

◆ 计算机技术 ◆

火灾预警巡检机器人轨迹跟踪控制^{*}车红娟¹,高学山^{1,2*},赵鹏¹,郝亮超³,牛军道³

(1. 广西科技大学电气电子与计算机科学学院,广西柳州 545006;2. 北京理工大学机电学院,北京 100081;3. 广西科技大学机械与汽车工程学院,广西柳州 545616)

摘要:针对如何减小火灾预警巡检机器人在目标轨迹跟踪过程中产生的角度和距离偏航问题,提出一种基于 Backstepping 的轨迹跟踪快速响应控制算法。首先根据机器人行驶偏差与轮速之间的关系,推导出移动机器人运动学模型,利用 Backstepping 构造出跟踪控制器,在控制器中引入虚拟反馈函数,调节控制器的跟踪效果;然后借助 Lyapunov 稳定性理论证明收敛性;最后,借助仿真实验和实物验证算法的有效性。研究结果表明所提出的轨迹跟踪控制方法可以使机器人减少轨迹跟踪过程中的误差,并最终使系统趋于稳定。

关键词:火灾预警 巡检机器人 Backstepping 算法 Lyapunov 算法 轨迹跟踪

中图分类号:TP242 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2021)04-0346-08

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyb.20211216.001

0 引言

在各种灾害中,火灾不仅毁坏物质财产,造成社会秩序混乱,而且还直接或间接危害生命,及时发现火情并采取相应措施可以有效降低火灾带来的损失。火灾的主要特点有温度高、烟雾浓、火势猛和蔓延快。为及时监测火情的发生,监测数据的传感器需要具有很高的灵敏度和准确性。当前应用在监测火情上的传感器存在安装位置固定、测量范围有限等方面的局限性。将火灾监测传感器安装在移动机器人上,可以有效解决上述局限性,实现火灾监测的无人化与准

确化。

由于存在滑动、干扰、传感器误差等影响,轮式移动机器人在设定好的路径上进行巡检移动的过程中,跟踪误差不可避免^[1]。针对轨迹跟踪控制问题,国内外学者进行大量的研究。Kanayama 等^[2]基于非完整移动机器人模型对系统的微分方程进行线性处理,并针对滑移问题引入速度/加速度限制。曹锦波等^[3]基于机器人因外部扰动和建模不准确等造成的位姿误差问题,用改进型非线性扰动观测器对扰动进行估计,并用滑膜控制器对扰动进行补偿。李卫兵和吴琼^[4]通过机器人运动学模型,推导轨迹跟踪误差表达式,借助误差表达式设计虚拟速度控制律,将该控制

收稿日期:2021-06-15

* 柳州市科技计划项目(2020PAAA0601)资助。

【作者简介】

车红娟(1997-),女,在读硕士研究生,主要从事移动机器人控制技术研究。

【**通信作者】

高学山(1966-),男,教授,主要从事智能机器人技术研究,E-mail:xueshan.gao@bit.edu.cn。

【引用本文】

车红娟,高学山,赵鹏,等.火灾预警巡检机器人轨迹跟踪控制[J].广西科学院学报,2021,37(4):346-353.

CHE H J,GAO X S,ZHAO P,et al. Trajectory Tracking Control of Fire Warning and Inspection Robot [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2021,37(4):346-353.

律作为机器人动力学模型的输入,控制机器人的力矩输出,达到实际轨迹可以很好地跟踪期望轨迹的预期。Zhang 等^[5]针对具有通信约束的非线性多智能体系统,采用分布式控制结构中的“leader-follower”模式,设计分布式自适应反步控制协同跟踪运动目标。Yousuf 等^[6]对一个多用途机器人动力学控制器采用 Proportion Integral Differential (PID) 和反步控制器结合的方式,可以有效地限制超调量并提高瞬态反应时间。宋立业、邢飞^[7]和尤波等^[8]分别将自适应神经滑膜和模糊滑膜控制引入到非完整移动机器人的轨迹跟踪上。吴运雄和曾碧^[9]将卷积神经与强化学习结合在一起,解决了传统算法存在的局部最优问题。姜烽等^[10]将差分进化遗传算法与 PID 结合构建轨迹跟踪控制器,提高了轨迹跟踪的精度。沈智鹏和张晓玲^[11]提出一种解决在跟踪过程中速度跳变的扰动补偿模糊自适应反演控制方法。崔明月等^[12]将打滑程度用未知参数表示,设计一种补偿纵向滑差的自适应非线性控制律,并提出一种通过极点布置在线调整控制器增益的方法。目前的研究主要考虑运动控制算法在仿真方面的改进与优化,但未真正运用到实际的场景中。为此,本文将从实际出发,提出火灾预警巡检机器人在目标轨迹跟踪过程中的跟踪控制。首先根据火灾预警巡检机器人建立运动学模型,并依据该模型推导出跟踪误差方程,建立跟踪控制器,在控制器中引入虚拟反馈控制量,利用 Lyapunov 稳定性理论判断控制器的稳定性,最后借助仿真实验和实物验证算法的有效性。

1 火灾预警巡检机器人的系统框架

火灾预警巡检机器人系统主要由 3 部分组成:

①环境感知。涉及多种传感器,包括烟雾、火焰、测距和温度检测传感器等,在巡检过程中实现对无人化仓库烟雾和温度的实时监测。

②执行机构。为了方便后期的机器人维护,上层控制器部分与底层执行机构部分采用模块化设计,执行机构部分采用 Arduino 作为底层处理器,主要控制机器人底层电机的驱动。针对环境感知系统中存在的导航、传感器数据复杂和信息量较大等问题,上层控制器的处理器采用树莓派作为主控。

③通信模块。传感器将检测到的数据通过协议的方式传递给树莓派,执行机构部分与树莓派之间、导航与树莓派之间采用 USB 通信方式,为了方便管理者在后端管理平台查看机器人的位置和无人化仓库的情况,机器人平台与终端采用无线的方式实现通信。

为了能够让机器人按照一定的路径进行火灾监测,需规划出机器人从此刻位置到某一位置的移动路径,使得机器人从当前位姿到达目标位姿。移动机器人的速度与位置、位姿存在紧密联系,要对机器人进行控制,需要对其位姿进行准确表达。首先建立合适的坐标系,对主要信息量进行表达,然后分析各坐标系之间存在的位置关系,最后确定速度与位姿之间的数学关系表达式。火灾预警巡检机器人的系统整体框架如图 1 所示。

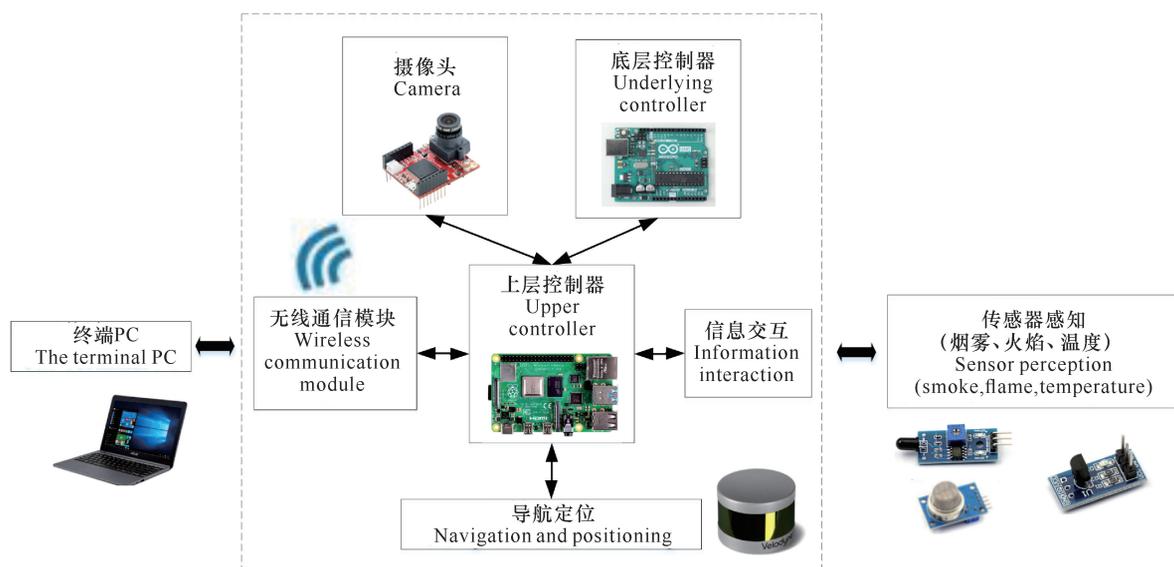


图 1 火灾预警巡检机器人系统整体框架

Fig. 1 Overall framework of fire warning and inspection robot system

1.1 火灾预警巡检机器人运动学模型

机器人位姿如图2所示,机器人的运动主要由底层电机负责。向量 (x, y, θ) 表示巡检机器人中心点 P 在全局坐标系 $\{O, X, Y\}$ 中的位姿, x, y 分别代表横、纵坐标, θ 代表方向角,若 θ 为顺时针指向全局坐标轴 X 轴,表示为正,否则为负。轮间距为 $2b$,轮直径为 $2r$ 。 (X_c, Y_c) 代表机器人局部坐标系,巡检机器人局部坐标系的运行速度为 v , (\dot{x}, \dot{y}) 为全局坐标系下横、纵坐标方向的速度分量,为使得机器人向正前方行进时各轮速度均为正值,选取了图2中速度 v 箭头所示方向为各轮速度的正方向。

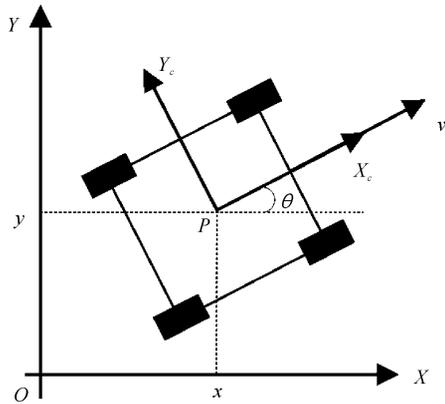


图2 火灾预警巡检机器人位姿图

Fig. 2 Position map of fire warning and inspection robot

图2所示的巡检机器人需满足纯滚动和无滑动情况,即

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

化简后得到移动机器人的约束方程:

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

将巡检机器人局部坐标系的运行速度 v 转换为全局坐标系下的速度 \dot{q}_c ,

$$\dot{q}_c = S(q)v(t) = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $S(q)$ 是一个雅可比矩阵, ω 表示巡检机器人的角速度,则运动学方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (4)$$

巡检机器人平台几何中心 P 的线速度 v 和角速度 ω 与左右轮驱动角速度 ω_R 和 ω_L 的关系如式(5)和式(6)所示:

$$v = \frac{r}{2}(\omega_R + \omega_L), \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\omega_R r - \omega_L r}{2b}, \quad (6)$$

式(5)、式(6)中 r 为车轮的半径,将式(5)、式(6)用矩阵表示,如式(7)所示:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix}. \quad (7)$$

巡检机器人的运动学方程改写为式(8)中:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix}. \quad (8)$$

1.2 火灾预警巡检机器人轨迹误差模型

在轨迹跟踪过程中,需要将机器人期望的运动位姿与实际位姿进行比较,计算并修正偏差。在图3误差示意图中, q_r 表示巡检机器人的期望位姿, q 表示巡检机器人的实际位姿。

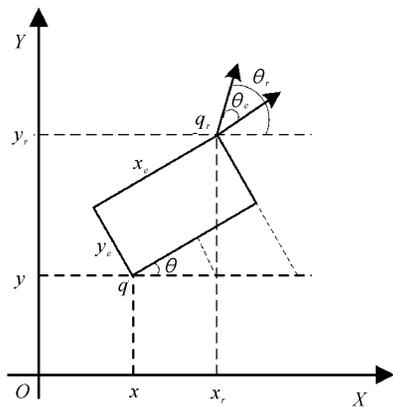


图3 火灾预警巡检机器人轨迹跟踪误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fire warning and inspection robot trajectory tracking error

由图3可知,非完整巡检机器人系统位姿跟踪误差方程如式(9)~(11):

$$x_e = (x_r - x) \cos \theta + (y_r - y) \sin \theta, \quad (9)$$

$$y_e = (y_r - y) \cos \theta - (x_r - x) \sin \theta, \quad (10)$$

$$\theta_e = \theta_r - \theta, \quad (11)$$

式(9)~(11)中 x_e 为 x 方向的误差, y_e 为 y 方向的误差, θ_e 为角度方向的误差, (x_r, y_r, θ_r) 代表巡检机器人在 x 轴、 y 轴、角度方向的期望值。将式(9)~(11)写成矩阵形式,如式(12)所示:

$$e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} =$$

$$T_e(q_r - q), \quad (12)$$

$$\text{式(12)中 } T_e = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 代表机器人位姿}$$

$$\text{转换矩阵, } q_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \text{ 代表巡检机器人期望位姿, } q =$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \text{ 代表巡检机器人实际位姿, } e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} \text{ 代表巡检}$$

机器人的误差量。因为 θ 为角度值, 所以规定 $\theta_e \in [0, 2\pi)$ 。

下面推导位姿误差微分方程, 对式(9)进行求微分, 可得式(13):

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= -\dot{\theta}\sin\theta(x_r - x) + \cos\theta(\dot{x}_r - \dot{x}) + \\ \dot{\theta}\cos\theta(y_r - y) + \sin\theta(\dot{y}_r - \dot{y}) &= \omega y_e - v + v_r \cos\theta_e. \end{aligned} \quad (13)$$

对式(10)进行求微分, 可得式(14):

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= -\dot{\theta}\cos\theta(x_r - x) - \sin\theta(\dot{x}_r - \dot{x}) - \\ \dot{\theta}\sin\theta(y_r - y) + \cos\theta(\dot{y}_r - \dot{y}) &= -\omega x_e + v_r \sin\theta_e. \end{aligned} \quad (14)$$

对式(11)进行求微分, 可得式(15):

$$\dot{\theta}_e = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} = \omega_r - \omega. \quad (15)$$

对式(13) - (15)进行整理, 得到非完整巡检机器人系统的误差微分方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega y_e - v + v_r \cos\theta_e \\ -\omega x_e + v_r \sin\theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix}. \quad (16)$$

根据位姿误差的微分方程, 即式(16)设计合适的控制律, 使机器人在轨迹跟踪过程中可以按照预定的轨迹运行, 或者在出现误差时快速消除偏差。轨迹跟踪控制的目标就是设计合适的控制器 v 、 ω , 使得跟踪误差趋于 0:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [|x_r - r| + |y_r - y| + |\theta_r - \theta|] = 0.$$

2 火灾预警巡检机器人跟踪控制器设计

机器人轨迹跟踪流程如图 4 所示。将期望位姿

q_r 和实际位姿 q 进行对比, 作为误差微分方程的输入, 得到误差微分方程的输出, 即位姿误差 q_e ; 位姿误差 q_e 和期望速度 (v_e, ω_e) 作为控制器的输入, 得到控制器的输出, 即控制速度 (v, ω) ; 机器人的实际位姿 q 是将控制速度 (v, ω) 作为运动学模型的输入, 再经过积分运算得到的。

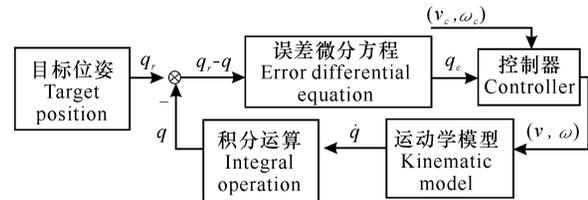


图 4 火灾预警巡检机器人轨迹跟踪流程

Fig. 4 Trajectory tracking process of fire warning and inspection robot

2.1 虚拟反馈量的设计

为找到合适的虚拟状态反馈函数 x_{ed} , 使得 $y_e \rightarrow 0$ 。借鉴文献[13-15]的思想, 设 x_e 为虚拟控制输入, 设计控制量 v 和 ω 使得 $x_e \rightarrow x_{ed}$, $\theta_e \rightarrow 0$, 且整个系统渐进稳定。定义误差变量如式(17):

$$\bar{x}_e = x_e - \frac{k_1 y_e}{\sqrt{1 + \omega^2}}, \quad (17)$$

式(17)中, k_1 为增益系数, $k_1 > 0$ 。根据式(17)可得到: 当 $\bar{x}_e \rightarrow 0$, $x_e \rightarrow \frac{k_1 y_e}{\sqrt{1 + \omega^2}}$, 得 $\dot{y}_e \rightarrow \frac{k_1 \omega y_e}{\sqrt{1 + \omega^2}}$ 。

选用一个局部 Lyapunov 函数 V_1 :

$$V_1 = \frac{1}{2} y_e^2, \quad (18)$$

对式(18)进行求导:

$$\dot{V}_1 = -\frac{k_1 \omega y_e^2}{\sqrt{1 + \omega^2}} \leq 0, \quad (19)$$

在 $\theta_e \rightarrow 0$ 时, V_1 单调递减, 并且可以使得 y_e 收敛到 0。

2.2 基于 Lyapunov 稳定性分析

基于李雅普诺夫稳定性准则, 构造全局 Lyapunov 函数 V 如式(20):

$$V = \frac{1}{2} \bar{x}_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 + \frac{1 - \cos\theta_e}{k_y}, \quad (20)$$

式(20)中, k_y 为增益系数, $k_y > 0$, $V > 0$, 仅当 $(\bar{x}_e, y_e, \theta_e)^T = 0$, $V = 0$ 。

由式(16)和式(17)可得:

$$\dot{\bar{x}}_e = \dot{x}_e - \frac{k_1 \dot{y}_e}{(1 + \omega^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{k_1 y_e \omega \dot{\omega}}{(1 + \omega^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (21)$$

同时对 Lyapunov 函数 V 求导得式(22):

$$\dot{V} = \dot{x}_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{1}{k_y} \sin \theta_e \dot{\theta}_e = \dot{x}_e \cdot$$

$$\left(\omega y_e - v + v_r \cos \theta_e - \frac{k_1 \dot{y}_e}{(1 + \omega^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{k_1 y_e \omega \dot{\omega}}{(1 + \omega^2)^{\frac{3}{2}}} \right) - \frac{k_1 y_e^2 \omega}{\sqrt{1 + \omega^2}} + \frac{1}{k_y} \sin \theta_e (\omega_r - \omega + 2k_y y_e v_r). \quad (22)$$

取系统的控制律为式(23):

$$\begin{cases} \omega = \omega_r + 2k_y y_e v_r + k_3 \sin \theta_e \\ v = \omega y_e + v_r \cos \theta_e - \frac{k_1 \dot{y}_e}{(1 + \omega^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{k_1 y_e \omega \dot{\omega}}{(1 + \omega^2)^{\frac{3}{2}}} + k_2 \dot{x}_e \end{cases} \quad (23)$$

式(23)中, k_1, k_2, k_3, k_y 均为大于0的数, 则

$$\dot{V} = -k_2 \dot{x}_e^2 - \frac{k_1 \omega y_e^2}{\sqrt{1 + \omega^2}} - \frac{k_3}{k_y} \sin^2 \theta_e. \quad (24)$$

由于 V 为有界连续正定可微的函数, \dot{V} 为一致连续的半负定函数。由 Barbalat 定理可知: $t \rightarrow \infty$,

$$\dot{V} \rightarrow 0, \text{ 则 } \begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{k_1 \omega y_e^2}{\sqrt{1 + \omega^2}} = 0 \\ \sin^2 \theta_e \rightarrow 0 \end{cases}, \text{ 那么}$$

$$\begin{cases} x_e \rightarrow \frac{k_1 \omega y_e}{\sqrt{1 + \omega^2}} \rightarrow 0 \\ \theta_e \rightarrow 0 \end{cases}.$$

由 Lyapunov 稳定判据可知, 在全局范围内有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \| (x_e \ y_e \ \theta_e)^T \| = 0$ 。

3 结果与分析

为验证本文控制器的控制效果, 通过 Matlab 对机器人系统进行经典控制器和本文控制器的仿真对比。经典控制器如式(25)所示:

$$\begin{cases} v = v_r \cos \theta_r + k_{11} x_e \\ \omega = \omega_r + k_{22} v_r y_e + k_{33} v_r \sin \theta_e \end{cases}, \quad (25)$$

式(25)中, k_{11}, k_{22}, k_{33} 均为增益系数且大于0。

3.1 直线轨迹跟踪仿真

仿真的参数设定如下, 期望的角速度和线速度分别为 $\omega_r = 0$ rad/s, $v_r = 0.8$ m/s, 初始角速度和线速度分别为 $\omega = 0.3$ rad/s, $v = 0.4$ m/s, 初始位姿为 $[1.2 \ 0 \ \pi/2]$, 轨迹跟踪的参考位姿

$q_r = (x_r \ y_r \ \theta_r)^T$ 为

$$\begin{cases} x_r = v_r \cos(\theta_r t) \\ y_r = v_r \sin(\theta_r t), \\ \theta_r = \pi/3 \end{cases}, \quad (26)$$

其中, $0 \leq t \leq 100$; 参数值: $k_1 = 1, k_2 = 4.5, k_3 = 4, k_y = 5, k_{11} = 8, k_{22} = 3, k_{33} = 3$ 。仿真结果如图5所示。

从图5可以看出, 机器人在经典控制器与本文控制器在初始值相同的跟踪过程中, 都与目标轨迹重合。对比 x 轴方向的偏差、 y 轴方向的偏差和航向角 θ 的偏差可以看出, 本文控制器存在较大的波动但

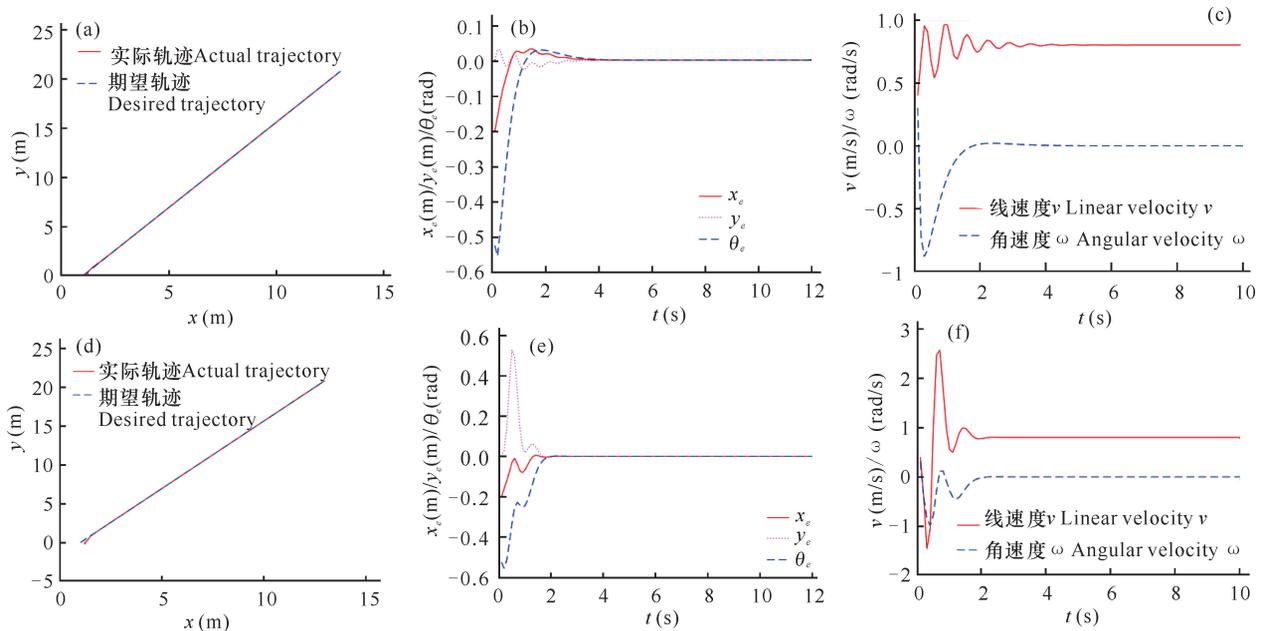


图5 经典控制器(a-c)和本文控制器(d-f)直线轨迹跟踪仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of linear trajectory tracking for the classical controller (a-c) and the controller (d-f) in this article

提高了跟踪的收敛速度,本文控制器在3 s左右误差趋于0,经典控制器在5 s左右趋于0。

3.2 圆形轨迹跟踪

仿真的参数设定如下,取轨迹跟踪过程中的期望角速度和线速度分别为 $\omega_r = 1 \text{ rad/s}$, $v_r = 1 \text{ m/s}$,初始角速度和线速度分别为 $\omega = 0.3 \text{ rad/s}$, $v = 0.4 \text{ m/s}$ 。初始位姿为 $[1.2 \ 0 \ 2\pi/3]$,轨迹跟踪的参考位姿 $q_r = (x_r \ y_r \ \theta_r)^T$ 为

$$\begin{cases} x_r = v_r \cos(\theta_r t) \\ y_r = v_r \sin(\theta_r t) \\ \theta_r = \omega_r t \end{cases} \quad (27)$$

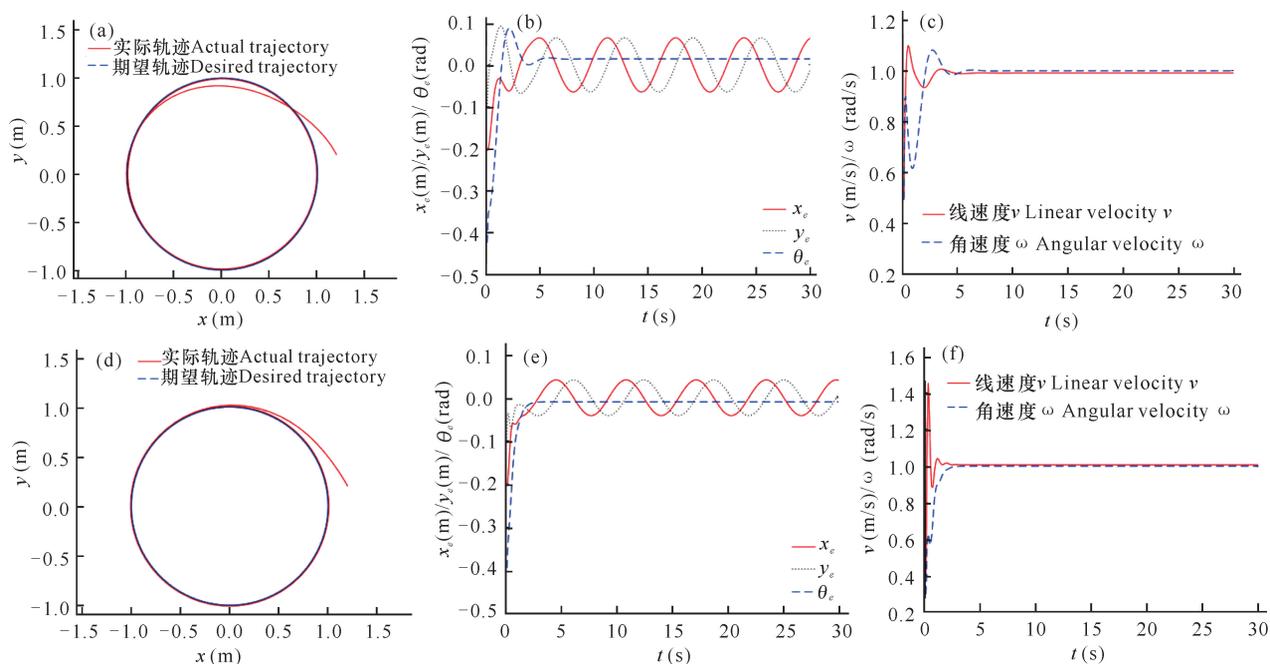


图6 经典控制器(a-c)和本文控制器(d-f)圆形轨迹跟踪仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of circular trajectory tracking for the classical controller (a-c) and the controller (d-f) in this article

3.3 实物验证

为进一步验证轨迹跟踪控制器的正确性和有效性,进行巡检机器人的实物实验。参考轨迹可以用公式(28)表示:

$$\begin{cases} x_i = x_i + v_r t \cos\theta \\ y_i = y_i + v_r t \sin\theta \\ \theta = \arctan[(y_i - y_{i-1}) / (x_i - x_{i-1})] \end{cases} \quad (28)$$

实验环境包括一台巡检机器人,一个 OpenMV 摄像头,一台 PC 主机。PC 主机采用无线形式与巡检机器人进行通信,巡检机器人将自身位置实时发送给 PC 机,PC 机通过 ROS 平台将机器人反馈的数据录制下来并保存成 .txt 文件形式,在 Matlab 中绘制出实际与期望轨迹。

其中, $0 \leq t \leq 300$,跟踪轨迹为圆心位于原点、半径为1的圆形;参数值: $k_1 = 1, k_2 = 4, k_3 = 5, k_y = 4, k_{11} = 3, k_{22} = 3, k_{33} = 2$ 。仿真结果如图6所示。

从图6可以看出,两种控制器在圆形轨迹跟踪上可以重合。对比两种控制器的误差图,可以看出本文控制器的误差波动比经典控制器的误差波动小,本文控制器角度误差5 s左右趋于0,经典控制器角度误差8 s左右趋于0。对比两种控制器的速度曲线,可以看出本文控制器在4 s左右达到稳定状态,经典控制器在7 s左右达到稳定状态。

巡检机器人跟踪轨迹如图7所示,机器人从A点(1.5,0.6)沿直线到B点(6.5,1),从B点沿直线到C点(6.5,4.8),从C点沿直线到D点(1.5,4.8),从D点沿直线到A点。图8为机器人在运动过程中的位姿误差、角速度和线速度控制律,图9为机器人的实物图。

从图7可以看出,刚开始机器人不在设定的初始位置,在设计控制器作用下,经过一段时间逐渐靠近目标轨迹。从图8可以看出,航向角 θ 的偏差出现3次较大的波动,是机器人在3次方向转换中角度误差过大导致的;从角速度和线速度的曲线可以看出,机器人的输出较为稳定,由于存在未知扰动,产生速度抖动的情况。

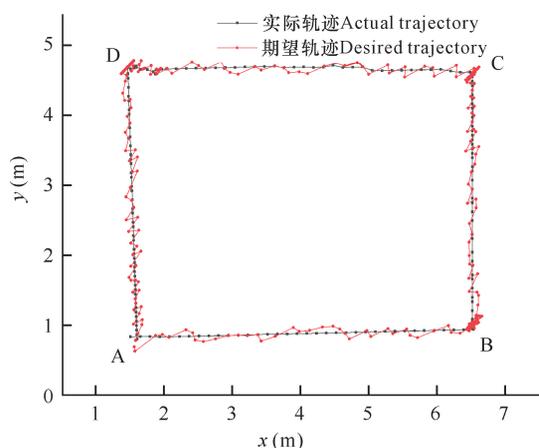


图7 巡检机器人运动轨迹图

Fig. 7 Moving trajectory map of inspection robot

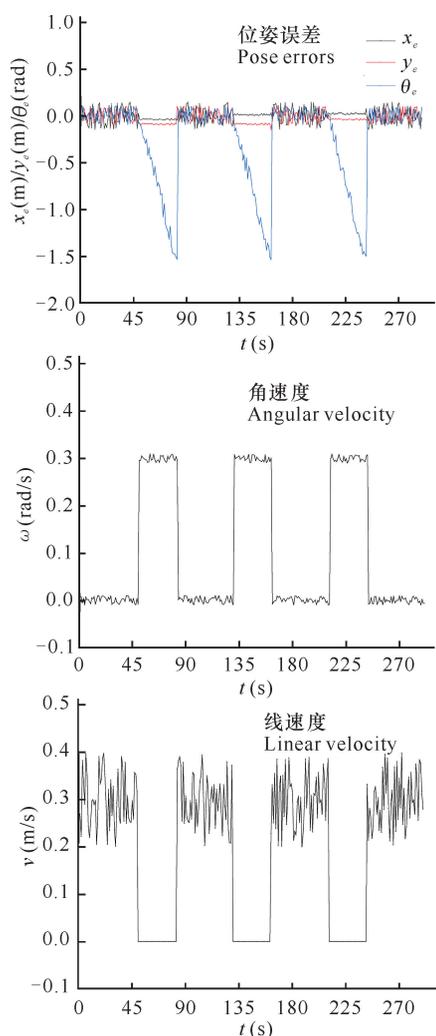


图8 巡检机器人实验数据

Fig. 8 Experimental data of inspection robot

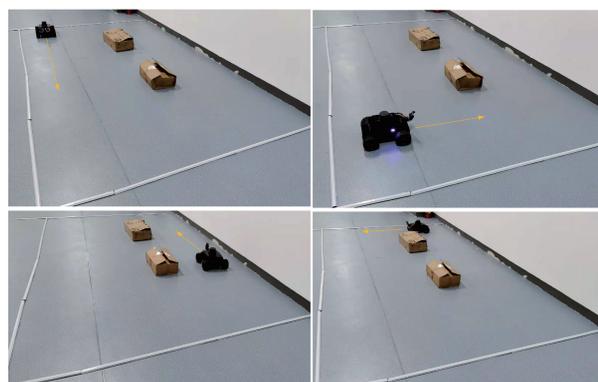


图9 巡检机器人实验过程

Fig. 9 Experimental process of inspection robot

4 结论

针对火灾预警巡检机器人的轨迹跟踪问题,首先建立了机器人的运动学模型,借助运动学模型建立误差模型,依据误差模型推导出误差方程;其次,考虑到经典控制器存在收敛速度慢、抖动较多等情况,在经典控制律基础上引入新的虚拟状态变量 \bar{x}_e ,建立反演控制技术的运动学控制律;最后用 Lyapunov 证明所设计控制律的稳定性。仿真和实物验证结果表明,火灾预警巡检机器人的反演控制器能够有效跟踪给定的目标轨迹,同时可以有效减少误差量和输出量在达到稳定状态之前的抖动次数,并减小控制器收敛时间。

参考文献

- [1] 孙忠廷, 柏建军, 陈炳旭, 等. 轮式移动机器人自适应轨迹跟踪控制[J/OL]. 控制工程, 2020: 1-6. [2021-04-12]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20200387>.
- [2] KANAYAMA Y, KIMURA Y, MIYAZAKI F, et al. A stable tracking control method for an autonomous mobile robot [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati USA: IEEE, 1990: 384-389.
- [3] 曹锦波, 潘海鹏, 张益波. 基于改进型非线性干扰观测器的爬壁机器人轨迹跟踪[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(2): 28-34.
- [4] 李卫兵, 吴琼. 基于反步法的轮式移动机器人轨迹跟踪控制算法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(19): 54-58.
- [5] ZHANG P, XUE H F, GAO S, et al. Distributed adaptive consensus tracking control for multi-agent system with communication constraints [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(6): 1293-1306.
- [6] YOUSUF B M, KHAN A S, KHAN S M. Dynamic

- modeling and tracking for nonholonomic mobile robot using PID and back-stepping [J]. *Advanced Control for Applications; Engineering and Industrial Systems*, 2021, 3(3): e71.
- [7] 宋立业, 邢飞. 移动机器人自适应神经滑模轨迹跟踪控制[J]. *控制工程*, 2018, 25(11): 1965-1970.
- [8] 尤波, 张乐超, 李智, 等. 轮式移动机器人的模糊滑模轨迹跟踪控制[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(2): 307-313.
- [9] 吴运雄, 曾碧. 基于深度强化学习的移动机器人轨迹跟踪和动态避障[J]. *广东工业大学学报*, 2019, 36(1): 42-50.
- [10] 姜烽, 申焱, 张成, 等. 基于差分进化遗传优化的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. *机械与电子*, 2016, 34(7): 67-70.
- [11] 沈智鹏, 张晓玲. 带扰动补偿的移动机器人轨迹跟踪反演控制[J]. *控制工程*, 2019, 26(3): 398-404.
- [12] 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.
- [13] 刘佳, 李春书. 基于 Backstepping 方法的轮式移动机器人轨迹跟踪研究[J]. *机电工程技术*, 2011, 40(1): 79-82, 113.
- [14] 徐俊艳, 张培仁. 非完整轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2004, 34(3): 376-380.
- [15] 马海涛. 非完整轮式移动机器人的运动控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

Trajectory Tracking Control of Fire Warning and Inspection Robot

CHE Hongjuan¹, GAO Xueshan^{1,2}, ZHAO Peng¹, HAO Liangchao³, NIU Jundao³

(1. School of Electrical, Electronic & Computer Science, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, 545006, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi, 545616, China)

Abstract: In order to reduce the angle and distance yaws generated during the travel of the fire warning inspection robot in the process of target trajectory tracking, a fast response control algorithm for trajectory tracking based on Backstepping was proposed. Firstly, according to the relationship between the robot driving deviation and wheel speed, a kinematic model of the mobile robot was derived, and a tracking controller was constructed using Backstepping. A virtual feedback function was introduced in the controller to adjust the tracking effect of controller. Then convergence was proved with the help of Lyapunov stability theory. Finally, the effectiveness of the algorithm was verified by simulation experiments and physical objects. The research results showed that the proposed trajectory tracking control method could reduce the errors in the trajectory tracking process of the robot, and finally made the system more stable.

Key words: fire warning, inspection robot, Backstepping algorithm, Lyapunov algorithm, trajectory tracking