

文章编号:1671-251X(2021)05-0088-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2021030049

履带移动平台带边界层 bang-bang 路径跟踪控制

吴明阳, 李小波, 代嘉惠, 雷世威, 潘长松, 薛春荣

(中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)



扫码移动阅读

摘要:为实现无法闭环调速的开关阀控履带移动平台路径跟踪,考虑到平台速度低且可原地转向的特点,基于纯追踪算法,提出不需要底层轮速控制的带边界层 bang-bang 路径跟踪控制算法。根据几何及运动学关系,建立履带移动平台目标点追踪模型;以航向角偏差作为切换函数,通过 bang-bang 算法控制两侧履带正反转,引入边界层厚度参数,以减小电磁阀开关频率;根据李雅普诺夫稳定性理论,证明了边界层外系统各状态均是稳定的,但边界层内航向角偏差在原点处是不稳定的,且前视距离越小,航向角偏差发散越快。基于 Matlab/Simulink 和 Recurdyn 联合仿真平台,选择矩形目标路径,仿真验证了不同前视距离下 bang-bang 算法的路径跟踪效果,并与闭环调速的纯追踪算法进行对比。搭建样机试验平台,对 bang-bang 路径跟踪控制算法进行地面试验。仿真和试验结果表明,bang-bang 路径跟踪控制算法可控制开关阀控履带移动平台实现对直线或折线路径的跟踪,且算法在转角处跟踪精度高于闭环调速的纯追踪算法路径,稳态误差小于 9 cm,满足煤矿机器人自主导航行走要求。

关键词:煤矿机器人;履带移动平台;路径跟踪;bang-bang 控制;纯追踪算法;边界层
中图分类号:TD67 **文献标志码:**A

Path tracking control of crawler mobile platform based on bang-bang control with boundary layer

WU Mingyang, LI Xiaobo, DAI Jiahui, LEI Shiwei, PAN Changsong, XUE Chunrong
(CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract:In order to realize the path tracking of the on-off valve-controlled crawler mobile platform that cannot be closed-loop speed regulated, considering the low speed of the platform and the ability to turn in place, a bang-bang path tracking control algorithm with a boundary layer without the bottom wheel speed control is proposed based on pure pursuit algorithm. Based on the geometric and kinematic relations, a target point tracking model of crawler mobile platform is established. Taking the heading angle deviation as the switching function, the method controls the forward and reverse rotation of the crawlers on both sides through the bang-bang algorithm, and introduces the boundary layer thickness parameter to reduce the switching frequency of the solenoid valve. According to the Lyapunov stability theory, it is proved that all states of the system outside the boundary layer are stable, but the heading angle deviation inside the boundary layer is unstable at the origin. Moreover, the smaller the look ahead distance is, the faster the heading angle deviation diverges. Based on the Matlab/Simulink and Recurdyn joint simulation platform, the rectangular target path is selected, and the simulation verifies the path pursuit effect of the bang-bang algorithm with different look ahead distances, and compares it with the pure pursuit algorithm of closed-loop speed regulation. A prototype test platform is built to conduct ground tests on the bang-bang path

收稿日期:2021-03-16;**修回日期:**2021-04-25;**责任编辑:**胡娴。
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0808003);重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2019jscx-msxmX0360)。
作者简介:吴明阳(1993—),男,四川眉山人,助理工程师,硕士,主要研究方向为煤矿移动机器人运动控制,E-mail:783172832@qq.com。
引用格式:吴明阳,李小波,代嘉惠,等.履带移动平台带边界层 bang-bang 路径跟踪控制[J].工矿自动化,2021,47(5):88-94.
WU Mingyang, LI Xiaobo, DAI Jiahui, et al. Path tracking control of crawler mobile platform based on bang-bang control with boundary layer[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 88-94.

tracking control algorithm. The simulation and test results show that the bang-bang path tracking control algorithm can control the on-off valve-controlled crawler mobile platform to track straight or broken-line paths. Moreover, the tracking accuracy of the algorithm at corners is higher than that of the pure pursuit algorithm path of closed-loop speed regulation. The steady-state error is less than 9 cm, which meets the requirements of autonomous navigation walking of coal mine robots.

Key words: coal mine robot; crawler mobile platform; path tracking; bang-bang control; pure pursuit algorithm; boundary layer

0 引言

煤矿机器人是煤矿智能化的重要载体,研发和应用煤矿机器人是实现煤矿无人化的重要途径^[1]。国家煤矿安全监察局发布的《煤矿机器人重点研发目录》建议将机器人纳入煤矿重点科技专项范围^[2],以提升煤矿智能化水平,逐步实现煤矿少人及无人化。

路径跟踪控制是实现煤矿机器人自主导航行走的关键技术之一。当完成规划任务后,需要利用跟踪算法计算机器人执行器目标输入,以保证机器人跟踪预定的路径^[3]。现有的机器人路径跟踪算法包括纯追踪算法^[4]、滑模控制算法^[5-6]、模型预测控制算法^[7]等。其中纯追踪算法简单、直观,控制参数少,在低速场合跟踪效果良好,因此,成为当前移动机器人导航和控制中广泛应用的路径跟踪算法之一^[8-9]。前视距离是影响纯追踪算法跟踪精度的重要因素,为实现前视距离的自适应调整,李逃昌等^[10]提出基于模糊理论调整纯追踪算法的前视距离;李革等^[11]通过定义以速度和弯度为自变量的函数,实现前视距离调整,平均跟踪误差为 0.077 m。

已有的路径跟踪算法均需采集机器人两侧驱动轮转速作为反馈量进行转速闭环控制,对于开关阀控制不可闭环调速的液压履带移动平台并不完全适用。由于成本、加工难易度及用户喜好等因素,开关阀控液压履带移动平台在矿业、农业、军工等领域应用十分广泛。目前,在掘进机^[12]、钻孔机^[13]、喷浆机^[14]等大中型煤矿机械中均大量使用该类型底盘。因此,研究开关阀控履带移动平台的路径跟踪控制对于提高煤矿机械智能化水平具有重要意义。

针对开关阀控履带移动平台路径跟踪问题,本文借鉴纯追踪算法的思想,提出一种基于航向角偏差带边界层的 bang-bang 路径跟踪控制算法,并通过李雅普诺夫稳定性定理分析了边界层内外系统状态的稳定性;通过仿真验证算法在不同前视距离下对矩形目标路径的跟踪效果,并与纯追踪算法进行对比,分析两者的路径跟踪性能差异;最后,在试验

样机上对 bang-bang 控制算法进行了地面试验。

1 履带移动平台路径跟踪控制模型

定义导航坐标系为 xoy ,由于平台速度较低,忽略纵向滑移和侧向滑移,假设重心与几何中心重合,则履带移动平台点追踪简化运动学模型如图 1 所示。图 1 中, (x, y) 为平台实时位置; (x_r, y_r) 为当前时刻追踪的目标路径点; θ 为航向角; θ_{err} 为航向角偏差; ρ 为当前位置和目标路径上目标点的距离; r 为纯追踪算法转弯半径; l 为纯追踪算法前视距离; a, b 分别为机器人局部坐标系下前视点 to 机器人几何中心的侧向距离和纵向距离; $d = r - a$; $\Delta x, \Delta y$ 分别为全局坐标系下目标路径点到平台当前位置的距离在 x, y 方向的分量。

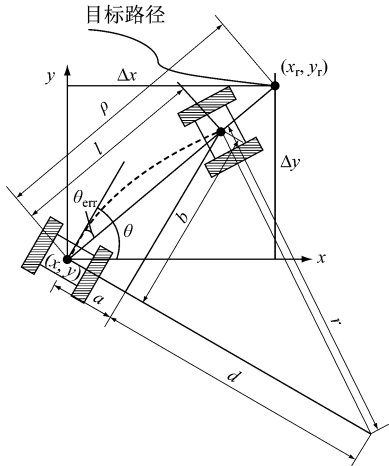


图 1 履带移动平台点追踪简化运动学模型
Fig. 1 Simplified kinematics model of point tracking for crawler mobile platform

履带移动平台的动力学响应可近似为一阶环节,定义 ρ, θ_{err} 、速度 v 及航向角速度 ω 为状态变量,根据几何及运动学关系得到点追踪模型^[15]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta}_{err} \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v \cos \theta_{err} \\ \frac{v \sin \theta_{err}}{\rho} - \omega \\ -\frac{1}{T_v} v + \frac{1}{T_v} u_v \\ -\frac{1}{T_\omega} \omega + \frac{1}{T_\omega} u_\omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: T_v 和 T_ω 为一阶系统时间常数; u_v 和 u_ω 分别

为速度及航向角速度的虚拟控制输入。

定义左右两侧履带线速度为 v_l 和 v_r , 则其与虚拟控制输入的关系为

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{h}{2} \\ 1 & -\frac{h}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_v \\ u_\omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 h 为履带间距。

2 履带移动平台路径跟踪控制算法

2.1 纯追踪算法

纯追踪算法是一种几何控制算法, 可模拟人驾驶车辆行为对平台进行控制。纯追踪算法仅包含前视距离 l 一个可调参数, 在平台运动过程中, 平台将依据自身位置和目标路径搜寻目标路径前进方向上不小于前视距离且与前视距离最接近的离散路径点作为目标点, 然后基于几何关系获得目标曲率。设目标曲率为 γ , 根据图 1 可得

$$\gamma = \frac{2a}{l^2} \quad (3)$$

因为 $\sin \theta_{err} = a/l$, 所以, 式(3)可写为

$$\gamma = \frac{2 \sin \theta_{err}}{l} \quad (4)$$

从式(4)可看出, 纯追踪算法本质上是依据航向角偏差进行控制, 算法以前视距离 l 作为调整参数, 选择较大的 l 可使跟踪平稳, 但收敛时间变长; 选择较小的 l 可提高跟踪精度, 但 l 过小可能造成振荡甚至不稳定。

定义速度控制输入为 $u_v = v_2$, 结合式(4)可得到航向角速度输入量:

$$u_\omega = v_2 \gamma \quad (5)$$

在获得虚拟控制量 u_v 和 u_ω 后, 利用式(2)可得到履带的目标速度。根据式(2), 纯追踪算法需要通过控制两侧履带速度得到虚拟控制量 u_v 和 u_ω , 但是开关阀控履带移动平台两侧履带不可闭环调速, 因此, 纯追踪算法无法直接在开关阀控履带移动平台上应用。

2.2 bang-bang 控制算法

bang-bang 控制又称继电控制, 适用于开关控制输入系统, 便于编程实现及调试, 参数校准及调整简单, 在航天、液压等领域均有应用。bang-bang 控制属于变结构控制, 可在 2 种状态之间切换, 开关阀控履带移动平台的控制信号包含开、关 2 种状态, 因此, 本文基于航向角偏差, 利用 bang-bang 控制实现平台的路径跟踪。

定义 v'_l 和 v'_r 为履带离散控制输入, 用 $\{1, 0, -1\}$ 表示履带前进、停止和后退, 定义平台总是正向

跟踪目标路径, 因此 $u_v > 0$, 根据 u_ω 的符号得到左右履带控制律:

$$v'_l = \begin{cases} -\text{sign}(\theta_{err}) & u_\omega \neq 0 \\ 1 & u_\omega = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$v'_r = \begin{cases} \text{sign}(\theta_{err}) & u_\omega \neq 0 \\ 1 & u_\omega = 0 \end{cases} \quad (7)$$

根据式(5), u_ω 的符号与 v_2 和 γ 有关, 由于 $v_r = u_v > 0$, 故 $\text{sign}(u_\omega) = \text{sign}(\gamma)$ 。根据式(4), 由于前视距离 $l > 0$, 故 $\text{sign}(\gamma) = \text{sign}(\theta_{err})$ 。综上可得, $\text{sign}(u_\omega) = \text{sign}(\theta_{err})$, 故式(6)、式(7)中 u_ω 可以用 θ_{err} 替换:

$$v'_l = \begin{cases} -\text{sign}(\theta_{err}) & \theta_{err} \neq 0 \\ 1 & \theta_{err} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$v'_r = \begin{cases} \text{sign}(\theta_{err}) & \theta_{err} \neq 0 \\ 1 & \theta_{err} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

由于存在扰动或传感器噪声, 式(8)、式(9)会造成电磁阀频繁切换。为减小扰动对系统的影响及电磁阀切换频率, 借鉴滑模控制中减小抖振的方法, 引入边界层, 则控制律修改为

$$v'_l = \begin{cases} -\text{sign}(\theta_{err}) & |\theta_{err}| \geq \epsilon \\ 1 & |\theta_{err}| < \epsilon \end{cases} \quad (10)$$

$$v'_r = \begin{cases} \text{sign}(\theta_{err}) & |\theta_{err}| \geq \epsilon \\ 1 & |\theta_{err}| < \epsilon \end{cases} \quad (11)$$

式中 ϵ 为边界层厚度, rad , $0 < \epsilon \ll \pi/2$, ϵ 越大, 电磁阀切换频率越低, 但跟踪精度也会下降。

在实际应用中, 应在保证满足跟踪精度要求的前提下, 选择较大的 ϵ , 以保护执行器。

对于开关阀控制履带移动平台, 其两侧履带的线速度大小近似相等, 即 $v_l \approx v_r$ 。因此, 根据式(2)可得到在式(10)、式(11)作用下的虚拟控制输入:

$$u_v = \begin{cases} 0 & |\theta_{err}| \geq \epsilon \\ v_3 & |\theta_{err}| < \epsilon \end{cases} \quad (12)$$

$$u_\omega = \begin{cases} \omega_0 \text{sign}(\theta_{err}) & |\theta_{err}| \geq \epsilon \\ 0 & |\theta_{err}| < \epsilon \end{cases} \quad (13)$$

式中: $v_3 = (v_r + v_l)/2$; $\omega_0 = 2(v_r + v_l)/h$ 。

从式(12)、式(13)可知, 当航向角偏差超过边界层时, 移动平台通过原地转向调整姿态, 从而减小航向角偏差; 当航向角偏差在边界层之内时, 平台朝目标点直线行驶。因此, 该算法适用于直线或折线目标路径。

3 稳定性分析

稳定是控制系统的重要性能, 也是系统能够正常运行的首要条件。控制系统在实际运行过程中, 会受到内外因素的扰动。如果系统不稳定, 任何微

小的扰动作用都将导致系统偏离原来的平衡状态,并随着时间发散。因而,分析闭环系统的稳定性,是控制理论的基本任务之一。李雅普诺夫稳定性理论^[16]是控制领域判断系统稳定性的普遍理论,不仅适用于单变量、线性、定常系统,对于多变量、非线性、时变系统同样适用。由于本文中的闭环控制系统为非线性系统,证明其李雅普诺夫稳定性,可判断当系统状态在平衡点邻域内不会发散,即航向角偏差、到目标点的距离等关键状态会收敛至原点附近的邻域内,从而保证路径跟踪正常运行。

根据式(12)、式(13),在路径跟踪过程中存在原地姿态调整和直线行驶 2 种动态过程,2 种动态过程根据 θ_{err} 的值进行切换。下面分别讨论 2 种动态过程中闭环系统的稳定性。

3.1 原地姿态调整过程中的稳定性

移动平台在原地调整姿态下, $|\theta_{\text{err}}| \geq \epsilon$, 将式(12)、式(13)代入式(1),得

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta}_{\text{err}} \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v \cos \theta_{\text{err}} \\ \frac{v \sin \theta_{\text{err}}}{\rho} - \omega \\ -\frac{1}{T_v} v \\ -\frac{1}{T_\omega} \omega + \frac{1}{T_\omega} \omega_0 \text{sign}(\theta_{\text{err}}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

定义该过程初始时刻速度 $v(0) = v_0$, v 在原点渐进稳定,其解为

$$v = v_0 \exp(-t/T_v) \quad (15)$$

式中 t 为时间。

将式(15)代入式(14),消去 v ,得

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta}_{\text{err}} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_0 \exp(-t/T_v) \cos \theta_{\text{err}} \\ \frac{v_0 \exp(-t/T_v) \sin \theta_{\text{err}}}{\rho} - \omega \\ -\frac{1}{T_\omega} \omega + \frac{1}{T_\omega} \omega_0 \text{sign}(\theta_{\text{err}}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

因为 $\cos \theta_{\text{err}}$ 有界,所以, $-v_0 \exp(-t/T_v) \times \cos \theta_{\text{err}}$ 将逐渐收敛至 0,即 $\dot{\rho} = 0$,平台与目标点的距离保持不变,状态 ρ 临界稳定。同理,由于 $v_0 (\sin \theta_{\text{err}})/\rho$ 有界, $v_0 \exp(-t/T_v) (\sin \theta_{\text{err}})/\rho$ 也将收敛至 0。此时,式(16)可简化为

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{\text{err}} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega \\ -\frac{1}{T_\omega} \omega + \frac{1}{T_\omega} \omega_0 \text{sign}(\theta_{\text{err}}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

基于李雅普诺夫稳定性理论分析简化后状态空间模型的稳定性,得出如下结论:当 $|\theta_{\text{err}}| \geq \epsilon$ 时,在式(12)、式(13)的作用下, $T_\omega > 0$ 且 $\omega_0 > 0$ 时,系统在原点是李雅普诺夫稳定的。下面对该结论进行证明。

选取备选李雅普诺夫函数:

$$V = 2T_\omega \omega_0 \theta_{\text{err}} \text{sign}(\theta_{\text{err}}) + \theta_{\text{err}}^2 + T_\omega^2 \omega^2 - 2T_\omega \theta_{\text{err}} \omega \quad (18)$$

当 $\theta_{\text{err}} \neq 0, \omega \neq 0$ 时,因为 $\omega_0 > 0, T_\omega > 0$,得到 $2T_\omega \omega_0 \theta_{\text{err}} \text{sign}(\theta_{\text{err}}) > 0$ 。

对于 $\theta_{\text{err}}^2 + T_\omega^2 \omega^2 - 2T_\omega \theta_{\text{err}} \omega$, 可作如下转换:

$$\theta_{\text{err}}^2 + T_\omega^2 \omega^2 - 2T_\omega \theta_{\text{err}} \omega = \begin{bmatrix} \theta_{\text{err}} & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -T_\omega \\ -T_\omega & T_\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{\text{err}} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (19)$$

设 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & -T_\omega \\ -T_\omega & T_\omega^2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}$ 为半正定矩阵, $\mathbf{P} \geq 0$,

因此 $\theta_{\text{err}}^2 + T_\omega^2 \omega^2 - 2T_\omega \theta_{\text{err}} \omega \geq 0, V > 0$ 。

当 $\theta_{\text{err}} = 0, \omega = 0$ 时, $V = 0$ 。

下面证明 $\dot{V} < 0$ 。对 V 求导,并结合式(17)进行化简可得

$$\dot{V} = 2T_\omega \omega_0 \text{sign}(\theta_{\text{err}}) \dot{\theta}_{\text{err}} + 2\theta_{\text{err}} \dot{\theta}_{\text{err}} + 2T_\omega^2 \omega \dot{\omega} - 2T_\omega \omega \dot{\theta}_{\text{err}} - 2T_\omega \theta_{\text{err}} \dot{\omega} = -2\theta_{\text{err}} \text{sign}(\theta_{\text{err}}) \quad (20)$$

当 $\theta_{\text{err}} \neq 0$ 时, $\dot{V} = -2\theta_{\text{err}} \text{sign}(\theta_{\text{err}}) < 0$, 根据李雅普诺夫稳定性定理,系统在原点渐进稳定。引入边界层后, $t > 0, |\theta_{\text{err}}| \geq \epsilon$ 时仍有 $\dot{V} < 0$, 即系统在平衡点 ϵ 邻域是李雅普诺夫稳定的。

3.2 沿直线行驶过程中的稳定性

移动平台在沿直线行驶状态下, $|\theta_{\text{err}}| < \epsilon$, 将式(12)、式(13)代入式(1),得

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta}_{\text{err}} \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v \cos \theta_{\text{err}} \\ \frac{v \sin \theta_{\text{err}}}{\rho} - \omega \\ -\frac{1}{T_v} v + \frac{1}{T_v} v_3 \\ -\frac{1}{T_\omega} \omega \end{bmatrix} \quad (21)$$

分析 ρ 和 v 的稳定性,得出如下结论:当 $|\theta_{\text{err}}| < \epsilon$ 时,在式(12)、式(13)的作用下, v 在平衡点 v_3 处是渐进稳定的, ρ 在原点处是李雅普诺夫稳定的。下面对该结论进行证明。

先证明 v 在平衡点 v_3 处渐进稳定。在该过程的初始时刻,有 $v(0) = 0$, 根据式(21)可得到 $v(t) = v_3 - v_3 \exp(-t/T_v)$ 。因此, v 是渐进稳定的,其平衡点为 v_3 。当 $t > 0$ 时, $v > 0$ 且最终收敛至 v_3 。

下面证明 ρ 在原点处李雅普诺夫稳定。当 $t > 0$ 时,选择备选李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} \rho^2 \quad (22)$$

对式(22),当且仅当 $\rho = 0$ 时, $V = 0$, 否则, $V > 0$ 。对 V 求导,并代入 $v(t)$ 可得

$$\dot{V} = \rho \dot{\rho} = -\rho(v_3 - v_3 \exp(-t/T_v)) \cos \theta_{\text{err}} \quad (23)$$

根据纯追踪算法,在路径跟踪过程中,平台与目标点的距离 ρ 不小于前视距离 l ,即 $\rho \geq l > 0$ 。由于 $0 < \epsilon \ll \pi/2$,故当 $|\theta_{\text{err}}| < \epsilon$ 时,有 $0 < \cos \epsilon < \cos \theta_{\text{err}} \leq 1$,即 $\cos \theta_{\text{err}}$ 有界。因此, $\dot{V} \leq -\rho v_3 < 0$,根据李雅普诺夫稳定性定理,系统是李雅普诺夫稳定的。

上述证明过程说明,当 $|\theta_{\text{err}}| < \epsilon$ 且 $\epsilon \ll \pi/2$ 时,状态 θ_{err} 和 ω 并不影响 ρ 和 v 的稳定性。但是,状态 θ_{err} 在原点是不稳定的。为便于分析,仅考虑 ρ 和 v 到达稳态的情况,此时, $\rho = l, v = v_3$ 。在 $\theta_{\text{err}} = 0$ 及 $\omega = 0$ 附近线性化, $\sin \theta_{\text{err}} \approx \theta_{\text{err}}$,从而可得

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{\text{err}} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_3}{l} & -1 \\ 0 & -\frac{1}{T_\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{\text{err}} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (24)$$

线性化系统的状态矩阵存在特征值 v_3/l ,因此,当 $\theta_{\text{err}} \neq 0$ 时, θ_{err} 将发散,直到 θ_{err} 超过边界层,控制律使其重新收敛到 ϵ 内。 θ_{err} 的发散速度取决于 v_3/l ,选择较大的前视距离可减小 θ_{err} 的发散速度,避免平台频繁调整姿态。

4 仿真分析

为验证上述控制算法的路径跟踪性能,以中煤科工集团重庆研究院的履带移动平台为原型,在 Recurdyn 中搭建动力学仿真模型,同时在 Matlab/Simulink 平台建立路径跟踪控制算法,通过 Recurdyn 和 Matlab/Simulink 联合仿真验证算法的有效性,分析前视距离对控制算法的影响,并与纯追踪算法进行对比。

4.1 不同前视距离下路径跟踪仿真

采用矩形路径作为平台的目标路径,设置 $\epsilon = 0.087 \text{ rad}$,初始平台位置在 $(0,0)$ 附近,初始航向角为 0 ,平台直线行驶速度为 0.15 m/s ,采样频率为 10 Hz ,前视距离 l 分别为 0.4 m 和 0.8 m ,仿真结果如图 2 所示。路径跟踪误差有多种定义方式,本文基于文献[17]中的方法,定义路径跟踪误差 e 为平台几何中心到目标路径的最短距离。

从图 2(a)可看出,当前视距离为 0.4 m 和 0.8 m 时,算法对直线目标路径均具有较高的跟踪精度,但在转角处都出现了“抄近道”的现象。这是由于算法总是根据前视距离的大小预瞄目标路径点,根据当前位置和目标位置提前做出转向动作。从图 2(b)可看出,因为初始点与目标路径相距较远,所以最大跟踪误差出现在初始点处,当平台开始运动后,误差逐渐减小。在稳态跟踪阶段,路径跟踪误差峰值出现在转角处,当前视距离为 0.4 m 时,转角处最大误差为 0.1809 m ,前视距离 0.8 m 时,

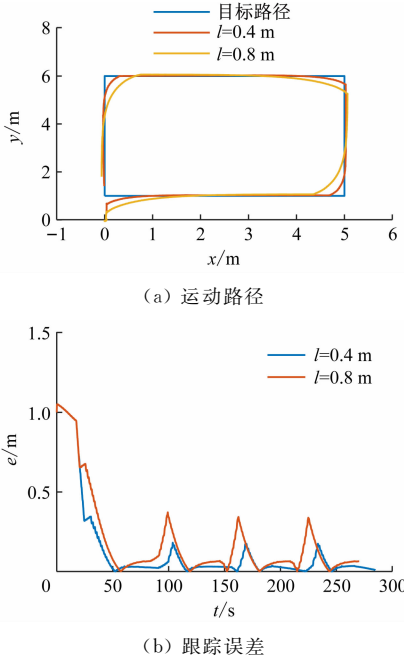


图 2 不同前视距离下路径跟踪仿真结果
Fig. 2 Path tracking simulation results with different look-ahead distance

转角处最大误差为 0.3715 m 。

采用平均误差和稳态误差作为统计指标衡量路径跟踪质量^[18],平均误差为整个跟踪过程路径跟踪误差的平均值,稳态误差为路径跟踪误差首次到达 0 之后路径跟踪误差平均值,统计结果见表 1。从表 1 可看出,在保证稳定的前提下,选择较小的前视距离可提高路径跟踪精度。

表 1 不同前视距离下路径跟踪仿真统计结果
Table 1 Statistical results of path tracking simulation with different look-ahead distance m

前视距离	平均误差	稳态误差
0.4	0.126 1	0.037 9
0.8	0.188 4	0.089 3

4.2 对比仿真分析

设置纯追踪算法前视距离为 0.4 m ,且履带驱动轮可调速,其余条件与上文相同,对纯追踪算法和 bang-bang 控制算法进行对比仿真分析,结果如图 3 所示。

从图 3 可看出,直线跟踪阶段,纯追踪算法的跟踪误差略小于 bang-bang 控制算法;在整个跟踪过程中,纯追踪算法的平均跟踪误差为 0.0638 m ,稳态跟踪误差为 0.0304 m ,也略优于 bang-bang 控制算法;但在转角处,纯追踪算法出现了明显的超调,跟踪误差峰值为 0.3489 m ,高于 bang-bang 控制算法。

对比 2 种算法的跟踪效率,纯追踪算法跟踪至最终目标点耗时约为 208.8 s ,bang-bang 控制算法

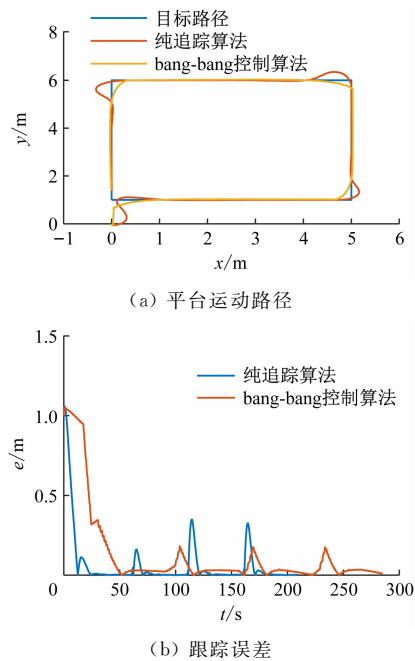


图3 纯追踪算法和 bang-bang 控制算法仿真结果对比

Fig.3 Comparison of simulation results between pure pursuit algorithm and bang-bang control algorithm

的耗时为 284.8 s,纯追踪算法效率高于 bang-bang 控制算法,其主要原因在于带调速的纯追踪算法可以在速度为 0.1 m/s 的前提下持续跟踪目标点。

5 样机试验

5.1 试验样机

本文试验样机由中煤科工集团重庆研究院履带式移动平台进行改装得到,如图 4 所示。样机质量约为 8 t,采用液压驱动的履带式摩擦底盘,履带间距为 0.93 m,最大线速度约为 0.15 m/s。移动平台电控箱上方安装有 1 个激光雷达和 1 个六轴惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU),用于同步定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping,SLAM)。激光雷达型号为 Velodyne VLP-16,测量距离为 100 m,检测精度为 ± 0.03 m。IMU 型号为 LPMS-BE1,其欧拉角测量分辨率小于 0.1° ,静态、动态测量精度小于 2° 。工控机用于 SLAM 和路径跟踪控制,PLC 用于底盘电磁阀控制,工控机与 PLC 之间通过以太网

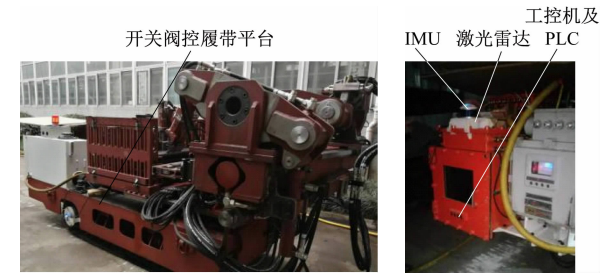


图4 履带移动平台试验样机

Fig.4 Experimental prototype of crawler mobile platform

Modbus 协议通信。

自主导航行走系统架构如图 5 所示。

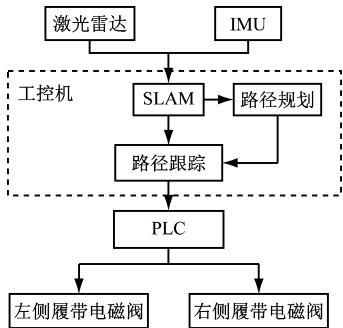


图5 自主导航行走系统架构

Fig.5 Architecture of autonomous navigation system

5.2 路径跟踪试验

采用激光雷达及 IMU 建立测试场地的二维地图,然后基于地图坐标系规划目标路径。路径函数为 $y = -0.051\ 2x - 0.143\ 5$,起始目标点坐标为 $(2.4, -0.266\ 5)$ 。履带移动平台以约 0.05 m/s 的速度跟踪目标路径,SLAM 以 10 Hz 的频率实时输出激光雷达位置,通过坐标变换得到履带移动平台几何中心的位置。设控制算法前视距离 $l = 0.5$ m, $\epsilon = 0.087$ rad。进行 2 次试验,试验 1 中履带移动平台初始位置为 $(0.729\ 1, -0.262\ 7)$,试验 2 中履带移动平台初始位置为 $(1.520\ 7, -0.232\ 8)$,试验结果如图 6 所示。

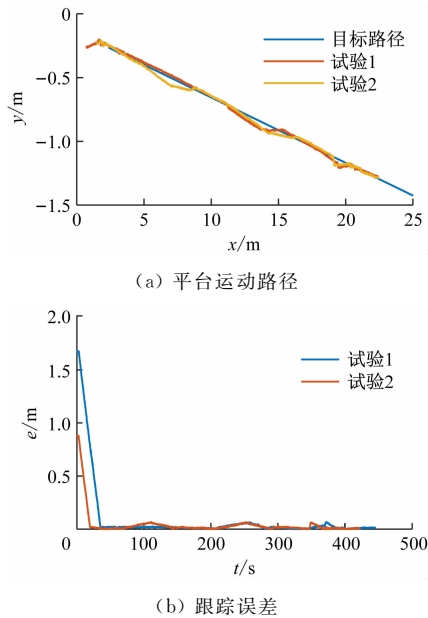


图6 履带移动平台路径跟踪试验结果

Fig.6 Path tracking test results of crawler mobile platform

从图 6(a)可看出,履带移动平台启动后迅速向目标路径运动,在行驶过程中,当其偏离目标路径时,会调整前进方向,回到目标路径上。从图 6(b)可看出,初始误差为履带移动平台与起始目标点的距离,当履带移动平台开始运动后,误差逐渐收敛至

0 附近。

2 次试验的统计结果见表 2。因为平均误差与初始位置有关,所以试验 1 的平均误差大于试验 2;2 次试验稳态误差均为 0.02 m 左右,说明系统路径跟踪稳态误差小且一致性较好。

表 2 路径跟踪试验统计结果

Table 2 Statistical results of path tracking experiments

试验序号	平均误差/m	稳态误差/m
1	0.087 7	0.018 7
2	0.042 4	0.020 3

6 结论

(1) bang-bang 控制算法的平均跟踪误差及稳态跟踪误差略高于带闭环调速的纯追踪算法,但在转角处的跟踪误差小于纯追踪算法。

(2) 仿真分析和样机试验结果表明,bang-bang 控制算法可用于无闭环调速履带移动平台的直线或折线类型路径跟踪,且稳态误差均小于 9 cm。

(3) 在保证稳定的前提下,bang-bang 控制算法可选择较小的前视距离,以获得更高的跟踪精度。

(4) 纯追踪算法仅包含前视距离 1 个调整参数,而 bang-bang 控制算法引入了边界层厚度,该参数对路径跟踪精度及跟踪效率有重要影响。边界层厚度越大,则跟踪精度越低,跟踪效率越高。下一步将对前视距离和边界层厚度的自适应调整进行研究。

参考文献 (References):

[1] 葛世荣,胡而已,裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. 煤炭学报,2020,45(1):455-463.
GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(1):455-463.

[2] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction(primary stage)[J]. Coal Science and Technology,2019,47(8):1-36.

[3] AMER N H, ZAMZURI H, HUDHA K, et al. Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles:a review of state of the art and challenges [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2017,86:225-254.

[4] PADEN B, CAP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles [J]. IEEE Transactions on

Intelligent Vehicles,2016,1(1):33-55.

[5] MERA M, RÍOS H, MARTÍNEZ E A. A sliding-mode based controller for trajectory tracking of perturbed unicycle mobile robots [J]. Control Engineering Practice,2020,102:1-11.

[6] MATRAJI I, AL-DURRA A, HARYONO A, et al. Trajectory tracking control of skid-steered mobile robot based on adaptive second order sliding mode control[J]. Control Engineering Practice, 2018, 72: 167-176.

[7] YU S, LI X, CHEN H, et al. Nonlinear model predictive control for path following problems [J]. IFAC Proceedings Volumes,2012,45(17):145-150.

[8] MORALES J, MARTÍNEZ J L, MARÍA M A, et al. Pure-pursuit reactive path tracking for nonholonomic mobile robots with a 2D laser scanner[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing,2009:1-10.

[9] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动驾驶作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15-21.
LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(1):15-21.

[10] 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报,2013,44(1):205-210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):205-210.

[11] 李革,王宇,郭刘粉,等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J]. 农业机械学报,2018,49(5):21-26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):21-26.

[12] 马宏伟,王世斌,毛清华,等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. 煤炭学报,2021,46(1):310-320.
MA Hongwei, WANG Shibin, MAO Qinghua, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(1):310-320.

[13] 张始斋. ZYWL 系列履带式自动钻机模块化设计[J]. 煤矿机械,2020,41(6):11-13.
ZHANG Shizhai. Modularization design of ZYWL series crawler type automatic drilling rig [J]. Coal Mine Machinery,2020,41(6):11-13.

[14] 周刚,张琦,程卫民,等. 煤矿锚喷作业区喷浆粉尘数

- 值模拟与新型湿喷一体机研制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(2): 606-614.
- ZHOU Gang, ZHANG Qi, CHENG Weimin, et al. Numerical simulation on gunite dust of bolt-shotcrete operating area in coal mine and development of new wet spraying integral machine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(2): 606-614.
- [15] PALMIERI L, ARRAS K O. Distance metric learning for RRT-based motion planning with constant-time inference[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, 2015.
- [16] KHALIL H K. Nonlinear systems[M]. 3rd Edition. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002.
- [17] HOFFMANN G, TOMLIN C J, MONTEMERLO M, et al. Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: controller design, experimental validation and racing[C] // American Control Conference, New York, 2007.
- [18] 姚立健, SANTOSH K P, 杨自栋, 等. 基于超宽带无线定位的农业设施内移动平台路径跟踪研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 17-24.
- YAO Lijian, SANTOSH K P, YANG Zidong, et al. Path tracking of mobile platform in agricultural facilities based on ultra wideband wireless positioning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 17-24.