

电机驱动的车式移动机器人数据驱动控制 及野外编队研究*

孙玮琢¹, 王保防²

(1. 91550 部队, 辽宁 大连 116023;

2. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对野外复杂环境下车式机器人常受动力学扰动影响, 仅从运动学角度难以实现高性能机器人编队及轨迹跟踪控制的问题, 提出一种数据驱动的动力学内环电机控制设计方法。将电机及减速机构看作整体, 采用输入输出数据实时辨识动力学模型参数, 对动力学内环进行特征建模, 针对数据驱动的二阶离散动力学系统模型, 设计离散滑模控制器并进行稳定性分析。在微软公司基于物理引擎的机器人仿真平台 Microsoft Robotics Developer Studio 4 (MRDS4) 进行仿真对比, 并将仿真数据导入 MATLAB 进行分析, 通过仿真验证所设计控制方法的整体有效性, 在扰动力矩影响较大的野外复杂环境中仍能使机器人保持较快的动态响应速度, 在编队中快速响应队形的切换跟踪。

关键词: 车式移动机器人; 动力学模型; 数据驱动; 滑模控制

中图分类号: TM359.9; TP273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)05-0010-07

doi: 10.12177/emca.2023.042

Research on Data-Driven Control of Motor Driven Car-Like Mobile Robots with Rough Terrain Formation*

SUN Weizhuo¹, WANG Baofang²

(1. The P. L. A. 91550 Unit, Dalian 116023, China;

2. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The car-like robots are often affected by dynamics disturbance in the complex terrain environment, and the formation and trajectory tracking control of high-performance robots can't be realized only by kinematics analysis. In order to solve this problem, a data-driven dynamic inner loop controller design method is proposed. The motor and the decelerating mechanism are considered as a whole. The input and output data are used to identify the model parameters in real time and the characteristic model of dynamic inner loop is built. A discrete sliding mode controller is designed for the second-order discrete dynamic system model driven by data and its stability is analyzed. The simulation and comparison are carried out in Microsoft Robotics Developer Studio 4 (MRDS4) which is a robot simulation platform based on the physical engine of Microsoft. The simulation data are imported into MATLAB for analysis to verify the overall effectiveness of the designed control strategy. In the complex terrain environment where the disturbance torque has a large influence, the robot can still maintain fast dynamic response speed, and respond quickly to the switching and tracking in formation.

Key words: car-like mobile robot; dynamics model; data driven; sliding mode control

收稿日期: 2023-01-09; 收到修改稿日期: 2023-02-20

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(62103212)

作者简介: 孙玮琢(1982—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为智能无人装备。

王保防(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为高精度伺服控制、非线性系统、机器人轨迹跟踪控制。

0 引言

工业 4.0 的推进与发展将个性化定制模式的智能制造产业带到了新的高度,更好地为机器人提供了高性能、定制化的核心零部件,使各领域机器人的性能持续提升。然而目前,就轮式移动机器人而言,绝大多数轨迹跟踪和编队控制问题的研究仍集中于运动学控制器设计上^[1-3],其原因主要在以下两方面:(1)研究编队控制所使用的移动机器人多数为成品机器人,本身带有电机驱动与控制模块,给定速度指令就能够自动完成指令信号跟踪,动力学内环的控制器已经包含在内;(2)在常规的室内应用场合,轮式机器人携带负载少,轮轴转动惯量不高,运动速度低,工作空间不存在强力矩扰动,采用基于运动学模型的控制策略就可以实现高精度跟踪及编队控制,进行动力学分析的必要性不大,运动学控制器已经足够保证控制性能要求。但随着各种结构机器人应用领域的扩展,轮式机器人编队控制问题也逐步面向速度更快、负载更大以及存在多源扰动的工作条件^[4-6]。因此,在复杂环境下的运输、探索、灾后救援等领域对机器人轨迹跟踪与编队控制性能提出了更高需求。由此可见,研究基于动力学模型的机器人控制设计方法是进一步提升复杂工况下机器人控制性能的关键。

此外,不同型号的机器人采用的电机种类及参数存在较大差异,所采用的控制方法也各有不同,为便于设计不同外界扰动情况下的动力学控制器,并适用于各种不同型号的车式移动机器人,基于数据驱动的控制策略近年来受到学者们的广泛关注。其核心思想是将复杂系统对象抽象为低阶时变的线性系统,由输入与输出系统的数据实时辨识低阶系统的时变参数,再基于辨识所得的系统模型设计控制器的一种控制设计方法,主要包含迭代学习控制、无模型自适应控制及特征模型控制方法等^[7]。其主要优势在于无需准确数学建模,基于数据驱动辨识模型设计的控制器对系统参数摄动具有较好的调节能力。因此,该方法在解决成品轮式机器人动力学内环模型未知以及特殊任务环境中轮式移动机器人动力学参数时变的问题具有一定优势。

基于运动学模型进行机器人控制设计的相关

研究近年来日渐完善,且不断有新的控制策略提出。文献[8]设计了一种基于自抗扰的变增益控制策略,采用逆运动学求解的方法设计控制器,实现机器人准确地轨迹跟踪。文献[9]以全向移动机器人为研究对象,考虑未知车轮打滑问题,设计了自抗扰反步控制器,分别从横向、纵向及姿态控制上对打滑造成的扰动进行观测与补偿。文献[10]针对主从式机器人轨迹跟踪控制问题,提出了一种采用多传感器数据融合的模糊比例积分控制策略,通过试验验证了所提方法的优越性。文献[11]针对含有模型不确定性和未知外部扰动的轮式移动机器人编队控制问题,研究并提出了分布式协同编队控制方法,通过单条参数化路径导引,实现了机器人集群的协同编队运动。文献[12]从运动学与动力学模型两个层面出发,分析了轮式移动机器人控制特点,并设计了基于滑模控制的轨迹跟踪控制策略。文献[13]针对多机器人协同编队控制问题,采用领航跟随法设计了运动学编队控制器,证明了在控制器作用下跟踪误差收敛到远点的小邻域内,通过仿真验证了控制器的有效性。

本文针对野外复杂环境下车式机器人常受动力学扰动影响,仅从运动学角度难以实现高性能机器人编队及轨迹跟踪控制的问题。通过运动学外环根据领航跟随法,得到跟随机器人的误差状态方程,设计运动学控制器;采用电机驱动的动力学内环结合基于特征模型的数据驱动控制器设计方法,进行轮式机器人动力学控制器设计,实现野外复杂地形环境中轮式移动机器人编队控制。应用 Microsoft Robotics Developer Studio 4 (MRDS4) 进行复杂环境机器人编队仿真和对比,并将仿真数据导入 MATLAB 进行分析,验证所设计控制策略整体的有效性。

1 运动学模型及控制器设计

以常规的等腰三角形队形编队为例,四轮车式机器人基于领航跟随法的编队示意图如图 1 所示,车式移动机器人前轮为转向轮,可绕垂直于机器人运动方向的轴转动,后轮为驱动轮,始终保持运动方向。 l 表示前轮与后轮之间的轴间距,每个机器人的二维空间位置与姿态可用向量 $\boldsymbol{p} = [x \ y \ \theta]^T$ 表示, $[x \ y \ \theta]^T$ 向量中的元素分别表示后轮

轮轴中心的二维空间横坐标、纵坐标以及机器人中心线与 x 轴方向的夹角。

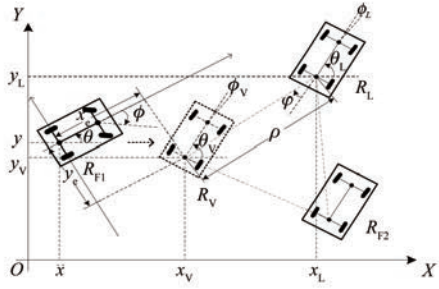


图 1 四轮轮式机器人三角形编队

R_L 为领航者, R_{F1} 和 R_{F2} 为跟随者, $[x_V \ y_V \ \theta_V \ v_V \ \phi_V]^T$ 与 $[x_L \ y_L \ \theta_L \ v_L \ \phi_L]^T$ 分别为虚拟机器人的位置姿态信息、后轮前进速度及前轮转向角, 如图 1 所示, 跟随机器人需要与领航机器人保持规定队形参数的三角形编队。以 R_{F1} 为例, R_V 是 R_{F1} 需要跟踪的虚拟机器人, 只要 R_V 与 R_{F1} 之间的位姿误差 $e^* = [x_V - x \ y_V - y \ \theta_V - \theta]^T$ 收敛到零, 则能够实现三角形编队, 跟随机器人 R_{F2} 同理。 ϕ_V 表示虚拟机器人前轮转角, R_V 的位置和姿态信息 $[x_V \ y_V \ \theta_V]^T$ 可以根据领航机器人 R_L 的位姿信息与队形参数 $[\rho \ \phi]^T$ 确定, 即:

$$\begin{cases} x_V = x_L - \rho \cos(\theta_L + \phi) \\ y_V = y_L - \rho \sin(\theta_L + \phi) \\ \theta_V = \theta_L \\ v_V = v_L \\ \phi_V = \phi_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为三角形队形机器人之间的距离; ϕ 为机器人方向与三角形边之间的夹角; v 为后轮驱动速度; ϕ 为前轮转向角, 顺时针方向为正。

车式移动机器人控制输入为 $[v \ \phi]^T$, 在车轮纯滚动无滑动条件下, 运动学模型如下^[10]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = v \tan(\phi) / l \end{cases} \quad (2)$$

对姿态误差进行坐标变换, 将大地坐标系下的姿态误差转换到机器人坐标系中, 如下所示:

$$e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = T e^* \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: x_e, y_e, θ_e 为机器人坐标系中的位置和姿态角误差信息。

对式(3)坐标变换之后的位姿误差求导, 并将式(1)运动学方程代入, 可得误差系统状态方程, 如下所示:

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_V \cos(\theta_e) + v_{y_e} \tan(\phi) / l - v \\ v_V \sin(\theta_e) - v_{x_e} \tan(\phi) / l \\ v_V \tan(\phi_V) / l - v \tan(\phi) / l \end{bmatrix} \quad (5)$$

设计运动学控制器 $[v \ \phi]^T$ 如下, 所设计的控制信号即机器人动力学模型的参考控制信号:

$$\begin{cases} v = v_V \cos(\theta_e) + k_1 x_e \\ \phi = \arctan \left[\frac{v_V}{v} \tan(\phi_V) + \frac{k_2 l v_V}{\theta_e v} y_e \sin(\theta_e) + \frac{k_3 l}{v} \theta_e \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为正常数。

选取 Lyapunov 函数如下:

$$V = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 + \frac{1}{2k_2} \theta_e^2 \quad (7)$$

对式(7)求导并将式(5)代入, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{1}{k_2} \theta_e \dot{\theta}_e = & - \\ & x_e [v - v_V \cos(\theta_e)] + \frac{\theta_e v}{k_2 l} \left[\tan(\phi) - \right. \\ & \left. \frac{v_V}{v} \tan(\phi_V) - \frac{k_2 l v_V}{\theta_e v} y_e \sin(\theta_e) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

将式(6)代入式(8), 得:

$$\dot{V} = -k_1 x_e^2 - \frac{k_3}{k_2} \theta_e^2 \leq 0 \quad (9)$$

可见, 设计控制信号 $[v \ \phi]^T$ 如式(6)所示, 满足式(9)所示的 Lyapunov 函数, 且仅在 $x_e = 0, \theta_e = 0$ 时取得, 因此, 在控制器式(6)作用下, 机器人领航跟随法编队的误差系统式(5)渐近稳定。

2 动力学模型及控制器设计

车式移动机器人在各应用领域常面临动力学参数时变的问题, 如在运输过程中需面临货物的装载与拆卸, 导致机器人动力学模型负载转矩等

发生变化。因此,面对动力学参数摄动及外部干扰,需要设计鲁棒性强且抗干扰的动力学控制策略,提高编队控制的动态性能。

本文采用数据驱动的控制设计方法,对机器人电机内环动力学模型简化描述为时变二阶离散系统,并通过数据驱动的参数辨识设计控制器,系统整体结构框图如图 2 所示。

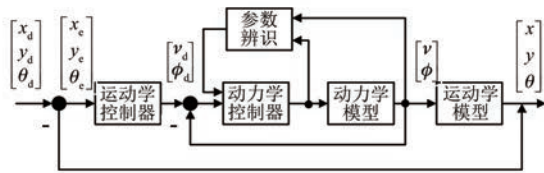


图 2 机器人控制设计框图

对于自带驱动与控制模块,已有动力学控制器的成品车式机器人,也可采用数据驱动的方法,进一步设计动力学内环动态性能补偿控制器,降低参数摄动的影响,提高野外复杂环境轮式移动机器人编队控制性能,控制结构如图 3 所示。

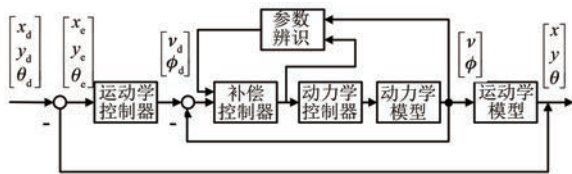


图 3 动力学补偿结构图

图 2 和图 3 中, $[x_d \ y_d \ \theta_d]^T$ 为机器人位姿期望值, $[x_e \ y_e \ \theta_e]^T$ 为位姿误差, $[v_d \ \phi_d]^T$ 为运动学外环控制器得到的期望输入信号,即动力学内环控制器的参考指令, $[v \ \phi]^T$ 和 $[x \ y \ \theta]^T$ 分别为实际的运动学输入与机器人实际位姿。

针对电机驱动的机器人动力学内环控制系统,本文基于数据驱动的思想,采用特征模型理论对动力学内环进行建模、辨识及控制设计,无需系统精确数学模型,因此,可用于包括异步电机、同步电机及直流电机等各类电机驱动的车式移动机器人。通过实时在线辨识得到系统参数,在相同输入作用下,数据驱动的特征模型和实际被控对象在输出上是等价的,即在参数辨识的动态过程中能保持系统输出在允许的误差范围内,在辨识参数收敛后输出是相等的^[7]。吴宏鑫等^[7]对非线性系统的特征建模过程与方法进行了系统地阐述。动力学模型特征建模,系统满足如下条件时,

其特征模型可以表示为二阶时变差分方程形式。

记非线性系统为

$$\dot{x}(t) = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(m)}) \quad (10)$$

令:

$$\begin{aligned} x &= x_1, \dot{x} = x_2, \dots, x^{(n)} = x_{n+1} \\ u &= u_1, \dot{u} = u_2, \dots, u^{(m)} = u_{m+1} \end{aligned} \quad (11)$$

则式(9)可以写成:

$$\dot{x}_1(t) = f(x_1, \dots, x_{n+1}, u_1, \dots, u_{m+1}) \quad (12)$$

假设系统满足如下条件:

- (1) 单输入单输出。
- (2) 控制量 $u(t)$ 的次方为 1。
- (3) $f(\cdot)$ 中全部自变量 x_i, u_i 为零时,则 $f(\cdot) = 0$ 。
- (4) $f(\cdot)$ 对所有自变量连续可导,各偏导数有界。

- (5) $|f[x(t+T), u(t+T)]| - |f[x(t), u(t)]| < MT$, 假设条件中, M 为一正常数; T 为采样周期。

引理^[7] 若被控对象可用式(12)描述,且符合上述假设条件,其特征模型可以用一个二阶时变差分方程形式来描述:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f_1(k)x(k) + f_2(k)x(k-1) + \\ &g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1) \end{aligned} \quad (13)$$

若系统为最小相位系统,则可以省略 $g_1(k)u(k-1)$ 项,特征模型形式如下,参数范围可确定:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f_1(k)x(k) + f_2(k)x(k-1) + \\ &g_0(k)u(k) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $f_1(k) \in (1, 2)$; $f_2(k) \in [-1, 0)$; $g_0(k) \ll 1$; $g_1(k) \ll 1$ 。

车式移动机器人动力学模型满足牛顿第二定律,可知其满足假设条件(2)~条件(4)。由于后轮驱动速度 v 和前轮转向角 ϕ 之间相互独立,不存在耦合,动力学模型可以看作两个相互独立的单输入单输出系统,满足假设条件(1)。

两个单输入单输出系统的特征模型形式相同,所以只针对后轮驱动速度 v 的控制系统进行讨论,前轮转向角 ϕ 的控制器设计同理可得。误差系统可以描述为

$$\begin{aligned} e(k+1) &= f_1(k)e(k) + f_2(k)e(k-1) + \\ &g_0(k)u(k) \end{aligned} \quad (15)$$

根据数据驱动的思想,采用输入输出数据对系统参数进行辨识,得到:

$$e(k+1) = \hat{f}_1(k)e(k) + \hat{f}_2(k)e(k-1) +$$

$$\hat{g}_0(k)u(k) + \Delta(k) \quad (16)$$

式中: $e(k) = x(k) - x_r(k)$; $x(k)$ 为实际速度输出; $x_r(k)$ 为速度指令信号; $\Delta(k)$ 为辨识误差、不确定性和扰动的总和。

特征模型中常用的参数辨识方法有多种,包括梯度下降法、最小二乘法以及基于神经网络的辨识算法等,本文采用带遗忘因子的最小二乘辨识算法进行参数辨识。

针对二阶差分方程表示的数据驱动误差系统式(15),设计控制律为

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_s(k) \quad (17)$$

自适应控制律为

$$u_{eq}(k) = -\frac{1}{\hat{g}_0(k)}[\hat{f}_1(k)e(k) + \hat{f}_2(k)e(k-1)] \quad (18)$$

滑模控制律为

$$u_s(k) = \frac{1}{\hat{g}_0(k)}\{(1-qT)e(k) - \varepsilon T \text{sign}[e(k)]\} \quad (19)$$

假设 $|\Delta(k)| < f_m$, 则各参数需满足的范围如下所示:

$$\begin{cases} T < \frac{2|e_0|}{2\varepsilon + q|e_0|} \\ q > 0 \\ \varepsilon > \frac{f_m}{T} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数; e_0 为滑模抖振误差带边界值,即系统收敛之前的最小跟踪误差; T 为采样时间; ε 和 q 为正常数。

定理 针对式(15)表示的二阶离散误差系统,采用控制律式(17),若控制参数满足范围式(20),闭环系统有界稳定。

证明:将控制律式(17)代入式(16),得:

$$e(k+1) = (1-qT)e(k) - \varepsilon T \text{sign}[e(k)] + \Delta(k) \quad (21)$$

则有:

$$\begin{aligned} [e(k+1) - e(k)] \text{sign}[e(k)] &= \\ -qT|e(k)| - \varepsilon T + \Delta(k) \text{sign}[e(k)] &< \\ -\varepsilon T + \Delta(k) \text{sign}[e(k)] &< -\varepsilon T + f_m \end{aligned} \quad (22)$$

因为 $\varepsilon > \frac{f_m}{T}$, 所以 $[e(k+1) - e(k)] \text{sign}[e(k)] < 0$ 。

$$\begin{aligned} [e(k+1) + e(k)] \text{sign}[e(k)] &= \\ (2-qT)|e(k)| - \varepsilon T + \Delta(k) \text{sign}[e(k)] &= \\ (2-qT)|e(k)| - 2\varepsilon T + \varepsilon T + \Delta(k) \text{sign}[e(k)] &> \\ (2-qT)|e(k)| - 2\varepsilon T + f_m + \Delta(k) \text{sign}[e(k)] &> \\ (2-qT)|e(k)| - 2\varepsilon T \end{aligned} \quad (23)$$

因为 $T < \frac{2|e_0|}{2\varepsilon + q|e_0|}$, 所以 $2-qT > \frac{4\varepsilon}{2\varepsilon + q|e_0|} > 0$,

且 $(2-qT)|e_0| - 2\varepsilon T > 0$, 有:

$$\begin{aligned} [e(k+1) + e(k)] \text{sign}[e(k)] &> \\ (2-qT)|e(k)| - 2\varepsilon T &> \\ (2-qT)|e_0| - 2\varepsilon T &> 0 \end{aligned} \quad (24)$$

综上所述,系统满足 $[e(k+1) - e(k)] \cdot \text{sign}[e(k)] < 0$ 且 $[e(k+1) + e(k)] \text{sign}[e(k)] > 0$, 符合离散滑模控制的有界稳定条件^[14], 证毕。

3 仿真分析

本文对动力学参数未知且时变的情况进行仿真分析,随后基于三维物理引擎分析起伏地形下的编队控制问题。通过与经典控制方法控制效果对比,验证所提动力学控制策略的有效性及其优越性。仿真分析过程中,为抑制滑模控制产生的抖振现象,控制律式(16)中采用反正切函数代替符号函数。

3.1 动力学控制器仿真分析

分析轮式移动机器人动力学参数未知且时变的编队控制问题,采用两个轮式移动机器人领航跟随法编队。针对常见的机器人负载质量和轮轴转动惯量变化的情况,设计运动学和动力学控制器,在 MATLAB 中进行仿真。

其中,轮式移动机器人的轴距为 $l = 1.9$ m, 领航机器人 R_1 做圆周运动,跟随机器人 R_2 与领航机器人之间的队形参数初始为 $\rho = 5$ m, $\varphi = 0^\circ$, 初始位姿误差为 $[x_e \ y_e \ \theta_e]^T = [5 \ 5 \ 0]^T$, R_2 机器人负载质量的初始值为 $m_0 = 2\ 000$ kg, 仿真开始后每秒钟递减 5 kg。在仿真时间 $t = 60$ s 的时刻进行队形参数切换,切换后的队形参数为 $\rho = 5$ m, $\varphi = -90^\circ$ 。动力学内环分别采用数据驱动的滑模控制器和分区 PID 控制器进行对比分析,队形结构以及编队过程中的位置、姿态误差如图 4 所示。

由图 4(b) 和图 4(c) 仿真结果可见,当 $t < 60$ s 时,两种对比方法编队精度均较高,且系统相应速度快,两种方法性能相近。但在 $t > 60$ s 时,由于轮式移动机器人系统参数变化,采用分区 PID 方法

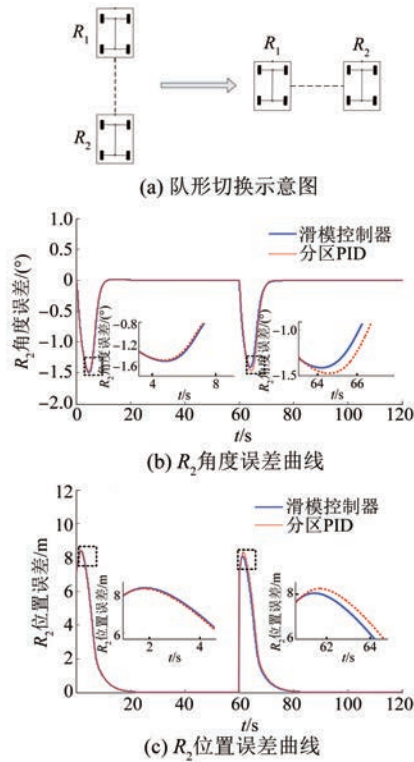


图4 编队控制 MATLAB 仿真分析

设计的动力学控制器能够根据误差区段, 自动进行控制器参数调节, 但对系统参数摄动带来的影响不能做出自适应调整, 收敛速度减慢, 而基于数据驱动的滑模控制器对系统参数变化具有更强的自适应能力, 收敛速度较快。

3.2 补偿控制器仿真分析

对带有常规电机内环动力学控制器的成品轮

式移动机器人, 设计动力学补偿控制器, 在 MRDS4 中进行野外复杂环境下的三维物理仿真, 通过对比验证本文所提出的动力学补偿控制器在复杂起伏地形环境下对四轮轮式机器人编队控制性能的影响。MRDS4 仿真平台基于 PhyX 物理引擎, 仿真环境场景如图 5 所示。

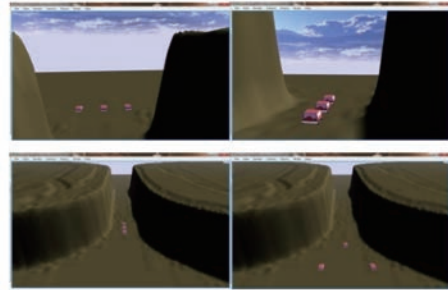


图5 仿真环境场景

其中, 机器人装配有速度传感器、惯性导航设备等虚拟传感器, 可以实时获取机器人的三维位置、姿态以及行驶速度等信息。轮式移动机器人的轴距为 $l=1.9\text{ m}$, 机器人 R_1, R_2, R_3 在野外高低起伏的环境中按照期望队形参数进行队形变换, 通过狭长峡谷地带, 完成编队任务。 R_2, R_3 的初始队形参数为 $\rho=7\text{ m}, \varphi_2=0^\circ$, 完成三角形编队; 随后, 受狭长地形限制, 编队队形切换成线形编队, R_2, R_3 的队形参数变为 $\rho_2=5\text{ m}, \rho_3=10\text{ m}, \varphi=0^\circ$; 通过峡谷区域之后, 进一步变换为一字形编队, 队形参数变为 $\rho=7\text{ m}, \varphi_2=90^\circ, \varphi_3=-90^\circ$ 。队形切换示意图、编队轨迹以及跟随机器人的位置和角度误差如图 6 所示。

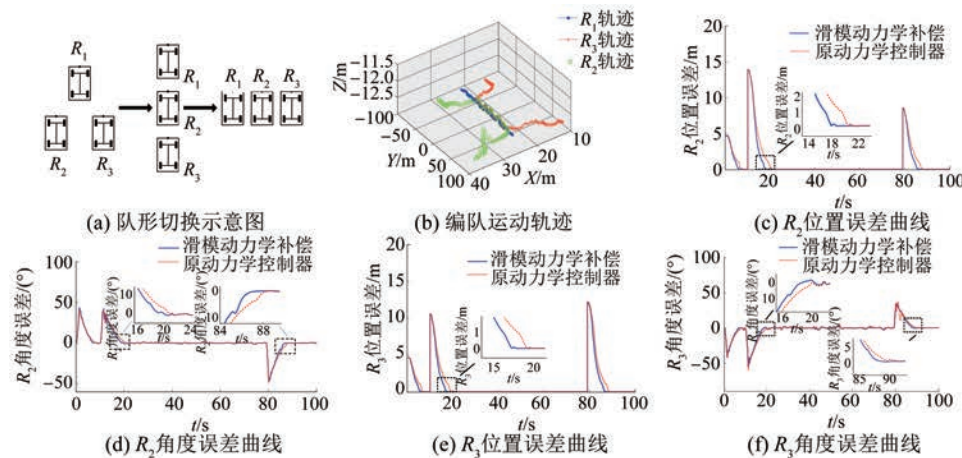


图6 补偿控制器 MRDS 仿真分析

由图 6(a) 和图 6(b) 所导出的仿真曲线可得,野外高低起伏的环境中轮式移动机器人编队控制性能会受影响,在没有补偿时,采用原机器人已有的动力学内环控制器轮式机器人的位置姿态误差收敛较慢;采用数据驱动的动力学补偿控制方法,可以提高轮式机器人编队控制系统在队形切换时的响应速度。

运动学控制器中控制参数 $k_1 = 0.8$, $k_2 = 0.4$, $k_3 = 1.8$, 动力学二阶离散系统参数由最小二乘法辨识获得,其中遗忘因子选取为 $\lambda = 0.995$ 。

4 结 语

本文针对电机驱动的车式移动机器人动力学控制设计问题,提出了一种数据驱动的动力学控制器或者动力学补偿控制器设计方法。根据领航跟随法,得到机器人运动学系统的误差动态模型,设计 Lyapunov 函数构建运动学外环控制器。针对机器人动力学内环,采用数据驱动的方法进行建模及参数辨识,并设计滑模控制器以及补偿控制器,分析了系统的稳定性。通过两组仿真,对比分析了本文所提方法的有效性。

【参 考 文 献】

- [1] MEHRJERDI H, GHOMMAM J, SAAD M. Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(7): 1147.
- [2] CONSOLINI L, MORBIDI F, PRATTICCHIZZO D, et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints[J]. *Automatica*, 2008, 44(5): 1343.
- [3] SHAO J, XIE G, WANG L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 545.
- [4] 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.
- [5] 韩青, 孙树栋, 智睿瑞. 轨迹跟踪级联机器人编队控制方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(2): 317.
- [6] 杨盼盼, 刘明雍, 雷小康, 等. 基于自组织结对行为的群集机器人分群控制方法[J]. *西北工业大学学报*, 2015, 33(1): 147.
- [7] 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.
- [8] 张磊, 鲁凯, 高春侠, 等. 基于变增益自抗扰技术的机器人轨迹跟踪控制方法[J]. *电子学报*, 2022, 50(1): 89.
- [9] 贾松敏, 卢兴阳, 张祥银, 等. 轮子打滑状态下全向移动机器人轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2020, 35(4): 833.
- [10] 毛文勇, 张文安, 仇翔. 基于多传感器融合的机器人轨迹跟踪控制[J]. *控制工程*, 2020, 27(7): 1125.
- [11] 王常顺, 王丹, 彭周华. 单路径导引的车式移动机器人协同编队控制[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(7): 1124.
- [12] 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.
- [13] 师五喜, 王健. 多移动机器人的协同编队控制[J]. *天津工业大学学报*, 2020, 39(1): 63.
- [14] GAO W, WANG Y, HOMAIFA A. Discrete-time variable structure control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, 42(2): 117.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

