



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112578671 B

(45) 授权公告日 2022.05.27

(21) 申请号 202011450843.3

(22) 申请日 2020.12.11

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112578671 A

(43) 申请公布日 2021.03.30

(73) 专利权人 上海应用技术大学

地址 200235 上海市徐汇区漕宝路120-121号

(72) 发明人 吴佳峰 马向华 陈浩 王豪杰

(74) 专利代理机构 上海汉声知识产权代理有限公司 31236

专利代理师 黄超宇 胡晶

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

G05D 1/02 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 107037808 A, 2017.08.11

CN 111103798 A, 2020.05.05

IN 201721028549 A, 2019.02.15

CN 111694361 A, 2020.09.22

KR 20200116332 A, 2020.10.12

潘天宇等. 基于Backstepping的改进等速趋近律AGV滑模轨迹跟踪控制方法.《计算机集成制造系统》.2020, (第04期), 全文.

审查员 宋静

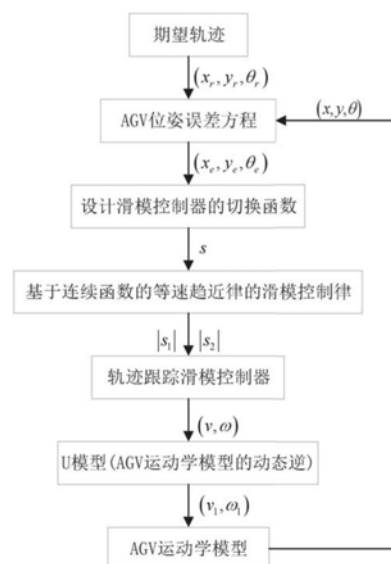
权利要求书3页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法,包括步骤1:建立全局坐标系下AGV的运动学模型,通过AGV当前位姿状态和当前期望位姿状态作比较,得到位姿误差微分方程;步骤2:基于所述位姿误差微分方程,设计AGV轨迹跟踪滑模控制的切换函数;步骤3:根据AGV系统的趋近运动,选取基于连续函数的等速趋近律,并且得到轨迹跟踪滑模控制器;步骤4:确定AGV运动学模型位姿误差微分方程为被控对象,通过U模型控制思想将被控对象动态转化为1,即在被控对象前添加AGV运动学模型的动态逆,组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统。本发明大大减少计算时间,并且消除AGV系统稳定运行时的偏差抖动,提高轨迹跟踪的速度。



1. 一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:建立全局坐标系下AGV的运动学模型,通过AGV当前位姿状态和当前期望位姿状态作比较,得到位姿误差微分方程;

所述步骤1中使用的是差速AGV底盘,该AGV车体的后轴两轮作为差速驱动轮,另外的为随动轮,通过驱动轮的速度差来控制转向,全局坐标系下AGV的运动学方程如下:

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q \quad (1)$$

AGV在轨迹跟踪时,需要实时计算AGV当前的位姿状态和当前期望的位姿状态作比较,得出两者之间的偏差并且进行纠正,AGV从当前位姿运动到期望位姿,建立以当前位置为原点的参考坐标系 $Y_1O_1X_1$,全局坐标系和参考坐标系之间存在如下坐标变换关系:

$$\begin{cases} x_r = x + x_e \cos \theta - y_e \sin \theta \\ y_r = y + x_e \sin \theta + y_e \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

结合公式(2)所述坐标变换关系,可以得到AGV运动的位姿误差方程:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过对公式(3)求导,可得位姿误差微分方程:

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,AGV的控制输入为 $q = (v, \omega)^T$, v 表示AGV中心的线速度, ω 表示AGV绕其几何中心转动的角速度; $p = (x, y, \theta)^T$ 表示AGV当前在坐标系中的位姿, (x, y) 为AGV的位置, θ 表示AGV前进方向与X轴的夹角,当AGV顺时针转向X轴时 $\theta > 0$,反之, $\theta < 0$; $\dot{x}$ 表示 x 的一阶导数,即AGV中心点在 x 轴上的速度分量; $\dot{y}$ 表示 y 的一阶导数,即AGV中心点在 y 轴上的速度分量; $\dot{\theta}$ 表示 θ 的一阶导数; $p_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ 表示AGV当前期望的位姿; $q_r = (v_r, \omega_r)^T$ 表示参考速度指令; $p_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 表示期望位姿在参考坐标系中的坐标,且 $\theta_e = \theta_r - \theta$; $\dot{p}_e = (\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e)^T$ 表示AGV位姿误差的微分;

步骤2:基于所述位姿误差微分方程,设计AGV轨迹跟踪滑模控制的切换函数;

步骤3:根据AGV系统的趋近运动,选取基于连续函数的等速趋近律,并且得到轨迹跟踪滑模控制器;

步骤4:确定AGV运动学模型位姿误差微分方程为被控对象,通过U模型控制思想将被控对象动态转化为1,即在被控对象前添加AGV运动学模型的动态逆,组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统;

所述步骤4中,确定基于AGV运动模型的位姿误差微分方程为被控对象,通过求解被控对象的动态逆,可以得到U模型:

$$\begin{cases} v_1 = y_e \omega_2 + v_r \cos \theta_e - \dot{x}_e \\ \omega_2 = \frac{v_r \sin \theta_e - \dot{y}_e}{x_e} \\ \omega_1 = \omega_r - \dot{\theta}_e \end{cases} \quad (9)$$

式中： v_1 表示线速度分量误差的动态逆， ω_1 表示角速度分量误差的动态逆， ω_2 表示中间变量；

将 $\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix}$ 用基于系统控制律的 $\begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix}$ 代替，得到被控对象动态逆的U模型控制律：

$$\begin{cases} v_1 = y_e \frac{v_r \sin \theta_e - v \sin \theta}{x_e} + v_r \cos \theta_e - v \cos \theta \\ \omega_1 = \omega_r - \omega \end{cases} \quad (10)$$

通过将公式(8)、公式(10)和公式(4)相互联合，组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统，使AGV能够跟踪期望的目标运动轨迹。

2. 根据权利要求1所述的一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法，其特征在于，所述步骤2中，由于AGV运动学模型是一个非线性系统，而针对非线性的滑模控制，需要进行切换函数的设计，设计AGV轨迹跟踪过程中非线性系统的滑模控制的切换函数为：

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e + \arctan(v_r y_e) \end{bmatrix} \quad (5)$$

当 $x_e=0$ ， $\theta_e=-\arctan(v_r y_e)$ 时，李雅普诺夫函数为： $V_y = \frac{1}{2} y_e^2$ ，则有：

$$\dot{V}_y = y_e \dot{y}_e = -y_e x_e \omega - y_e v_r \sin(\arctan(y_e v_r)) \quad (6)$$

根据引理：对于任意 $x \in \mathbb{R}$ 且 $|x| < \infty$ ，有 $\phi(x) = x \sin(\arctan x) \geq 0$ ，当且仅当 $x=0$ 时，“=”成立，可以得到 $\dot{V}_y \leq 0$ ；所以当 x_e 收敛到0且 θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r y_e)$ 即 $s_1 \rightarrow 0$ ， $s_2 \rightarrow 0$ 时，能实现 $y_e \rightarrow 0$ 和 $\theta_e \rightarrow 0$ ；能使得AGV在轨迹跟踪过程中位姿偏差能够收敛。

3. 根据权利要求2所述的一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法，其特征在于，所述步骤3中，选取基于连续函数的等速趋近律：

$$\dot{s}_i = -k_i \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i}, i=1,2 \quad (7)$$

结合切换函数公式(5)和位姿误差微分方程公式(4)，可得系统的控制律：

$$q = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e + k_1 \frac{s_1}{|s_1| + \delta_1} \\ \omega_r + \frac{\partial a}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial a}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e) + k_2 \frac{s_2}{|s_2| + \delta_2} \\ \frac{1 + \frac{\partial a}{\partial y_e} x_e}{1 + \frac{\partial a}{\partial y_e} x_e} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： δ_i 表示正小数， k_i 表示趋近系数， $a = \arctan(v_r y_e)$ ， $\frac{\partial a}{\partial v_r} = \frac{y_e}{1 + (v_r y_e)^2}$ ， $\frac{\partial a}{\partial y_e} = \frac{v_r}{1 + (v_r y_e)^2}$ 。

一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及AGV系统的轨迹跟踪控制技术领域,特别涉及一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法。

背景技术

[0002] 自动驾驶车 (AGV) 是一种自动化的无人驾驶的智能化搬运设备,属于典型的移动式机器人非线性系统,能够沿预先设定的路径行驶。随着人类科技日新月异的发展,机器人的研究成为热门领域,AGV不仅应用在航天领域,并且在现代工业自动化物流中日益凸显出潜在应用价值。由于AGV应用领域宽广,其复杂的结构和控制方法一直吸引着众多研究者的广泛关注。对于各领域应用的轮式移动机器人,轨迹跟踪控制是其主要技术之一。AGV轨迹跟踪控制是指机器人在某一初始位置,由控制器的作用跟踪一条关于时间的期望轨迹,并稳定的沿着期望轨迹运行。

[0003] SMC(sliding mode control)采用滑模控制进行AGV小车的轨迹跟踪,可有效降低不确定因素的影响。SMC控制属于一种典型的非线性控制,表现为控制过程的不连续性、系统结构的不固定性。此滑模状态不受对象参数变化的影响,亦与扰动无关,故其控制具有响应迅速、对参数变化不灵敏、抗扰动、工程实现简单等特点。滑模控制的主要思想是利用符号函数设计控制律,强行驱动非线性系统的状态轨迹渐近地收敛于一个特定的状态空间曲面,该表面通常称作滑模面,并且随着时间的推移,状态轨迹将一直保持在滑模面上,这对于系统的模型参数的不确定性和外部的不确定干扰具有很好的鲁棒性。

[0004] 2014年,朱全民等提出了一种通用的基于U型模型的控制系统设计。U模型它将非线性多项式模型转换成基于控制器输出的时变多项式模型,不仅可以使轨迹跟踪控制的分析和设计更加容易,而且可以提高轨迹跟踪控制的速度和精度。

发明内容

[0005] 为了克服现有技术中的不足,本发明旨在将AGV轨迹跟踪滑模控制和U模型相结合,提供一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法,通过U模型控制思想将被控对象动态转化为1,可以大大减少计算时间和提高轨迹跟踪的速度和精度。

[0006] 为了达到上述发明目的,解决其技术问题所采用的技术方案如下:

[0007] 一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1:建立全局坐标系下AGV的运动学模型,通过AGV当前位姿状态和当前期望位姿状态作比较,得到位姿误差微分方程;

[0009] 步骤2:基于所述位姿误差微分方程,设计AGV轨迹跟踪滑模控制的切换函数;

[0010] 步骤3:根据AGV系统的趋近运动,选取基于连续函数的等速趋近律,并且得到轨迹跟踪滑模控制器;

[0011] 步骤4:确定AGV运动学模型位姿误差微分方程为被控对象,通过U模型控制思想将被控对象动态转化为1,即在被控对象前添加AGV运动学模型的动态逆,组成滑模轨迹跟踪

控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统。

[0012] 进一步的,所述步骤1中使用的是差速AGV底盘,该AGV车体的后轴两轮作为差速驱动轮,另外的为随动轮,通过驱动轮的速度差来控制转向,全局坐标系下AGV的运动学方程如下:

$$[0013] \quad \dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q \quad (1)$$

[0014] AGV在轨迹跟踪时,需要实时计算AGV当前的位姿状态和当前期望的位姿状态作比较,得出两者之间的偏差并且进行纠正,AGV从当前位姿运动到期位姿,建立以当前位置为原点的参考坐标系 Y_1Ox_1 ,全局坐标系和参考坐标系之间存在如下坐标变换关系:

$$[0015] \quad \begin{cases} x_r = x + x_e \cos \theta - y_e \sin \theta \\ y_r = y + x_e \sin \theta + y_e \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

[0016] 结合公式(2)所述坐标变换关系,可以得到AGV运动的位姿误差方程:

$$[0017] \quad p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0018] 通过对公式(3)求导,可得位姿误差微分方程:

$$[0019] \quad \dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0020] 其中,AGV的控制输入为 $q = (v, \omega)^T$, v 表示AGV中心的线速度, ω 表示AGV绕其几何中心转动的角速度; $p = (x, y, \theta)^T$ 表示AGV当前在坐标系中的位姿, (x, y) 为AGV的位置, θ 表示AGV前进方向与X轴的夹角,当AGV顺时针转向X轴时 $\theta > 0$,反之, $\theta < 0$; $\dot{x}$ 表示 x 的一阶导数,即AGV中心点在 x 轴上的速度分量; $\dot{y}$ 表示 y 的一阶导数,即AGV中心点在 y 轴上的速度分量; $\dot{\theta}$ 表示 θ 的一阶导数; $p_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ 表示AGV当前期望的位姿; $q_r = (v_r, \omega_r)^T$ 表示参考速度指令; $p_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 表示期望位姿在参考坐标系中的坐标,且 $\theta_e = \theta_r - \theta$; $\dot{p}_e = (\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e)^T$ 表示AGV位姿误差的微分。

[0021] 进一步的,所述步骤2中,由于AGV运动学模型是一个非线性系统,而针对非线性的滑模控制,需要进行切换函数的设计,设计AGV轨迹跟踪过程中非线性系统的滑模控制的切换函数为:

$$[0022] \quad s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e + \arctan(v_r y_e) \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0023] 当 $x_e = 0, \theta_e = -\arctan(v_r y_e)$ 时,李雅普诺夫函数为: $V_y = \frac{1}{2} y_e^2$, 则有:

[0024] $\dot{V}_y = y_e \dot{y}_e = -y_e x_e \omega - y_e v_r \sin(\arctan(y_e v_r))$ (6)

[0025] 根据引理:对于任意 $x \in \mathbb{R}$ 且 $|x| < \infty$,有 $\phi(x) = x \sin(\arctan x) \geq 0$,当且仅当 $x=0$ 时,“=”成立,可以得到 $\dot{V}_y \leq 0$;所以当 x_e 收敛到0且 θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r y_e)$ 即 $s_1 \rightarrow 0, s_2 \rightarrow 0$ 时,能实现 $y_e \rightarrow 0$ 和 $\theta_e \rightarrow 0$;能使得AGV在轨迹跟踪过程中位姿偏差能够收敛。

[0026] 进一步的,所述步骤3中,选取基于连续函数的等速趋近律:

[0027] $\dot{s}_i = -k_i \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i}, i=1,2$ (7)

[0028] 结合切换函数公式(5)和位姿误差微分方程公式(4),可得系统的控制律:

[0029] $q = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e + k_1 \frac{s_1}{|s_1| + \delta_1} \\ \omega_r + \frac{\partial a}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial a}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e) + k_2 \frac{s_2}{|s_2| + \delta_2} \\ 1 + \frac{\partial a}{\partial y_e} x_e \end{bmatrix}$ (8)

[0030] 式中: δ_i 表示正小数, k_i 表示趋近系数, $a = \arctan(v_r y_e)$, $\frac{\partial a}{\partial v_r} = \frac{y_e}{1 + (v_r y_e)^2}$,

$\frac{\partial a}{\partial y_e} = \frac{v_r}{1 + (v_r y_e)^2}$ 。

[0031] 进一步的,所述步骤4中,确定基于AGV运动模型的位姿误差微分方程为被控对象,通过求解被控对象的动态逆,可以得到U模型:

[0032] $\begin{cases} v_1 = y_e \omega_2 + v_r \cos \theta_e - \dot{x}_e \\ \omega_2 = \frac{v_r \sin \theta_e - \dot{y}_e}{x_e} \\ \omega_1 = \omega_r - \dot{\theta}_e \end{cases}$ (9)

[0033] 式中: v_1 表示线速度分量误差的动态逆, ω_1 表示角速度分量误差的动态逆, ω_2 表示中间变量;

[0034] 将 $\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix}$ 用基于系统控制律的 $\begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix}$ 代替,得到被控对象动态逆的U模型控制律:

[0035] $\begin{cases} v_1 = y_e \frac{v_r \sin \theta_e - v \sin \theta}{x_e} + v_r \cos \theta_e - v \cos \theta \\ \omega_1 = \omega_r - \omega \end{cases}$ (10)

[0036] 通过将公式(8)、公式(10)和公式(4)相互联合,组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统,使AGV能够跟踪期望的目标运动轨迹。

[0037] 本发明由于采用以上技术方案,使之与现有技术相比,具有以下的优点和积极效果:

[0038] 本发明提供了基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法,通过建立AGV运动学模型,以得到位姿误差微分方程,并设计相应的滑模控制切换函数和选取基于连续函数的等速趋近律,根据U模型控制思想,求出被控对象的动态逆模型,加入到控制律设计中,组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统。使得AGV的位姿误差收敛速度更快,大大减少运算时间,提高了AGV轨迹跟踪的速度和精度。

附图说明

[0039] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单的介绍。显而易见,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。附图中:

[0040] 图1为本发明实施例提供的控制方法流程图;

[0041] 图2为本发明实施例提供的差速驱动AGV运动学模型。

具体实施方式

[0042] 以下将结合本发明的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整的描述和讨论,显然,这里所描述的仅仅是本发明的一部分实例,并不是全部的实例,基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明的保护范围。

[0043] 如图1所示,本实施例提供了一种基于U模型优化SMC的AGV轨迹跟踪控制方法,包括以下步骤:

[0044] 步骤1:建立全局坐标系下AGV的运动学模型,通过AGV当前位姿状态和当前期望位姿状态作比较,得到位姿误差微分方程;

[0045] 步骤2:基于所述位姿误差微分方程,设计AGV轨迹跟踪滑模控制的切换函数;

[0046] 步骤3:根据AGV系统的趋近运动,选取基于连续函数的等速趋近律,并且得到轨迹跟踪滑模控制器;

[0047] 步骤4:确定AGV运动学模型位姿误差微分方程为被控对象,通过U模型控制思想将被控对象动态转化为1,即在被控对象前添加AGV运动学模型的动态逆,组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统。

[0048] 进一步的,所述步骤1中使用的是差速AGV底盘,该AGV车体的后轴两轮作为差速驱动轮,另外的为随动轮,通过驱动轮的速度差来控制转向,全局坐标系下AGV的运动学方程如下:

$$[0049] \quad \dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} q \quad (1)$$

[0050] AGV在轨迹跟踪时,需要实时计算AGV当前的位姿状态和当前期望的位姿状态作比

较,得出两者之间的偏差并且进行纠正,AGV从当前位姿运动到期望位姿,建立以当前位置为原点的参考坐标系 $Y_1O_1X_1$,全局坐标系和参考坐标系之间存在如下坐标变换关系:

$$[0051] \quad \begin{cases} x_r = x + x_e \cos \theta - y_e \sin \theta \\ y_r = y + x_e \sin \theta + y_e \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

[0052] 结合公式(2)所述坐标变换关系,可以得到AGV运动的位姿误差方程:

$$[0053] \quad p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0054] 通过对公式(3)求导,可得位姿误差微分方程:

$$[0055] \quad \dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0056] 其中,AGV的控制输入为 $q = (v, \omega)^T$, v 表示AGV中心的线速度, ω 表示AGV绕其几何中心转动的角速度; $p = (x, y, \theta)^T$ 表示AGV当前在坐标系中的位姿, (x, y) 为AGV的位置, θ 表示AGV前进方向与X轴的夹角,当AGV顺时针转向X轴时 $\theta > 0$,反之, $\theta < 0$; $\dot{x}$ 表示 x 的一阶导数,即AGV中心点在 x 轴上的速度分量; $\dot{y}$ 表示 y 的一阶导数,即AGV中心点在 y 轴上的速度分量; $\dot{\theta}$ 表示 θ 的一阶导数; $p_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$ 表示AGV当前期望的位姿; $q_r = (v_r, \omega_r)^T$ 表示参考速度指令; $p_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 表示期望位姿在参考坐标系中的坐标,且 $\theta_e = \theta_r - \theta$; $\dot{p}_e = (\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}_e)^T$ 表示AGV位姿误差的微分。

[0057] 进一步的,所述步骤2中,由于AGV运动学模型是一个非线性系统,而针对非线性的滑模控制,需要进行切换函数的设计,设计AGV轨迹跟踪过程中非线性系统的滑模控制的切换函数为:

$$[0058] \quad s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e + \arctan(v_r y_e) \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0059] 当 $x_e = 0, \theta_e = -\arctan(v_r y_e)$ 时,李雅普诺夫函数为: $V_y = \frac{1}{2} y_e^2$,则有:

$$[0060] \quad \dot{V}_y = y_e \dot{y}_e = -y_e x_e \omega - y_e v_r \sin(\arctan(y_e v_r)) \quad (6)$$

[0061] 根据引理:对于任意 $x \in \mathbb{R}$ 且 $|x| < \infty$,有 $\phi(x) = x \sin(\arctan x) \geq 0$,当且仅当 $x = 0$ 时,“=”成立,可以得到 $\dot{V}_y \leq 0$;所以当 x_e 收敛到0且 θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r y_e)$ 即 $s_1 \rightarrow 0, s_2 \rightarrow 0$ 时,能实现 $y_e \rightarrow 0$ 和 $\theta_e \rightarrow 0$;能使得AGV在轨迹跟踪过程中位姿偏差能够收敛。

[0062] 进一步的,所述步骤3中,选取基于连续函数的等速趋近律:

$$[0063] \quad \dot{s}_i = -k_i \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i}, i = 1, 2 \quad (7)$$

[0064] 结合切换函数公式 (5) 和位姿误差微分方程公式 (4), 可得系统的控制律:

$$[0065] \quad q = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e + k_1 \frac{s_1}{|s_1| + \delta_1} \\ \omega_r + \frac{\partial a}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial a}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e) + k_2 \frac{s_2}{|s_2| + \delta_2} \\ 1 + \frac{\partial a}{\partial y_e} x_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0066] 式中: δ_i 表示正小数, k_i 表示趋近系数, $a = \arctan(v_r y_e)$, $\frac{\partial a}{\partial v_r} = \frac{y_e}{1 + (v_r y_e)^2}$,

$$\frac{\partial a}{\partial y_e} = \frac{v_r}{1 + (v_r y_e)^2}。$$

[0067] 进一步的, 所述步骤4中, 确定基于AGV运动模型的位姿误差微分方程为被控对象, 通过求解被控对象的动态逆, 可以得到U模型:

$$[0068] \quad \begin{cases} v_1 = y_e \omega_2 + v_r \cos \theta_e - \dot{x}_e \\ \omega_2 = \frac{v_r \sin \theta_e - \dot{y}_e}{x_e} \\ \omega_1 = \omega_r - \dot{\theta}_e \end{cases} \quad (9)$$

[0069] 式中: v_1 表示线速度分量误差的动态逆, ω_1 表示角速度分量误差的动态逆, ω_2 表示中间变量;

[0070] 将 $\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix}$ 用基于系统控制律的 $\begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix}$ 代替, 得到被控对象动态逆的U模型控制律:

$$[0071] \quad \begin{cases} v_1 = y_e \frac{v_r \sin \theta_e - v \sin \theta}{x_e} + v_r \cos \theta_e - v \cos \theta \\ \omega_1 = \omega_r - \omega \end{cases} \quad (10)$$

[0072] 通过将公式 (8)、公式 (10) 和公式 (4) 相互联合, 组成滑模轨迹跟踪控制器、U模型和被控对象的闭环控制系统, 使AGV能够跟踪期望的目标运动轨迹。

[0073] 图2所示为差速驱动AGV运动学模型, 其中Y₀X为全局坐标系, 点O₁为AGV当前默认位置, 点r为当前期望的位置, 以点O₁为原点, 建立参考坐标系Y₁O₁X₁, (x_e, y_e, θ_e) 为参考坐标系下当前期望位置的位姿。跟踪线速度为匀速运动、角速度为正弦运动的曲线轨迹, 取 $\omega_r = \sin t$, $v_r = 1.0$, $\delta_1 = \delta_2 = 0.02$, $k_1 = k_2 = 6.0$, 位姿误差初始值为 $[3 \ 0 \ 0]$ 。

[0074] 以上所述, 仅为本发明较佳的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 可轻易想到的变化或替换, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此, 本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

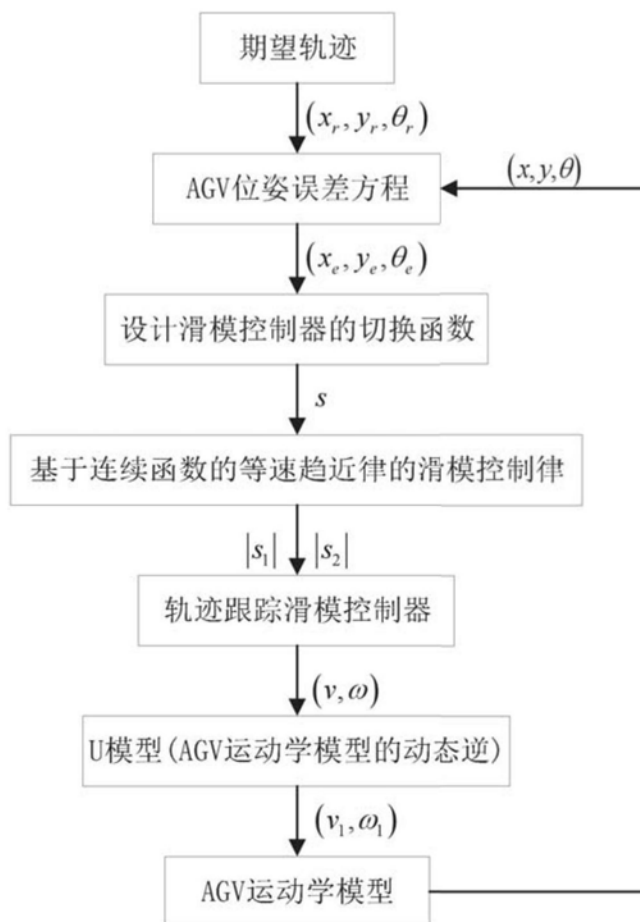


图1

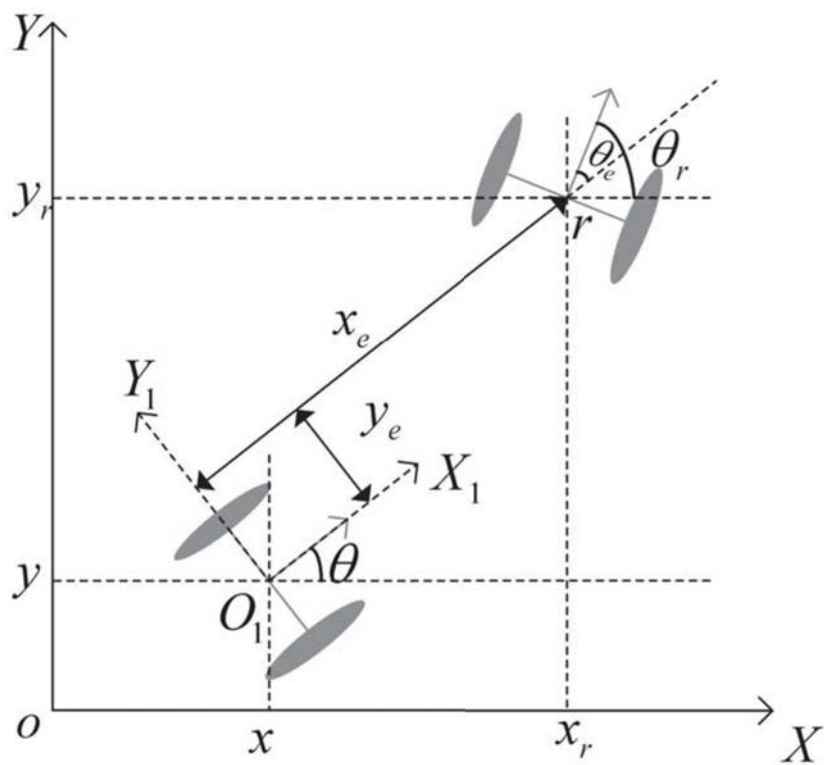


图2