$, 使误差系统(11)渐进稳定.

3 控制器设计

针对式(11)误差系统, 由于滑移率的不确定性, 需要对滑移率进行估计. 首先应通过速度传感器得到轮式机器人的实际行驶速度 v , 并通过车轮转动角速度和车轮半径得到不打滑情况下的理论速度 $v^* = \omega R$.

通常情况下车轮转速 ω 能够比较精确的获得, 而速度传感器得到的实际速度 v 往往带有较大随机噪声. 采用滑动平均滤波的方法对传感器测量的速度 v 进行滤波, 得到 \hat{v} :

$$\hat{v} = (v_{n-N+1} + v_{n-N+2} + \dots + v_{n-1} + v_n) / N \quad (12)$$

其中 $N \in \mathbf{N}, N \geq 4$. 根据式(2), 得到滑移率估计值:

$$\hat{\mu} = \frac{\omega R - \hat{\theta}}{\hat{\theta}} \quad (13)$$

定理 若采用如下控制律:

$$\begin{cases} v^* = \frac{-k_1 x_e (1 + \mu_V) (1 + \mu_F) + v_V^* (1 + \mu_F) \cos \alpha_V \cos \theta_e}{\cos \alpha_F + \mu_V \cos \alpha_F} \\ \phi = \arctan \left(\frac{v_V^* (1 + \mu_F)}{v^* (1 + \mu_V)} \tan \phi_V + k_2 l y_e \frac{v_V^* (1 + \mu_F) \cos \alpha_V}{v^* (1 + \mu_V)} \right. \\ \left. + \frac{k_3 l \sin \theta_e (1 + \mu_F)}{v^*} \right) \end{cases}$$

当满足 $\alpha_V, \alpha_F \in [0, \frac{\pi}{2}]$, $v_V^* > 0$, 则式(11)描述的误差系统渐近稳定.

证明 选取 Lyapunov 函数如下,

$$V = \frac{1}{2} (x_e^2 + y_e^2) + \frac{1 - \cos \theta_e}{k_2} \quad (14)$$

对式(14)求导,得

$$\dot{V} = \dot{x}_e x_e + \dot{y}_e y_e + \frac{\dot{\theta}_e \sin \theta_e}{k_2} \quad (15)$$

将式(11)代入,且 $\mu_V = \mu_L$ 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -x_e \left[\frac{v^* \cos \alpha_F}{(1 + \mu_F)} - \frac{v_V^* \cos \alpha_V \cos \theta_e}{(1 + \mu_V)} \right] \\ & - \frac{v^* \sin \theta_e}{k_2 l (1 + \mu_F)} \left(\tan \phi - \frac{v_V^* (1 + \mu_F)}{v^* (1 + \mu_V)} \tan \phi_V \right. \\ & \left. - k_2 l y_e \frac{v_V^* (1 + \mu_F) \cos \alpha_V}{v^* (1 + \mu_V)} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

根据式(16)可见,要使 $\dot{V} \leq 0$, 需要将其配成负平方项之和的形式. 当 $k_1, k_2, k_3 > 0$ 时, 若满足如下条件, 则式(16)可以写成 $\dot{V} = -k_1 x_e^2 - \frac{k_3}{k_2} \sin^2 \theta_e$.

$$\begin{cases} \frac{v^* \cos \alpha_F}{(1 + \mu_F)} = \frac{v_V^* \cos \alpha_V \cos \theta_e}{(1 + \mu_V)} + k_1 x_e \\ \tan \phi = \frac{v_V^* (1 + \mu_F)}{v^* (1 + \mu_V)} \tan \phi_V + k_2 l y_e \frac{v_V^* (1 + \mu_F) \cos \alpha_V}{v^* (1 + \mu_V)} \\ \quad + \frac{k_3 l \sin \theta_e (1 + \mu_F)}{v^*} \end{cases} \quad (17)$$

整理式(17)可以得到如下 $[v^*, \phi]^T$, 使得 $\dot{V} \leq 0$, 且仅在 $x_e = 0, \theta_e = 0$ 时 $\dot{V} = 0$.

$$\begin{cases} v^* = \frac{[-k_1 x_e (1 + \mu_V) (1 + \mu_F) + v_V^* (1 + \mu_F) \cos \alpha_V \cos \theta_e]}{(\cos \alpha_F + \mu_V \cos \alpha_F)} \\ \phi = \arctan \left(\frac{v_V^* (1 + \mu_F)}{v^* (1 + \mu_V)} \tan \phi_V + k_2 l y_e \frac{v_V^* (1 + \mu_F) \cos \alpha_V}{v^* (1 + \mu_V)} \right. \\ \left. + \frac{k_3 l \sin \theta_e (1 + \mu_F)}{v^*} \right) \end{cases} \quad (18)$$

因此, 在控制律(18)的作用下误差系统(11)渐近稳定.

定理得证

针对式(18)控制律, 还需选择合适的控制参数 k_1, k_2, k_3 , 才能得到更好的控制性能. 采用模糊逻辑, 结合具有专家经验的模糊规则, 进行控制器参数设计. 将轮式移动机器人编队的位置误差的绝对值 $|e_p|$ 作为模糊输入, 控制律(18)中的参数 k_1, k_2, k_3 作为模糊输出, 输入和输出变量的模糊子集为 $|e_p|, k_1, k_2, k_3 = \{O, S, M, B\}$, 子集中的元素分别代表零、小、中、大.

变量的基本论域为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 由于 $|e_p|$ 和 k_1, k_2, k_3 取值区间大小不同, 可分别确定各自取值区间, 如 $[m, n]$. 再将其转换到 $[0, 6]$ 之间, $[m, n]$ 上的变量 x 变换到 $[0, 6]$ 区间的变量 y 公式如下:

$$y = \frac{6}{m-n} \left(x - \frac{m+n}{2} \right) \quad (19)$$

模糊变量的隶属函数曲线选取如图5所示.

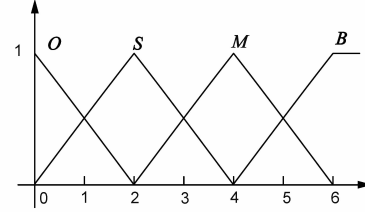


图5 $|e_p|, k_1, k_2, k_3$ 隶属函数

根据位置误差与控制参数的关系, 位置误差较大时采用较小的控制参数减小超调, 随着误差的减小逐渐增大控制参数保证编队控制的高精度, 制定模糊规则如下:

- if $|e_p| = O$ then $k_1, k_2, k_3 = B$
- if $|e_p| = S$ then $k_1, k_2, k_3 = M$
- if $|e_p| = M$ then $k_1, k_2, k_3 = S$
- if $|e_p| = B$ then $k_1, k_2, k_3 = S$

上述模糊控制规则可以表示为相应的模糊规则表格的形式如表1所示.

表1 模糊控制规则表

$ e_p $	O	S	M	B
k_1, k_2, k_3	B	M	S	S

模糊关系 R 可以写为

$$R = (O_e \times B_k) + (S_e \times M_k) + (M_e \times S_k) + (B_e \times S_k) \quad (20)$$

根据位置误差的绝对值 $|e_p|$ 的值以及模糊关系 R , 得到模糊控制输出 $u = |e_p| \circ R$ (“ \circ ”表示按照模糊规则进行运算), 最后采用重心法对模糊输出变量进行清晰化处理, 得到适当的控制参数 k_1, k_2, k_3 .

4 仿真结果

本文设计了标准斜坡上的轮式移动机器人编队仿真, 分别对领航者纵向打滑、跟随者纵向打滑、两者同时

纵向打滑三种情况进行仿真,验证上述算法的有效性.为了提高仿真的真实度和可信性,利用 MRDS4 设计三维物理仿真环境^[18].该软件基于 PhysX 物理引擎,提供了如图 2 所示的车轮摩擦力函数,能够精确的模拟真实环境并仿真打滑现象,且能够通过接口函数将仿真数据导入 MATLAB 中进行处理和分析.仿真场景如图 6 所示.

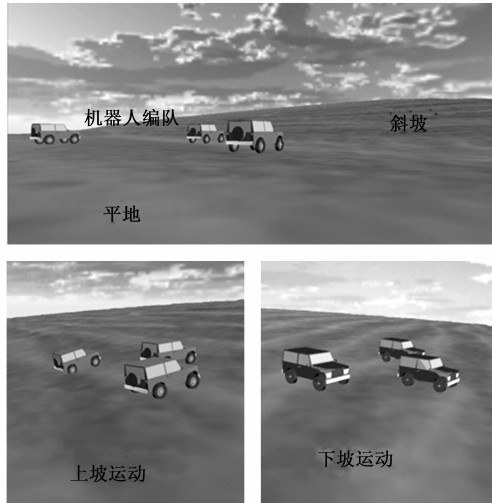


图6 仿真环境场景

仿真中,轮式机器人的轴距为 $l = 1.9\text{m}$. 机器人装配有速度传感器、车轮转速传感器、惯性导航设备等虚拟传感器,可以实时获取机器人的位姿、速度等状态信息.

仿真 1 中,领航机器人 R_1 在坡度为 10 度的斜坡上做圆周运动,可以保证滑移率在 20% 的稳定可控范围以内.对跟随机器人 R_2 和 R_3 进行控制,与 R_1 完成三角形编队,队形参数 $\rho = 5\text{m}$, $\phi = \pm 30^\circ$. 编队过程中,设置 R_1 轮胎摩擦力函数,使其发生纵向滑动.分别采用本文提出的滑移率补偿的模糊控制律以及无补偿的 PID 控制律进行编队控制,编队运动轨迹、 R_2 和 R_3 的位置和角度误差以及控制输入 $[v^*, \phi]^T$ 如图 7 所示.

由图 7(a)可见, R_1, R_2, R_3 的编队运动轨迹并不是重合的圆形轨迹,由于纵向打滑的原因,每行驶一圈轨迹会向下滑动.由图 7(b)和(c)可见,在领航机器人发生纵向滑移的情况下,由于上坡环境中机器人行驶到不同的位置时滑移率不同,无补偿控制算法中机器人的位置误差会随着机器人的圆周运动进行周期性变化,受打滑程度的影响;而采用滑移率补偿的模糊控制算法, R_2, R_3 位置误差基本保持在 0.05m 左右,不随滑移率的改变而发生变化,具有较高的精度. R_2, R_3 的速度输入信号如图 7(f)和(g)所示,可见有补偿的输入曲线相比无补偿输入曲线,在峰值和谷值处分别有向上和向下的毛刺,对无补偿的速度信号进行了补偿,减小

了打滑引起的位置误差. R_2, R_3 的角度误差以及角度输入信号分别如图 7(d)(e)(h)(i),可见纵向打滑主要对速度输入和位置误差产生影响,对角度输入和角度误差影响不大,而横向打滑可能对角度误差和输入信号产生较大影响.由于本文只研究纵向打滑的情况,故在本文仿真 2 和 3 中只分析纵向打滑情况下补偿前后的速度输入和位置误差变化情况,角度误差和角度输入变化不大,不再分析.

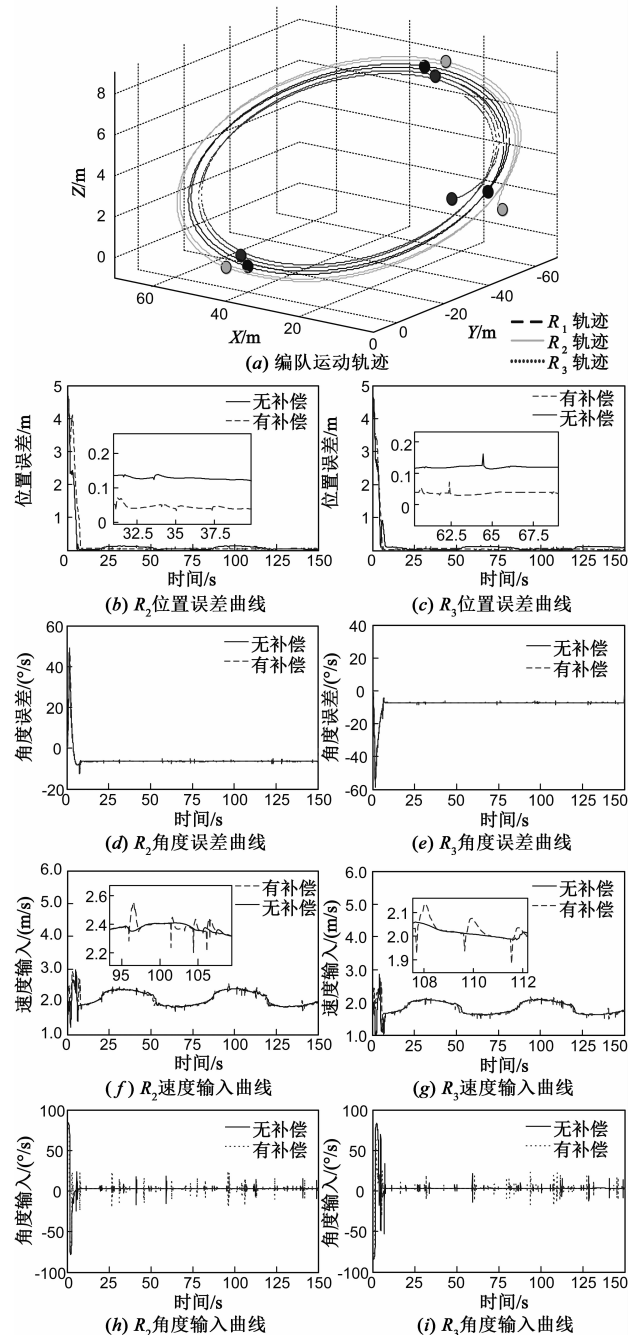


图7 领航者打滑编队仿真

仿真 2 中,环境场景设置与仿真 1 相同,队形参数仍为 $\rho = 5\text{m}$, $\phi = \pm 30^\circ$. 设置 R_2, R_3 轮胎摩擦系数,使跟随机器人都发生纵向滑动. 分别采用本文提出的滑移率补偿的模糊控制律以及无补偿的 PID 控制律进行编队控制, R_2 和 R_3 的控制输入 $[v^*, \phi]^T$ 以及位置误差如图 8 所示.

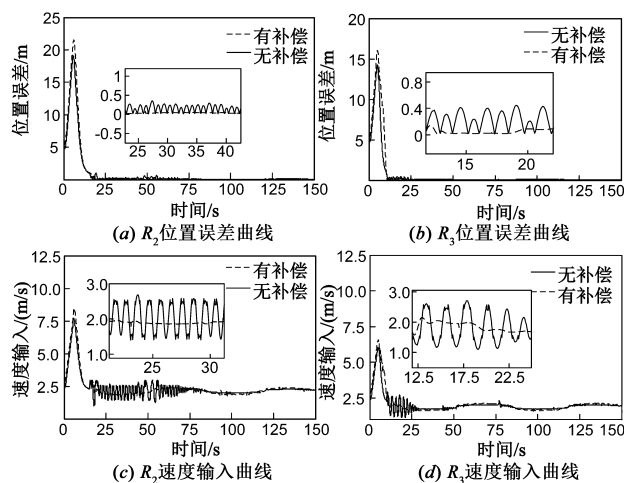


图8 跟随者打滑编队仿真

由图 8(a) 和 (b) 可见,在跟随机器人发生纵向滑移的情况下,无补偿控制算法中机器人的位置误差会发生抖动,而采用滑移率补偿的模糊控制算法,跟随机器人 R_2, R_3 的位置误差明显减小,具有较高的编队精度. R_2, R_3 的速度输入信号如图 8(c) 和 (d) 所示,可见不补偿时,速度输入信号受到纵向滑移的影响会发生抖动,补偿之后较为平缓.

仿真 3 中,环境场景设置与仿真 1、2 相同,队形参数仍为 $\rho = 5\text{m}$, $\phi = \pm 30^\circ$. 设置 R_1, R_2, R_3 轮胎摩擦系数,使领航和跟随机器人都发生纵向滑动,且滑动程度不同. 分别采用本文提出的滑移率补偿的模糊控制律以及无补偿的 PID 控制律进行编队控制, R_2 和 R_3 的控

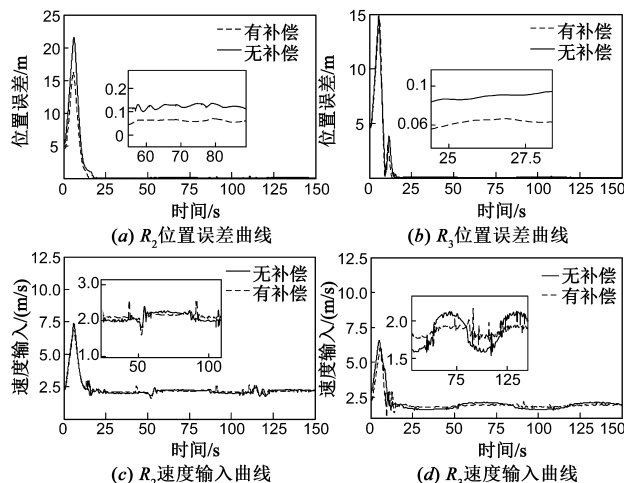


图9 领航者、跟随者同时打滑编队仿真

制输入 $[v^*, \phi]^T$ 以及位置误差如图 9 所示.

由图 9(a) 和 (b) 可见,在领航、跟随机器人都发生纵向滑移的情况下,由于纵向滑移有一定程度的相互抵消,无补偿时位置误差也较小,但是补偿之后具有更小的位置误差,具有较高的编队精度. R_2, R_3 的速度输入信号如图 9(c) 和 (d) 所示,可见补偿后的速度输入信号变化较小,对上下坡打滑产生的速度变化起到了补偿的作用.

5 结论与展望

本文针对轮式移动机器人存在纵向滑移情况下的编队问题,提出了一种基于滑移率补偿的模糊控制方法. 首先,运用领航跟随法,得到斜坡上存在打滑的编队队形误差动态模型. 其次,设计轨迹跟踪控制器,并证明了误差系统的稳定性. 然后,运用模糊逻辑,制定模糊规则,调节控制器参数. 最后,通过基于物理引擎的仿真环境,对领航机器人打滑、跟随机器人打滑和两者同时发生打滑三种情况进行了仿真. 通过对比,验证了本文所提方法的有效性. 今后可进一步对横向打滑的情况进行研究,并结合横向和纵向打滑的特点,分析无规则起伏地形下轮式移动机器人的编队控制问题.

参考文献

- [1] Alessandro Farinelli, Luca Iocchi, Daniele Nardi. MultiRobot systems: A classification focused on coordination [J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetics (Part B), 2004, 34(5): 2015 - 2028.
- [2] Hasan M, Jawhar G, Maarouf S. Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure [J]. Mechatronics, 2011, 21(7): 1147 - 1155.
- [3] Luca C, Fabio M, Domenico P. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints [J]. Automatica, 2008, 44(5): 1343 - 1349.
- [4] 刘国荣, 张扬名. 移动机器人轨迹跟踪的模糊 PID-P 型迭代学习控制 [J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1536 - 1541. Liu Guo-rong, Zhang Yang-ming. Trajectory tracking of mobile robots based on fuzzy PID-P type iterative learning control [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(8): 1536 - 1541. (in Chinese)
- [5] 史文库, 姚为民. 汽车构造下册 (第六版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013. Shi Wenku, Yao Weimin. Automobile Structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 王博, 卢萍萍, 管欣, 等. 路面附着系数识别方法发展现状综述 [J]. 汽车技术, 2014, (8): 1 - 7. Wang Bo, Lu Pingping, Guan Xin, et al. A review on the development status of road adhesion coefficient identifica-

- tion Approach[J]. *Automobile Technology*, 2014, (8): 1 – 7. (in Chinese)
- [7] 郑太雄,周花,李永福. 基于 UIO 的 EPS 系统状态反馈最优控制[J]. *自动化学报*, 2014, 40(7): 1433 – 1441.
Zheng Tai-Xiong, Zhou Hua, Li Yong-Fu. Optimal state feedback control of EPS system based on UIO [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40 (7): 1433 – 1441. (in Chinese)
- [8] Gonzalez R, Fiacchini M, Alamo T, et al. Adaptive control for a mobile robot under slip conditions using an LMI-based approach [J]. *European Journal of Control*, 2010, 16 (2): 144 – 155.
- [9] Wang D, Chang B L. Modeling and analysis of skidding and slipping in wheeled mobile robots: Control design perspective [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24 (3): 676 – 687.
- [10] 崔明月,孙棣华,李永福,等. 轮子纵向打滑条件下的移动机器人自适应跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2013, 28 (5): 664 – 670.
Cui Ming-yuea, Sun Di-huaa, Li Yong-fua, Liu Wei-ning. Adaptive tracking control of wheeled mobile robots in presence of longitudinal slipping [J]. *Control and Decision*, 2013, 28 (5): 664 – 670. (in Chinese)
- [11] 申动斌,孙伟杰. 打滑状态下的多机器人编队控制[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(23): 30 – 35.
Shen Dongbin, Sun Weijie. Multirobot formation control under slipping condition [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 30 – 35. (in Chinese)
- [12] Corradini M L, Leo T, Orlando G. Experimental testing of a discrete-time sliding mode controller for trajectory tracking of a wheeled mobile robot in the presence of skidding effects [J]. *Journal of Robotic Systems*, 2002, 19 (4): 177 – 188.
- [13] Chang B L, Wang D. GPS-based tracking control for a car-like wheeled mobile robot with skidding and slipping [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2008, 13 (4): 480 – 484.
- [14] 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 Ruilei, Li Sheng, Chen Qingwei. Dynamic formation control for car-like mobile robots [J]. *Robot*, 2013, 35 (6): 651 – 656. (in Chinese)
- [15] 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 Zheng-cai, Zhao Ying-tao, Fu Yi-li. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4): 632 – 635. (in Chinese)
- [16] 张瑞雷,李胜,陈庆伟,等. 复杂地形环境下多机器人编队控制方法[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31 (4): 531 – 537.
Zhang Rui-lei, Li Sheng, Chen Qing-wei, et al. Formation control for multi-robot system in complex terrain [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31 (4): 531 – 537. (in Chinese)
- [17] 吴宏鑫,胡军,解永春. 基于特征模型的智能自适应控制[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2009.
Wu Hongxin, Hu Jun, Xie Yongchun. *Characteristic Model-Based Intelligent Adaptive Control* [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2009. (in Chinese)
- [18] Nathan Michael, Jonathan Fink, Vijay Kumar. Experimental testbed for large multirobot teams [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2008, 15(1): 53 – 61.

作者简介



王保防 男, 1989 年 9 月出生于山东省潍坊市, 南京理工大学博士研究生, 研究方向为多机器人编队控制, 智能控制.
E-mail: baofangtc@163.com



张瑞雷 男, 1985 年 10 月出生于江苏省连云港市, 南京理工大学博士研究生, 研究方向为机器人三维物理仿真通用平台设计与多机器人协调控制等.