



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113985868 B

(45) 授权公告日 2023. 08. 08

(21) 申请号 202111177191.5
(22) 申请日 2021.10.09
(65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 113985868 A
(43) 申请公布日 2022.01.28
(73) 专利权人 北京科技大学
 地址 100083 北京市海淀区学院路30号
 专利权人 北京科技大学顺德研究生院
(72) 发明人 白国星 孟宇 刘立 周碧宁
 郑湔清 董国新
(74) 专利代理机构 北京市广友专利事务有限
 责任公司 11237
 专利代理师 张仲波 付忠林
(51) Int.Cl.
 G05D 1/02 (2020.01)
(56) 对比文件
 CN 107867290 A, 2018.04.03
 CN 108388241 A, 2018.08.10

CN 108454623 A, 2018.08.28
CN 108897224 A, 2018.11.27
CN 109318905 A, 2019.02.12
CN 109795502 A, 2019.05.24
CN 110286683 A, 2019.09.27
CN 111158376 A, 2020.05.15
CN 111258218 A, 2020.06.09
CN 111624992 A, 2020.09.04
CN 111736617 A, 2020.10.02
CN 111806427 A, 2020.10.23
CN 111890951 A, 2020.11.06
CN 112230651 A, 2021.01.15
CN 112904849 A, 2021.06.04
CN 112947407 A, 2021.06.11
JP 2007257200 A, 2007.10.04
GUOXING BAI.Path Tracking of Wheeled
Mobile Robots Based on Dynamic Prediction
Model.《IEEE ACCESS》.2019,第7卷39690-
39694.

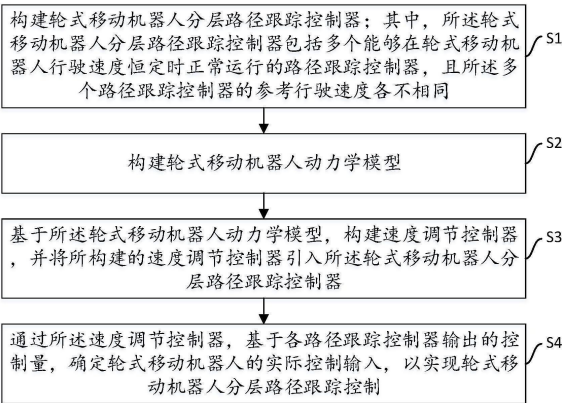
审查员 姜鸿阳

权利要求书4页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称
 一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法

(57) 摘要
 本发明公开了一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法,包括:构建轮式移动机器人分层路径跟踪控制器,其包括多个能够在轮式移动机器人行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器,且多个路径跟踪控制器的参考行驶速度各不相同;基于轮式移动机器人动力学模型,构建速度调节控制器,并将其引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;通过速度调节控制器确定轮式移动机器人的实际控制输入,从而实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。本发明的方案可以解决现有的路径跟踪控制方法仅能实现有级调速,在参考路径存在不同半径的弯道时,无法进一步提高轮式移动机器人的平均行驶速度

的问题。



CN 113985868 B

1. 一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法,其特征在于,包括:

构建轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;其中,所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器包括多个能够在轮式移动机器人行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器,且所述多个路径跟踪控制器的参考行驶速度各不相同;

构建轮式移动机器人动力学模型;

基于所述轮式移动机器人动力学模型,构建速度调节控制器,并将所构建的速度调节控制器引入所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;

通过所述速度调节控制器,基于各路径跟踪控制器输出的控制量,确定轮式移动机器人的实际控制输入,以实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制;

所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器包括第一路径跟踪控制器、第二路径跟踪控制器以及第三路径跟踪控制器;

所述第一路径跟踪控制器的参考行驶速度设定为低于当前行驶速度,且所述第一路径跟踪控制器的参考行驶速度与当前行驶速度之间的差值绝对值不大于紧急制动时轮式移动机器人在一个控制周期内可降低的速度的最大值;

所述第二路径跟踪控制器的参考行驶速度设定为等于当前行驶速度;

所述第三路径跟踪控制器的参考行驶速度设定为高于当前行驶速度,且所述第三路径跟踪控制器的参考行驶速度与当前行驶速度之间的差值绝对值不大于轮式移动机器人在一个控制周期内可以提高的速度的最大值;

所述第一路径跟踪控制器、所述第二路径跟踪控制器以及所述第三路径跟踪控制器均为基于运动学模型的非线性模型预测控制器;

所述轮式移动机器人为两轮差动轮式移动机器人;

所述构建轮式移动机器人动力学模型,包括:

以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点,驱动轮所在轴线为y轴,机器人左侧为y轴正方向,以机器人前后向中轴线为x轴,机器人前方为x轴正方向,建立固结于两轮差动轮式移动机器人的坐标系;

假设两轮差动轮式移动机器人装载货物后的整体质心在所述坐标系中的x坐标为 l_x ,y坐标为 l_y ,建立如下数学模型:

$$\begin{cases} \dot{v}_y = (F_{y1} + F_{yr}) / m - v_x \omega \\ \dot{\omega} = \left((-F_{x1} (l_w / 2 - l_y) + F_{xr} (l_w / 2 + l_y)) - (F_{y1} + F_{yr}) l_x \right) / I_z \end{cases}$$

其中, v_x 为质心处的纵向速度, v_y 为质心处的横向速度, ω 为质心处的横摆角速度, F_{y1} 为左侧驱动轮的横向力, F_{yr} 为右侧驱动轮的横向力, m 为移动机器人质量, l_w 为移动机器人宽度, I_z 为移动机器人绕垂直方向的转动惯量, F_{x1} 为左侧驱动轮的驱动力, F_{xr} 为右侧驱动轮的驱动力; $\dot{v}_y$ 、 $\dot{\omega}$ 分别表示 v_y 、 ω 的微分变量,即横向加速度、横摆角加速度;根据刚体运动学,得到左侧驱动轮的纵向速度 v_{x1} 为:

$$v_{x1} = v_x - \omega (l_w / 2 - l_y)$$

左侧驱动轮的横向速度 v_{y1} 为:

$$v_{y1} = v_y - \omega l_x$$

右侧驱动轮的纵向速度 v_{xr} 为:

$$v_{xr} = v_x + \omega (l_w/2 + l_y)$$

右侧驱动轮的横向速度 v_{yr} 为:

$$v_{yr} = v_y - \omega l_x$$

将机器人驱动轮所在轴线的中点在大地坐标系下的运动学状态表示为:

$$\begin{cases} \dot{X} = (v_x + \omega l_y) \cos \theta - (v_y - \omega l_x) \sin \theta \\ \dot{Y} = (v_x + \omega l_y) \sin \theta + (v_y - \omega l_x) \cos \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

其中, X 为横坐标, Y 为纵坐标, θ 为航向角; $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 、 $\dot{\theta}$ 分别表示 X 、 Y 、 θ 的微分变量;

根据侧偏角计算公式,得到左右侧驱动力的侧偏角 α_l 和 α_r :

$$\begin{cases} \alpha_l = \arctan(v_{yl} / v_{xl}) \\ \alpha_r = \arctan(v_{yr} / v_{xr}) \end{cases}$$

根据关于横向力的魔术公式 $f_{MF}()$ 可知,左右侧横向力为:

$$\begin{cases} F_{yl} = f_{MF}(\alpha_l) \\ F_{yr} = f_{MF}(\alpha_r) \end{cases}$$

联立上述所有公式,建立以左右侧驱动轮的驱动力为输入的两轮差动轮式移动机器人动力学模型,并将其抽象为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} \subset \mathbf{x} \end{cases}$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [X \ Y \ \theta \ v_y \ F_{yl} \ F_{yr} \ \alpha_l \ \alpha_r \ v_{xl} \ v_{yl} \ v_{xr} \ v_{yr}]^T \\ \mathbf{u} = [v_x \ \omega]^T \\ \mathbf{y} = [X \ Y \ \theta \ \alpha_l \ \alpha_r]^T \end{cases}$$

其中, $\dot{\mathbf{x}}$ 为 $\mathbf{x}$ 的微分变量, $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{u}$ 的函数;

基于所述轮式移动机器人动力学模型,构建速度调节控制器,包括:

基于欧拉法离散化所述动力学模型,并写为非线性迭代的形式:

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}(1|t) &= \mathbf{x}(0|t) + Tf(\mathbf{x}(0|t), \mathbf{u}(1|t)) \\
&\vdots \\
\mathbf{x}(i|t) &= \mathbf{x}(i-1|t) + Tf(\mathbf{x}(i-1|t), \mathbf{u}(i|t)) \\
&\vdots \\
\mathbf{x}(N_c|t) &= \mathbf{x}(N_c-1|t) + Tf(\mathbf{x}(N_c-1|t), \mathbf{u}(N_c|t)) \\
&\vdots \\
\mathbf{x}(N_p|t) &= \mathbf{x}(N_p-1|t) + Tf(\mathbf{x}(N_p-1|t), \mathbf{u}(N_c|t))
\end{aligned}$$

其中, $\mathbf{x}(i|t)$ 表示 t 时刻的第 i 个预测状态, $\mathbf{u}(i|t)$ 表示 t 时刻的第 i 个预测输入, T 表示迭代周期, N_c 表示控制步数, N_p 表示预测步数;

得每步迭代对应的模型输出:

$$\mathbf{y}(i|t) \subset \mathbf{x}(i|t), i = 1, 2, \dots, N_p$$

将速度调节控制器的优化目标函数中关于 X , Y 和 θ 的误差的惩罚项设计为:

$$J_1 = \left(Q_1 \sum_{i=1}^{N_p} \|X(i|t) - X_{\text{ref}}(i|t)\|^2 + Q_2 \sum_{i=1}^{N_p} \|Y(i|t) - Y_{\text{ref}}(i|t)\|^2 + Q_3 \sum_{i=1}^{N_p} \|\theta(i|t) - \theta_{\text{ref}}(i|t)\|^2 \right)$$

其中, 下标 ref 表示参考值, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 表示权重系数; $X(i|t)$ 、 $Y(i|t)$ 、 $\theta(i|t)$ 分别表示 t 时刻预测模型输出的第 i 个横坐标、纵坐标和航向角; $X_{\text{ref}}(i|t)$ 、 $Y_{\text{ref}}(i|t)$ 、 $\theta_{\text{ref}}(i|t)$ 分别表示 t 时刻的第 i 个横坐标参考值、纵坐标参考值和航向角参考值;

针对 α_l 和 α_r , 设计如下分段函数:

$$\begin{cases} \alpha_{el}(i|t) = |\alpha_l(i|t)| - \alpha_{\max}, & \text{如果 } |\alpha_l(i|t)| > \alpha_{\max} \\ \alpha_{el}(i|t) = 0, & \text{如果 } |\alpha_l(i|t)| \leq \alpha_{\max} \\ \alpha_{er}(i|t) = |\alpha_r(i|t)| - \alpha_{\max}, & \text{如果 } |\alpha_r(i|t)| > \alpha_{\max} \\ \alpha_{er}(i|t) = 0, & \text{如果 } |\alpha_r(i|t)| \leq \alpha_{\max} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N_p$$

其中, $\alpha_{\max}$ 表示轮胎处于线性范围的最大侧偏角, $\alpha_{el}(i|t)$ 和 $\alpha_{er}(i|t)$ 分别表示 t 时刻的第 i 个左、右侧驱动轮侧偏角优化目标值; $\alpha_l(i|t)$ 、 $\alpha_r(i|t)$ 分别表示 t 时刻预测模型输出的第 i 个左、右侧驱动轮侧偏角; 将关于侧滑的优化目标函数设计为:

$$J_2 = R \left(\sum_{i=1}^{N_p} \|\alpha_{el}(i|t)\|^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \|\alpha_{er}(i|t)\|^2 \right)$$

其中, R 为权重系数;

轮式移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数即:

$$J = J_1 + J_2$$

其中, J 表示轮式移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数。

2. 如权利要求1所述的轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法, 其特征在于, N_c 的取值为1。

3. 如权利要求2所述的轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法, 其特征在于, 通过速度调节控制器, 基于各路径跟踪控制器输出的控制量确定轮式移动机器人的实际控制输

入,以实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制,包括:

将第一路径跟踪控制器产生的控制量 u_A 、第二路径跟踪控制器产生的控制量 u_B 以及第三路径跟踪控制器产生的控制量 u_C 分别代入所述优化目标函数,分别得到第一路径跟踪控制器对应的优化目标函数值 J_A ,第二路径跟踪控制器对应的优化目标函数值 J_B ,第三路径跟踪控制器对应的优化目标函数值 J_C ;

最终分层路径跟踪控制器输出的控制量 u_{out} 为:

$$u_{out} = \begin{cases} u_A, & J_B > J_A + \mu_1 \\ u_B, & J_B \leq J_A + \mu_1 \ \& \ J_C > J_B + \mu_2 \\ u_C, & J_B \leq J_A + \mu_1 \ \& \ J_C \leq J_B + \mu_2 \end{cases}$$

其中, μ_1 和 μ_2 为预设的正数值;

将 u_{out} 作为实际控制输入,以实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。

一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法

技术领域

[0001] 本发明涉及机器人自主行驶控制技术领域,特别涉及一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法。

背景技术

[0002] 轮式移动机器人是一种常用于物流、仓储等行业的运输设备,其自主运行的关键技术中包括路径跟踪控制,其功能是控制机器人沿着给定参考路径行驶,控制目标是使机器人与参考路径之间的横向偏差和航向偏差达到最小。

[0003] 目前常见的轮式移动机器人路径跟踪控制方法无法避免轮式移动机器人在高速转向时发生侧滑,因此一般在轮式移动机器人行驶速度较低的情况下运行。目前还存在一种采用模糊控制实现速度调节的轮式移动机器人路径跟踪控制方法(Bai G,Meng Y,Liu L,et al.Anti-sideslip path tracking of wheeled mobile robots based on fuzzy model predictive control[J].Electronics Letters,2020,56(10):490-493.),该方法的技术特征包括:采用模糊控制作为速度调节器,采用基于运动学预测模型的路径跟踪控制器实现在不同速度下的路径跟踪控制。这种控制方法的局限在于模糊控制仅能实现有级调速,在参考路径存在不同半径的弯道时,该方法无法进一步提高轮式移动机器人的平均行驶速度。

发明内容

[0004] 本发明提供了一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法,以解决现有的路径跟踪控制方法仅能实现有级调速,在参考路径存在不同半径的弯道时,无法进一步提高轮式移动机器人的平均行驶速度的技术问题。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提供了如下技术方案:

[0006] 一方面,本发明提供了一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法,该轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法包括:

[0007] 构建轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;其中,所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器包括多个能够在轮式移动机器人行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器,且所述多个路径跟踪控制器的参考行驶速度各不相同;

[0008] 构建轮式移动机器人动力学模型;

[0009] 基于所述轮式移动机器人动力学模型,构建速度调节控制器,并将所构建的速度调节控制器引入所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;

[0010] 通过所述速度调节控制器,基于各路径跟踪控制器输出的控制量,确定轮式移动机器人的实际控制输入,以实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。

[0011] 进一步地,所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器包括第一路径跟踪控制器、第二路径跟踪控制器以及第三路径跟踪控制器。

[0012] 进一步地,所述第一路径跟踪控制器的参考行驶速度设定为低于当前行驶速度,

且第一路径跟踪控制器的参考行驶速度与当前行驶速度之间的差值绝对值不大于紧急制动时轮式移动机器人在一个控制周期内可降低的速度的最大值；

[0013] 所述第二路径跟踪控制器的参考行驶速度设定为等于当前行驶速度；

[0014] 所述第三路径跟踪控制器的参考行驶速度设定为高于当前行驶速度，且所述第三路径跟踪控制器的参考行驶速度与当前行驶速度之间的差值绝对值不大于轮式移动机器人在一个控制周期内可以提高的速度的最大值。

[0015] 进一步地，所述第一路径跟踪控制器、所述第二路径跟踪控制器以及所述第三路径跟踪控制器均为基于运动学模型的非线性模型预测控制器。

[0016] 进一步地，所述轮式移动机器人为两轮差动轮式移动机器人；

[0017] 所述构建轮式移动机器人动力学模型，包括：

[0018] 以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点，驱动轮所在轴线为y轴，机器人左侧为y轴正方向，以机器人前后向中轴线为x轴，机器人前方为x轴正方向，建立固结于两轮差动轮式移动机器人的坐标系；

[0019] 假设两轮差动轮式移动机器人装载货物后的整体质心在所述坐标系中的x坐标为 l_x ，y坐标为 l_y ，建立如下数学模型：

$$[0020] \quad \begin{cases} \dot{v}_y = (F_{y1} + F_{yr}) / m - v_x \omega \\ \dot{\omega} = \left((-F_{x1}(l_w/2 - l_y) + F_{xr}(l_w/2 + l_y)) - (F_{y1} + F_{yr})l_x \right) / I_z \end{cases}$$

[0021] 其中， v_x 为质心处的纵向速度， v_y 为质心处的横向速度， ω 为质心处的横摆角速度， F_{y1} 为左侧驱动轮的横向力， F_{yr} 为右侧驱动轮的横向力， m 为移动机器人质量， l_w 为移动机器人宽度， I_z 为移动机器人绕垂直方向的转动惯量， F_{x1} 为左侧驱动轮的驱动力， F_{xr} 为右侧驱动轮的驱动力； $\dot{v}_y$ 、 $\dot{\omega}$ 分别表示 v_y 、 ω 的微分变量，即横向加速度、横摆角加速度；

[0022] 根据刚体运动学，得到左侧驱动轮的纵向速度 v_{x1} 为：

$$[0023] \quad v_{x1} = v_x - \omega (l_w/2 - l_y)$$

[0024] 左侧驱动轮的横向速度 v_{y1} 为：

$$[0025] \quad v_{y1} = v_y - \omega l_x$$

[0026] 右侧驱动轮的纵向速度 v_{xr} 为：

$$[0027] \quad v_{xr} = v_x + \omega (l_w/2 + l_y)$$

[0028] 右侧驱动轮的横向速度 v_{yr} 为：

$$[0029] \quad v_{yr} = v_y + \omega l_x$$

[0030] 将机器人驱动轮所在轴线的中点在大地坐标系下的运动学状态表示为：

$$[0031] \quad \begin{cases} \dot{X} = (v_x + \omega l_y) \cos \theta - (v_y - \omega l_x) \sin \theta \\ \dot{Y} = (v_x + \omega l_y) \sin \theta + (v_y - \omega l_x) \cos \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

[0032] 其中，X为横坐标，Y为纵坐标， θ 为航向角； $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 、 $\dot{\theta}$ 分别表示X、Y、 θ 的微分变量；

[0033] 根据侧偏角计算公式，得到左右侧驱动力的侧偏角 α_1 和 α_r ：

$$[0034] \quad \begin{cases} \alpha_l = \arctan(v_{yl} / v_{xl}) \\ \alpha_r = \arctan(v_{yr} / v_{xr}) \end{cases}$$

[0035] 根据关于横向力的魔术公式 $f_{MF}()$ 可知,左右侧横向力为:

$$[0036] \quad \begin{cases} F_{yl} = f_{MF}(\alpha_l) \\ F_{yr} = f_{MF}(\alpha_r) \end{cases}$$

[0037] 联立上述所有公式,建立以左右侧驱动轮的驱动力为输入的两轮差动轮式移动机器人动力学模型,并将其抽象为:

$$[0038] \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} \subset \mathbf{x} \end{cases}$$

[0039] 其中:

$$[0040] \quad \begin{cases} \mathbf{x} = [X \ Y \ \theta \ v_y \ F_{yl} \ F_{yr} \ \alpha_l \ \alpha_r \ v_{xl} \ v_{yl} \ v_{xr} \ v_{yr}]^T \\ \mathbf{u} = [v_x \ \omega]^T \\ \mathbf{y} = [X \ Y \ \theta \ \alpha_l \ \alpha_r]^T \end{cases}$$

[0041] 其中, $\dot{\mathbf{x}}$ 为 $\mathbf{x}$ 的微分变量, $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{u}$ 的函数。

[0042] 进一步地,基于轮式移动机器人动力学模型,构建速度调节控制器,包括:

[0043] 基于欧拉法离散化所述动力学模型,并写为非线性迭代的形式:

$$[0044] \quad \mathbf{x}(1|t) = \mathbf{x}(0|t) + T f(\mathbf{x}(0|t), \mathbf{u}(1|t))$$

[0045] $\vdots$

$$[0046] \quad \mathbf{x}(i|t) = \mathbf{x}(i-1|t) + T f(\mathbf{x}(i-1|t), \mathbf{u}(i|t))$$

[0047] $\vdots$

$$[0048] \quad \mathbf{x}(N_c|t) = \mathbf{x}(N_c-1|t) + T f(\mathbf{x}(N_c-1|t), \mathbf{u}(N_c|t))$$

[0049] $\vdots$

$$[0050] \quad \mathbf{x}(N_p|t) = \mathbf{x}(N_p-1|t) + T f(\mathbf{x}(N_p-1|t), \mathbf{u}(N_p|t))$$

[0051] 其中, $\mathbf{x}(i|t)$ 表示 t 时刻的第 i 个预测状态, $\mathbf{u}(i|t)$ 表示 t 时刻的第 i 个预测输入, T 表示迭代周期, N_c 表示控制步数, N_p 表示预测步数;

[0052] 得每步迭代对应的模型输出:

$$[0053] \quad \mathbf{y}(i|t) \subset \mathbf{x}(i|t), \quad i=1,2,\dots,N_p$$

[0054] 将速度调节控制器的优化目标函数中关于 X 、 Y 和 θ 的误差的惩罚项设计为:

$$[0055] \quad J_1 = \left(Q_1 \sum_{i=1}^{N_p} \|X(i|t) - X_{\text{ref}}(i|t)\|^2 + Q_2 \sum_{i=1}^{N_p} \|Y(i|t) - Y_{\text{ref}}(i|t)\|^2 + Q_3 \sum_{i=1}^{N_p} \|\theta(i|t) - \theta_{\text{ref}}(i|t)\|^2 \right)$$

[0056] 其中,下标ref表示参考值, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 表示权重系数; $X(i|t)$ 、 $Y(i|t)$ 、 $\theta(i|t)$ 分别表示 t 时刻预测模型输出的第 i 个横坐标、纵坐标和航向角; $X_{\text{ref}}(i|t)$ 、 $Y_{\text{ref}}(i|t)$ 、 $\theta_{\text{ref}}(i|t)$ 分别表示 t 时刻的第 i 个横坐标参考值、纵坐标参考值和航向角参考值;

[0057] 针对 α_l 和 α_r ,设计如下分段函数:

$$[0058] \quad \begin{cases} \alpha_{el}(i|t) = |\alpha_l(i|t)| - \alpha_{\max}, & \text{如果 } |\alpha_l(i|t)| > \alpha_{\max} \\ \alpha_{el}(i|t) = 0, & \text{如果 } |\alpha_l(i|t)| \leq \alpha_{\max} \\ \alpha_{er}(i|t) = |\alpha_r(i|t)| - \alpha_{\max}, & \text{如果 } |\alpha_r(i|t)| > \alpha_{\max} \\ \alpha_{er}(i|t) = 0, & \text{如果 } |\alpha_r(i|t)| \leq \alpha_{\max} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N_p$$

[0059] 其中, $\alpha_{\max}$ 表示轮胎处于线性范围的最大侧偏角, $\alpha_{el}(i|t)$ 和 $\alpha_{er}(i|t)$ 分别表示t时刻的第i个左、右侧驱动轮侧偏角优化目标值; $\alpha_l(i|t)$ 、 $\alpha_r(i|t)$ 分别表示t时刻预测模型输出的第i个左、右侧驱动轮侧偏角;

[0060] 将关于侧滑的优化目标函数设计为:

$$[0061] \quad J_2 = R \left(\sum_{i=1}^{N_p} \|\alpha_{el}(i|t)\|^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \|\alpha_{er}(i|t)\|^2 \right)$$

[0062] 其中,R为权重系数;

[0063] 轮式移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数即:

$$[0064] \quad J = J_1 + J_2$$

[0065] 其中,J表示轮式移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数。

[0066] 进一步地, N_c 的取值为1。

[0067] 进一步地,通过速度调节控制器基于各路径跟踪控制器输出的控制量确定轮式移动机器人的实际控制输入实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制,包括:

[0068] 将第一路径跟踪控制器产生的控制量 u_A 、第二路径跟踪控制器产生的控制量 u_B 以及第三路径跟踪控制器产生的控制量 u_C 分别代入所述优化目标函数,分别得到第一路径跟踪控制器对应的优化目标函数值 J_A ,第二路径跟踪控制器对应的优化目标函数值 J_B ,第三路径跟踪控制器对应的优化目标函数值 J_C ;

[0069] 最终分层路径跟踪控制器输出的控制量 u_{out} 为:

$$[0070] \quad u_{out} = \begin{cases} u_A, & J_B > J_A + \mu_1 \\ u_B, & J_B \leq J_A + \mu_1 \text{ \& } J_C > J_B + \mu_2 \\ u_C, & J_B \leq J_A + \mu_1 \text{ \& } J_C \leq J_B + \mu_2 \end{cases}$$

[0071] 其中, μ_1 和 μ_2 为预设的正数值;

[0072] 将 u_{out} 作为实际控制输入,以实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。

[0073] 再一方面,本发明还提供了一种电子设备,其包括处理器和存储器;其中,存储器中存储有至少一条指令,所述指令由处理器加载并执行以实现上述方法。

[0074] 又一方面,本发明还提供了一种计算机可读存储介质,所述存储介质中存储有至少一条指令,所述指令由处理器加载并执行以实现上述方法。

[0075] 本发明提供的技术方案带来的有益效果至少包括:

[0076] 本发明首先建立轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,并将能够在行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,然后基于轮式移动机器人动力学模型建立速度调节控制器,并将其引入轮式移动机器人分层路径跟踪

控制框架,从而实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。可以解决现有的路径跟踪控制方法仅能实现有级调速,在参考路径存在不同半径的弯道时,无法进一步提高轮式移动机器人的平均行驶速度的问题。

附图说明

[0077] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,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。

[0078] 图1是本发明实施例提供的轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法的流程示意图;

[0079] 图2是本发明实施例提供的轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法所设计的分层控制框架的结构示意图;

[0080] 图3是轮式移动机器人受力分析图;

[0081] 图4是轮式移动机器人在全局坐标系中的运动关系的示意图。

具体实施方式

[0082] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0083] 第一实施例

[0084] 针对现有技术方案仅能实现有级调速,在参考路径存在不同半径的弯道时,无法进一步提高轮式移动机器人的平均行驶速度的问题,本实施例提供了一种轮式移动机器人分层路径跟踪控制实现方法,适用于高速行驶的轮式移动机器人,该方法可以由电子设备实现,该方法执行流程如图1所示,包括以下步骤:

[0085] S1,构建轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;其中,所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器包括多个能够在轮式移动机器人行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器,且所述多个路径跟踪控制器的参考行驶速度各不相同;

[0086] S2,构建轮式移动机器人动力学模型;

[0087] S3,基于所述轮式移动机器人动力学模型,构建速度调节控制器,并将所构建的速度调节控制器引入所述轮式移动机器人分层路径跟踪控制器;

[0088] S4,通过所述速度调节控制器,基于各路径跟踪控制器输出的控制量,确定轮式移动机器人的实际控制输入,以实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。

[0089] 本实施例中,为了执行S2至S4,首先需要先建立轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,并将能够在行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架。具体地,如图2所示,本实施例提出的分层路径跟踪控制器包含三个路径跟踪控制器和一个速度调节控制器。

[0090] 假设三个路径跟踪控制器分别为控制器A、控制器B和控制器C。其中,控制器A的参考行驶速度设定为低于当前行驶速度,两者之间的差值绝对值不大于紧急制动时轮式移动机器人在一个控制周期内可以降低的速度的最大值。控制器B的参考行驶速度设定为等于

当前行驶速度。控制器C的参考行驶速度设定为高于当前行驶速度,两者之间的差值绝对值不大于轮式移动机器人在一个控制周期内可以提高的速度的最大值。

[0091] 控制器A、控制器B和控制器C的区别仅为参考行驶速度,可以采用目前的任意一种可以在行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器充当控制器A、控制器B和控制器C,如基于运动学模型的非线性模型预测控制器(Bai G,Meng Y,Liu L,et al.Anti-sideslip path tracking of wheeled mobile robots based on fuzzy model predictive control[J].Electronics Letters,2020,56(10):490-493.)。

[0092] 在建立轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,并将能够在行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架后,即可开始执行S2至S4,实现基于轮式移动机器人动力学模型建立速度调节控制器,并将其引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,具体过程如下:

[0093] 首先,需要说明的是,本实施例提出的方法适用于前轮转向(即阿克曼转向)的四轮移动机器人,其结构形式是前轴两轮可偏转,后轴两轮不偏转;前轮转向(即阿克曼转向)的三轮移动机器人,其结构形式是前轴一轮可偏转,后轴两轮不偏转;四轮转向轮式移动机器人,其结构形式是前、后轴四个轮胎均可偏转;四轮差动轮式移动机器人,其结构形式是前、后轴的四个轮胎均不偏转;两轮差动轮式移动机器人,其结构形式是驱动轴两轮不偏转,可能配置若干个随动的万向轮;折腰转向(即铰接转向)的轮式移动机器人,其结构形式是轮胎均不偏转,通过改变前、后车体之间的铰接角实现转向。考虑到这些轮式移动机器人的建模原理均一致,其理论基础均为刚体动力学和轮胎力学,因此本实施例以两轮差动轮式移动机器人为例进行说明。

[0094] 如图3所示,可使用本实施例提出方法的两轮差动轮式移动机器人的形式结构是机器人前后端安装两个随动万向轮,中部左右侧各安装一个独立驱动的驱动轮。固结于轮式移动机器人的坐标系以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点,驱动轮所在轴线为y轴,机器人左侧为y轴正方向,以机器人前后向中轴线为x轴,机器人前方为x轴正方向。轮式移动机器人装载货物后的整体质心在前述坐标系中的x坐标为 l_x ,y坐标为 l_y 。 l_x 与 l_y 是每次装载时通过称重等系统测量的变量,同时轮式移动机器人装载货物后的质量 m 、转动惯量 I_z 也在每次装载时通过称重等系统测量获得。 v_x 为质心处的纵向速度, v_y 为质心处的横向速度, ω 为质心处的横摆角速度, F_{x1} 为左侧驱动轮的驱动力, F_{xr} 为右侧驱动轮的驱动力, F_{y1} 为左侧驱动轮的横向力, F_{yr} 为右侧驱动轮的横向力, l_w 为移动机器人宽度。

[0095] 基于上述,上述S2至S4的实现过程如下:

[0096] 首先针对轮式移动机器人进行动力学建模,过程如下:

[0097] 建立固结于两轮差动轮式移动机器人的坐标系。考虑到两轮差动轮式移动机器人的形式结构是机器人前后端安装两个随动万向轮,中部左右侧各安装一个独立驱动的驱动轮,因此如图3所示,该坐标系以机器人驱动轮所在轴线的中点为原点,驱动轮所在轴线为y轴,机器人左侧为y轴正方向,以机器人前后向中轴线为x轴,机器人前方为x轴正方向。在此基础上可以假设两轮差动轮式移动机器人装载货物后的整体质心在前述坐标系中的x坐标为 l_x ,y坐标为 l_y 。

[0098] 考虑到万向轮受力很小,受力分析时可以将万向轮忽略不计,因此可以如图3所示,建立如下动力学模型:

$$[0099] \quad \begin{cases} \dot{v}_y = (F_{y1} + F_{y2}) / m - v_x \omega \\ \dot{\omega} = \left((-F_{x1}(l_w/2 - l_y) + F_{x2}(l_w/2 + l_y)) - (F_{y1} + F_{y2})l_x \right) / I_z \end{cases}$$

[0100] 其中, v_x 为质心处的纵向速度, v_y 为质心处的横向速度, ω 为质心处的横摆角速度, F_{y1} 为左侧驱动轮的横向力, F_{y2} 为右侧驱动轮的横向力, m 为移动机器人质量, l_w 为移动机器人宽度, I_z 为移动机器人绕垂直方向的转动惯量, F_{x1} 为左侧驱动轮的驱动力, F_{x2} 为右侧驱动轮的驱动力; $\dot{v}_y$ 、 $\dot{\omega}$ 分别表示 v_y 、 ω 的微分变量, 即横向加速度、横摆角加速度;

[0101] 考虑到控制轮式移动机器人纵向速度和横摆角速度的方法已经十分成熟, 因此本实施例假设轮式移动机器人纵向速度和横摆角速度可控, 且上述模型直接以之作为控制输入。

[0102] 在此基础上, 根据刚体运动学, 可得左侧驱动轮的纵向速度 v_{x1} 为:

$$[0103] \quad v_{x1} = v_x - \omega (l_w/2 - l_y)$$

[0104] 左侧驱动轮的横向速度 v_{y1} 为:

$$[0105] \quad v_{y1} = v_y - \omega l_x$$

[0106] 右侧驱动轮的纵向速度 v_{x2} 为:

$$[0107] \quad v_{x2} = v_x + \omega (l_w/2 + l_y)$$

[0108] 右侧驱动轮的横向速度 v_{y2} 为:

$$[0109] \quad v_{y2} = v_y + \omega l_x$$

[0110] 此外, 如图4所示, 机器人驱动轮所在轴线的中点在大地坐标系下的运动学状态可以表示为:

$$[0111] \quad \begin{cases} \dot{X} = (v_x + \omega l_y) \cos \theta - (v_y - \omega l_x) \sin \theta \\ \dot{Y} = (v_x + \omega l_y) \sin \theta + (v_y - \omega l_x) \cos \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

[0112] 其中, X 为横坐标, Y 为纵坐标, θ 为航向角; $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 、 $\dot{\theta}$ 分别表示 X 、 Y 、 θ 的微分变量;

[0113] 根据侧偏角计算公式, 可得左右侧驱动力的侧偏角 α_1 和 α_2 :

$$[0114] \quad \begin{cases} \alpha_1 = \arctan(v_{y1} / v_{x1}) \\ \alpha_2 = \arctan(v_{y2} / v_{x2}) \end{cases}$$

[0115] 又根据关于横向力的魔术公式 $f_{MF}()$ 可知, 左右侧横向力为:

$$[0116] \quad \begin{cases} F_{y1} = f_{MF}(\alpha_1) \\ F_{y2} = f_{MF}(\alpha_2) \end{cases}$$

[0117] 联立上述所有公式, 即可建立以左右侧驱动轮的驱动力为输入的两轮差动轮式移动机器人动力学模型, 并将其抽象为:

$$[0118] \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} \subset \mathbf{x} \end{cases}$$

[0119] 其中:

$$[0120] \quad \begin{cases} \mathbf{x} = [X \ Y \ \theta \ v_y \ F_{yl} \ F_{yr} \ \alpha_l \ \alpha_r \ v_{xl} \ v_{yl} \ v_{xr} \ v_{yr}]^T \\ \mathbf{u} = [v_x \ \omega]^T \\ \mathbf{y} = [X \ Y \ \theta \ \alpha_l \ \alpha_r]^T \end{cases}$$

[0121] 其中, $\dot{\mathbf{x}}$ 为 $\mathbf{x}$ 的微分变量, $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{u}$ 的函数。

[0122] 基于欧拉法离散化上述动力学模型, 并写为非线性迭代的形式:

$$[0123] \quad \mathbf{x}(1|t) = \mathbf{x}(0|t) + T f(\mathbf{x}(0|t), \mathbf{u}(1|t))$$

[0124] $\vdots$

$$[0125] \quad \mathbf{x}(i|t) = \mathbf{x}(i-1|t) + T f(\mathbf{x}(i-1|t), \mathbf{u}(i|t))$$

[0126] $\vdots$

$$[0127] \quad \mathbf{x}(N_c|t) = \mathbf{x}(N_c-1|t) + T f(\mathbf{x}(N_c-1|t), \mathbf{u}(N_c|t))$$

[0128] $\vdots$

$$[0129] \quad \mathbf{x}(N_p|t) = \mathbf{x}(N_p-1|t) + T f(\mathbf{x}(N_p-1|t), \mathbf{u}(N_p|t))$$

[0130] 其中, $\mathbf{x}(i|t)$ 表示 t 时刻的第 i 个预测状态, $\mathbf{u}(i|t)$ 表示 t 时刻的第 i 个预测输入, T 表示迭代周期, N_c 表示控制步数, N_p 表示预测步数;

[0131] 在设计速度调节控制器时, N_c 取 1。

[0132] 然后可得每步迭代对应的模型输出:

$$[0133] \quad \mathbf{y}(i|t) \subset \mathbf{x}(i|t), \quad i = 1, 2, \dots, N_p$$

[0134] 以此为基础, 可以将速度调节控制器的优化目标函数中关于 X , Y 和 θ 的误差的惩罚项设计为:

$$[0135] \quad J_1 = \left(Q_1 \sum_{i=1}^{N_p} \|X(i|t) - X_{\text{ref}}(i|t)\|^2 + Q_2 \sum_{i=1}^{N_p} \|Y(i|t) - Y_{\text{ref}}(i|t)\|^2 + Q_3 \sum_{i=1}^{N_p} \|\theta(i|t) - \theta_{\text{ref}}(i|t)\|^2 \right)$$

[0136] 其中, 下标 ref 表示参考值, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 表示权重系数; $X(i|t)$ 、 $Y(i|t)$ 、 $\theta(i|t)$ 分别表示 t 时刻预测模型输出的第 i 个横坐标、纵坐标和航向角; $X_{\text{ref}}(i|t)$ 、 $Y_{\text{ref}}(i|t)$ 、 $\theta_{\text{ref}}(i|t)$ 分别表示 t 时刻的第 i 个横坐标参考值、纵坐标参考值和航向角参考值;

[0137] 针对 α_l 和 α_r , 考虑到轮式移动机器人在侧偏角较小时仍能正常行驶, 因此可以设计如下分段函数:

$$[0138] \quad \begin{cases} \alpha_{el}(i|t) = |\alpha_l(i|t)| - \alpha_{\max}, & \text{如果 } |\alpha_l(i|t)| > \alpha_{\max} \\ \alpha_{el}(i|t) = 0, & \text{如果 } |\alpha_l(i|t)| \leq \alpha_{\max} \\ \alpha_{er}(i|t) = |\alpha_r(i|t)| - \alpha_{\max}, & \text{如果 } |\alpha_r(i|t)| > \alpha_{\max} \\ \alpha_{er}(i|t) = 0, & \text{如果 } |\alpha_r(i|t)| \leq \alpha_{\max} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N_p$$

[0139] 其中, $\alpha_{\max}$ 表示轮胎处于线性范围的最大侧偏角, $\alpha_{el}(i|t)$ 和 $\alpha_{er}(i|t)$ 分别表示 t 时刻的第 i 个左、右侧驱动轮侧偏角优化目标值; $\alpha_l(i|t)$ 、 $\alpha_r(i|t)$ 分别表示 t 时刻预测模型输出的第 i 个左、右侧驱动轮侧偏角;

[0140] 以此为基础,关于侧滑的优化目标函数可以设计为:

$$[0141] \quad J_2 = R \left(\sum_{i=1}^{N_p} \|\alpha_{el}(i|t)\|^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \|\alpha_{er}(i|t)\|^2 \right)$$

[0142] 其中,R为权重系数;

[0143] 轮式移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数即:

$$[0144] \quad J = J_1 + J_2$$

[0145] 其中,J表示轮式移动机器人路径跟踪控制最终的优化目标函数。

[0146] 考虑到基于运动学模型的非线性模型预测控制器给出的控制量也是轮式移动机器人纵向速度和横摆角速度,因此可以将控制器A产生的控制量 u_A 、控制器B产生的控制量 u_B 以及控制器C产生的控制量 u_C 分别代入上述优化目标函数,分别得到控制器A对应的优化目标函数值 J_A ,控制器B对应的优化目标函数值 J_B ,控制器C对应的优化目标函数值 J_C 。

[0147] 最终分层路径跟踪控制器输出的控制量 u_{out} 为:

$$[0148] \quad u_{out} = \begin{cases} u_A, & J_B > J_A + \mu_1 \\ u_B, & J_B \leq J_A + \mu_1 \text{ \& } J_C > J_B + \mu_2 \\ u_C, & J_B \leq J_A + \mu_1 \text{ \& } J_C \leq J_B + \mu_2 \end{cases}$$

[0149] 其中, μ_1 和 μ_2 为适当大小的正数;

[0150] 将 u_{out} 作为实际控制输入,即可实现轮式移动机器人分层路径跟踪控制。

[0151] 综上,本实施例在建立轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架后,将能够在行驶速度恒定时正常运行的路径跟踪控制器引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,然后建立轮式移动机器人动力学模型,并采用欧拉法将该模型离散化为预测模型,并基于迭代预测获得的状态量设计优化目标函数,从而建立基于动力学模型的速度调节器,并将其引入轮式移动机器人分层路径跟踪控制框架,最终实现可以进一步提高轮式移动机器人平均行驶速度的路径跟踪控制。

[0152] 第二实施例

[0153] 本实施例提供一种电子设备,其包括处理器和存储器;其中,存储器中存储有至少一条指令,所述指令由处理器加载并执行,以实现第一实施例的方法。

[0154] 该电子设备可因配置或性能不同而产生比较大的差异,可以包括一个或一个以上处理器(central processing units,CPU)和一个或一个以上的存储器,其中,存储器中存储有至少一条指令,所述指令由处理器加载并执行上述方法。

[0155] 第三实施例

[0156] 本实施例提供一种计算机可读存储介质,该存储介质中存储有至少一条指令,所述指令由处理器加载并执行,以实现上述第一实施例的方法。其中,该计算机可读存储介质可以是ROM、随机存取存储器、CD-ROM、磁带、软盘和光数据存储设备等。其内存储的指令可由终端中的处理器加载并执行上述方法。

[0157] 此外,需要说明的是,本发明可提供为方法、装置或计算机程序产品。因此,本发明实施例可采用完全硬件实施例、完全软件实施例或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本发明实施例可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质上实施的计算机程序产品的形式。

[0158] 本发明实施例是参照根据本发明实施例的方法、终端设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理终端设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理终端设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0159] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理终端设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理终端设备上,使得在计算机或其他可编程终端设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程终端设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0160] 还需要说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者终端设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者终端设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者终端设备中还存在另外的相同要素。

[0161] 最后需要说明的是,以上所述是本发明优选实施方式,应当指出,尽管已描述了本发明优选实施例,但对于本技术领域的技术人员来说,一旦得知了本发明的基本创造性概念,在不脱离本发明所述原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。所以,所附权利要求意欲解释为包括优选实施例以及落入本发明实施例范围的所有变更和修改。

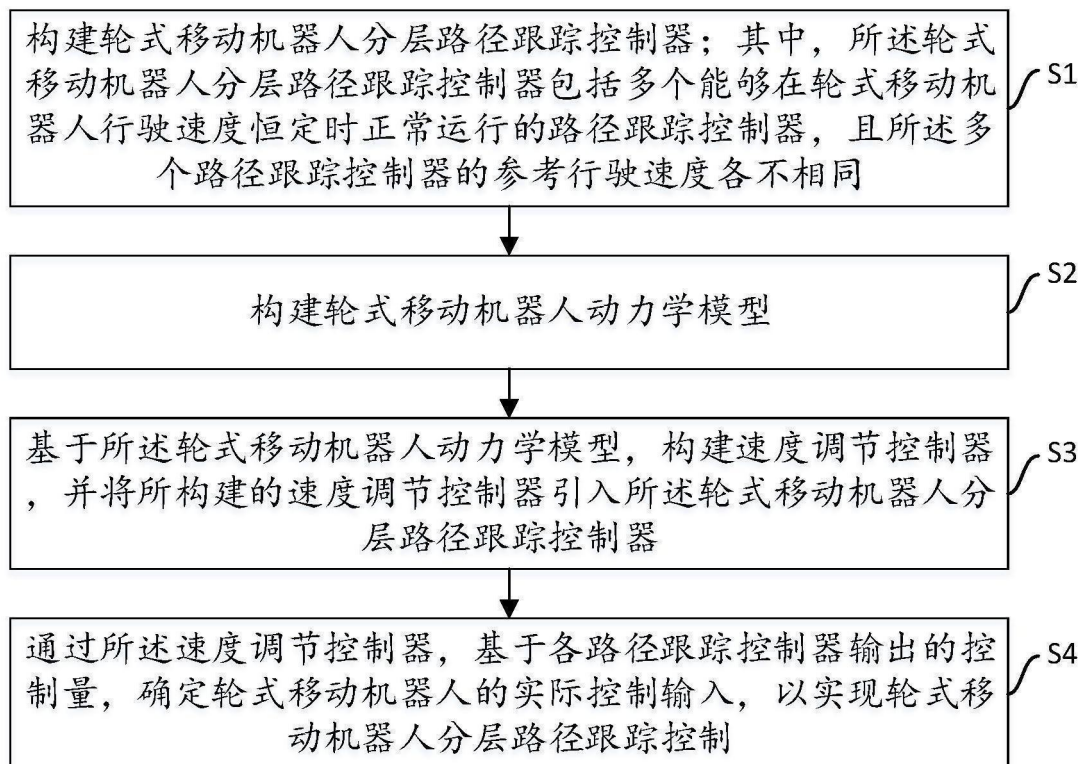


图1

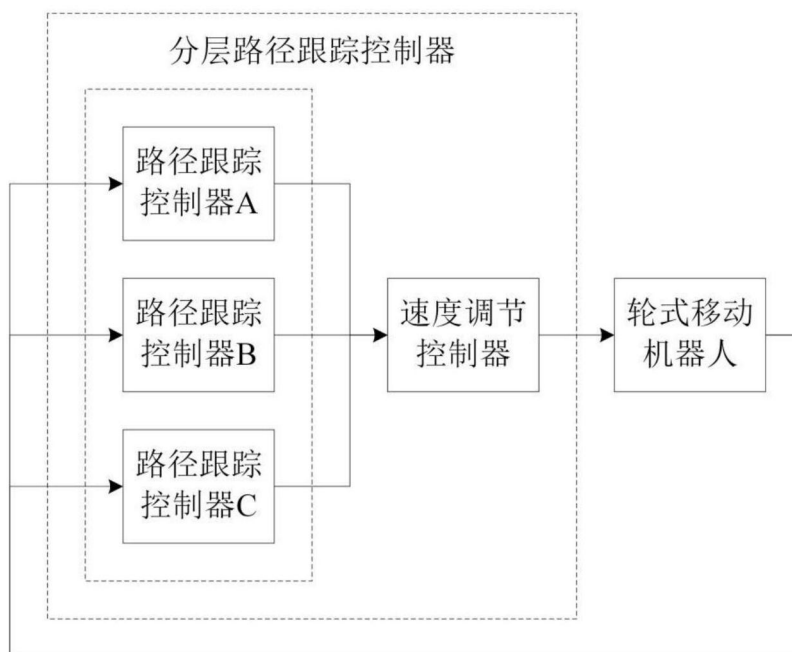


图2

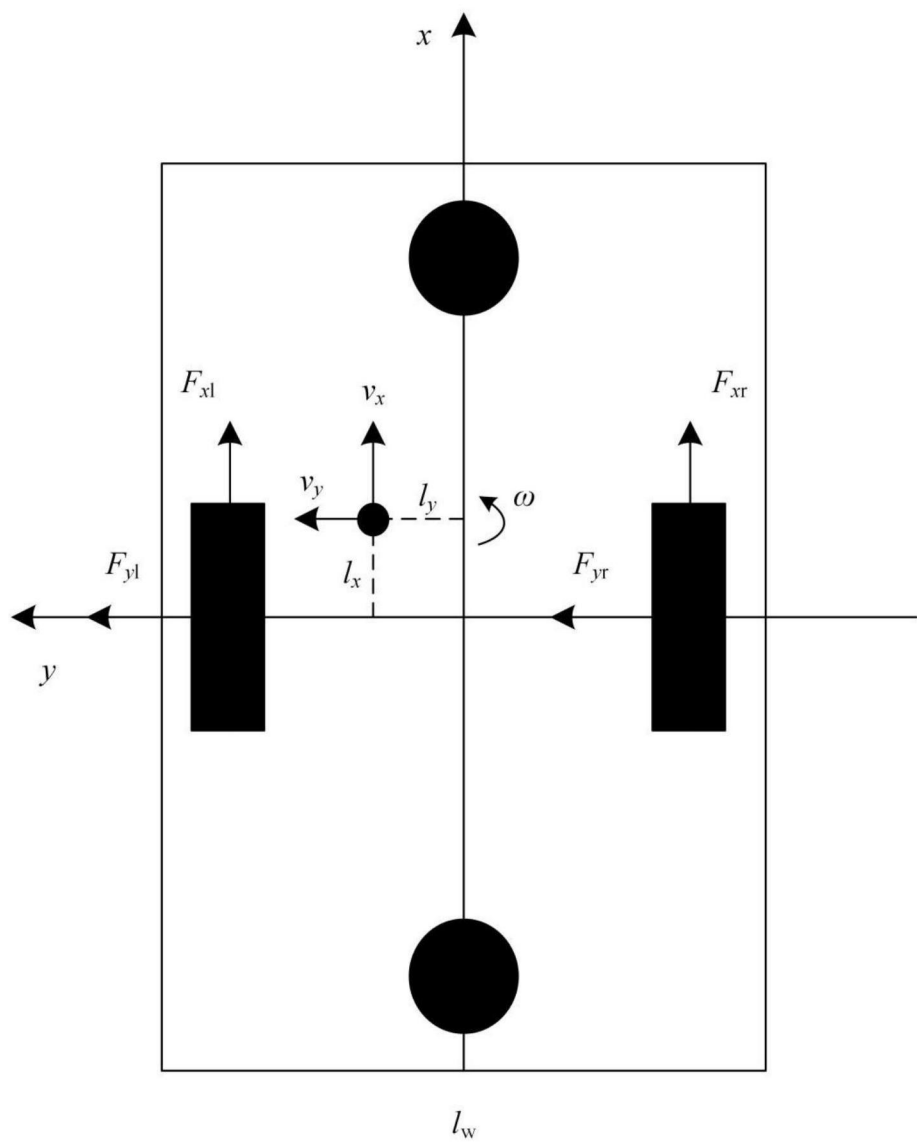


图3

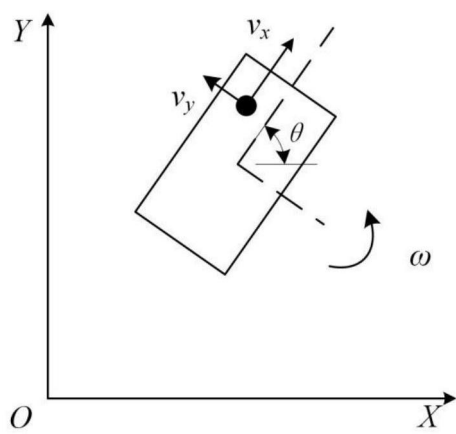


图4