doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.004

崎岖山地环境履带机器人降维变系数控制方法研究

刘　路[1,2]　杨　冰[1]　韦　东[1]　宋　宇[1,2]　陈黎卿[1,2]　孙　燕[1,3]

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;
3. 安徽省工业节电与电能质量控制协同创新中心, 合肥 230601)

摘要: 针对崎岖山地环境下自走式履带机器人自走姿态波动大、跟踪精度低等问题,研究了三维崎岖路面履带机器人控制方法。通过分析机器人在二维平整路面与三维崎岖路面的运动学模型,建立了降维运动学几何模型;设计了一种基于降维变系数的滑模控制方法,实现三维崎岖路面履带机器人的运动控制,并进行了平整路面与崎岖路面的路径跟踪仿真与试验。仿真结果表明,平整路面仿真中,行驶方向误差逐渐减小并趋近于 0,侧向位置误差在 ±0.2 m 内波动,并可在 1 s 内完成姿态调整;崎岖路面仿真中,三轴位置误差均控制在 ±0.1 m 范围内,同样可在 1 s内完成姿态调整。路径跟踪田间试验结果表明,平整路面和崎岖路面机器人跟踪稳定后的横向误差分别为 −2.9 ~ 8.8 cm、−14.3 ~ 21.5 cm,姿态误差分别控制在 ±2°、±5°内,能够满足实际跟踪需求。

关键词: 履带机器人; 路径跟踪; 降维变系数

中图分类号: TP242.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)02-0029-08　　**OSID**:

Control Method of Dimensionality Reduction Coefficient of Rugged Mountain Environment Catching Robot

LIU Lu[1,2]　YANG Bing[1]　WEI Dong[1]　SONG Yu[1,2]　CHEN Liqing[1,2]　SUN Yan[1,3]

(1. *College of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment*, *Hefei* 230036, *China*
3. *Collaborative Innovative Center of Industrial Energy-saving and Power Quality Control*, *Anhui Province*, *Hefei* 230601, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of large fluctuation of the attitude and low tracking accuracy of the self-propelled crawler robot in the rugged mountainous environment, a three-dimensional rugged tracked robot control method was studied. The geometric model of dimensionality reduction kinematics was established by analyzing the kinematics model of the two-dimensional flat road and three-dimensional rugged road surface of the robot. Then, a sliding mode control method based on the dimensionality reduction coefficient was designed to realize the three-dimensional rugged road track. The motion control of the robot and the path tracking simulation and experiment of the smooth road surface and the rugged road surface were carried out. The simulation results showed that the driving direction error was gradually decreased and approached 0 in the smooth road simulation, the lateral position deviation fluctuated within ±0.2 m, and the attitude adjustment can be completed within 1 s; the three-axis position error in the rough road simulation was controlled in the range of ±10 cm, the attitude adjustment can also be completed within 1 s. Through the path tracking test of smooth road surface and rugged road surface, the lateral deviation after robot tracking stabilization was −2.9 ~ 8.8 cm and −14.3 ~ 21.5 cm, respectively, and the attitude error was controlled within ±2° and ±5°, respectively, which satisfied the actual tracking demand.

Key words: crawler robot; path tracking; dimensionality reduction coefficient

收稿日期: 2019-09-19　修回日期: 2019-12-11

基金项目: 安徽省自然科学研究重大项目(KJ2018ZD016)、安徽省高校自然科学研究项目(KJ2019A0173)和安徽省工业节电与电能质量控制协同创新中心开放课题项目(KFKT201605)

作者简介: 刘路(1988—),男,讲师,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: vliulu@ahau.edu.cn

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

0 引言

近年来,小型履带机器人广泛应用于田间作业中,由于田间路面崎岖不平[1-3],易造成航向偏差增大。因此,车身侧倾、俯仰对小型履带式机器人的影响成为农田环境下农业导航控制领域不可忽视的因素[4-8]。为解决路面崎岖不平对小型履带机器人的影响问题,国内外诸多学者多采用二维平面滑模控制(SMC)作为位姿控制系统[9-14],解决了二维平整路面路径跟踪的问题。机器人在三维崎岖路面上的姿态控制误差与机器人行驶过程中的姿态变化有关,需要探索合适的姿态检测及控制修正方法,以提升机器人实时控制精度[15-20]。

针对上述问题,本文以小型履带机器人作为研究对象,设计一种基于降维变系数的滑模控制系统,该系统采用惯导传感器与 RTK 北斗定位系统,实时检测车身位姿信息,微控制器将理想位姿信息作为降维变系数系统的控制输入,实时匹配两侧履带运行速度,以达到在崎岖路面修正车身航向、提高行驶稳定性的目的。

1 履带机器人系统组成与原理

1.1 履带机器人结构及主要参数

为了实现行距 800 mm 的垄间精确导航和精准控制,履带机器人的整机结构如图 1 所示,主要功能包括机器人运行过程中通信、电机驱动和车身控制,相关技术参数如表 1 所示。

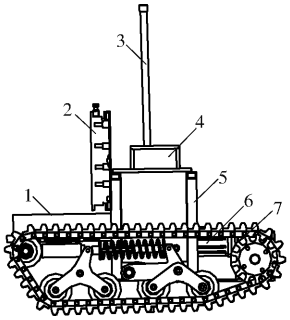


图 1 小型履带机器人整机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of small robot

1. 控制盒 2. 网桥 3. 天线 4. 惯导传感器 5. 车架 6. 直流无刷电机 7. 旋转编码器

表 1 小型履带植保机器人主要技术参数

Tab. 1 Main structure parameters of small plant protection robot

参数	数值/型式
整机型式	履带式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	850×400×1 800
整机质量/kg	50
轴距/mm	800
轮距/mm	300

1.2 降维变系数底盘建模方法

机器人在路面上行驶时,地面坐标系为 XOY,机器人的局部坐标系 xoy 中令机器人质心为原点,局部坐标系相对于地面坐标系的位姿可表示为 $\boldsymbol{T}_1$,如图 2 所示。

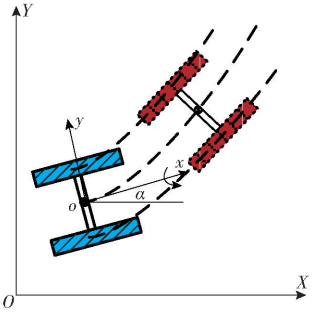


图 2 二维平整路面运动简图

Fig. 2 Sketch of two-dimensional leveling road movement

图 2 机器人的二维运动学方程与误差方程为

$$\boldsymbol{T}_1(x,y,\alpha)=\boldsymbol{N}_1(\alpha)\boldsymbol{Q}_1(v,\omega) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{K}_1(x_e,y_e,\alpha_e)=\boldsymbol{R}_1(\alpha)\boldsymbol{A}_1(\Delta) \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{T}_1(x,y,\alpha)$——二维机器人位姿

x、y——机器人运动时,x、y 轴方向移动距离

α——机器人运动时,局部坐标系 x 轴与地面坐标系 X 轴间的夹角,亦称为偏航角

$\boldsymbol{N}_1(\alpha)$——二维实际和理想位姿坐标系转换矩阵

$\boldsymbol{Q}_1(v,\omega)$——二维机器人线速度、角速度矩阵

v——线速度

ω——角速度

$\boldsymbol{K}_1(x_e,y_e,\alpha_e)$——二维机器人位姿误差

x_e、y_e——x、y 方向误差

α_e——偏航角误差

$\boldsymbol{R}_1(\alpha)$——二维实际位姿和理想位姿误差坐标系转换矩阵

$\boldsymbol{A}_1(\Delta)$——二维实际位姿与理想位姿误差矩阵

Δ——二维实际位姿与理想位姿误差

机器人在非平整路面运动时,出现随机的姿态侧向或俯仰变化,二维运动模型的路径跟踪会有较大跟踪误差。为保证机器人的路径跟踪精度,需要对车身上述姿态变化导致的误差进行补偿以实现姿态的修正与位置纠偏。

三维运动模型与二维运动模型相比,增添垂直于地平面方向的 Z 轴,如图 3 所示。降维模型利用机器人实际三维空间位姿与理想三维空间旋转映射关系,使机器人运动过程中通过对映射后的轮距、航向的投影参数修正将控制模型始终保持在地面坐标系 XOY 平面内,从而去除控制模型中 z 轴方向变量,θ、γ 为机器人运动时自身所处的局部

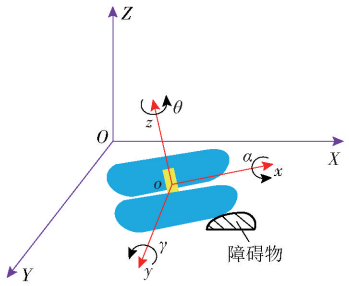


图 3　三维崎岖路面运动简图

Fig. 3　Three-dimensional sketch of movement on rugged road

坐标系中 z、y 轴分别与地面坐标系中 Z、Y 轴的夹角，即横滚角与俯仰角。其自身所处的局部坐标系原点相对于地面坐标系的位姿表示为 $(x,y,z,\alpha,\theta,\gamma)$，因此其降维变系数模型、运动学方程与误差方程为

$$\boldsymbol{U}(x_e,y_e,\alpha_e)=\boldsymbol{f}(\theta,\gamma) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{T}_2(x+x_e,y+y_e,\alpha+\alpha_e)=\boldsymbol{N}_1(\alpha)\boldsymbol{f}(\theta,\gamma)\boldsymbol{Q}_1(v,\omega) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{K}_2(x_e,y_e,\alpha_e)=\boldsymbol{R}_2(\alpha)\boldsymbol{f}(\theta,\gamma)\boldsymbol{A}_2(\Delta) \tag{5}$$

式中　$\boldsymbol{U}(x_e,y_e,\alpha_e)$——投影参数修正函数

$\boldsymbol{f}(\theta,\gamma)$——空间旋转映射函数

$\boldsymbol{T}_2(x+x_e,y+y_e,\alpha+\alpha_e)$——三维机器人位姿

$\boldsymbol{K}_2(x_e,y_e,\alpha_e)$——三维车身位姿误差

$\boldsymbol{R}_2(\alpha)$——三维实际位姿和理想位姿误差坐标系转换矩阵

$\boldsymbol{A}_2(\Delta)$——三维实际位姿与理想位姿误差矩阵

上述降维变系数中，将图 3 所示三维状态下机器人位姿通过映射投影的方法获得理想位姿。在映射投影过程中，姿态发生变化产生二维平面位姿误差，因此，采用投影参数修正函数 $\boldsymbol{U}(x_e,y_e,\alpha_e)$ 通过映射函数 $\boldsymbol{f}(\theta,\gamma)$ 对产生的误差进行补偿，进而消除 z 轴方向与 θ、γ 波动对跟踪精度的影响。三维运动学模型 $\boldsymbol{T}_2$ 在映射函数 $\boldsymbol{f}(\theta,\gamma)$ 的补偿下进行二维控制，最终达到降维控制的目的。

2　降维变系数控制方法

在降维运动学几何模型基础上，设计基于降维变系数的位置控制外环、偏航角控制内环、满足机器人运动约束条件的控制策略，实现机器人对于位置、姿态的精确控制，同时实现在崎岖非平整路面上平稳行驶的功能。

2.1　纠偏系统工作原理

本文所研究的双轮差速转向履带机器人，通过控制两驱动轮的转速对车身姿态与理想轨迹进行调节与跟踪。机器人实际位置信息作为控制输入，其线速度与角速度作为控制输出，通过理想路径与实际路径的误差反馈，由纠偏控制系统消除理想位置与实际位置的误差，最终实现路径跟踪。

上述闭环系统属于双环滑模控制系统，其中姿态控制系统为内环，位置控制系统为外环。位姿信息在控制律 p_1、p_2、p_3 和 p_4 的控制下通过降维变系数模型传递给内外环控制，完成对线速度、角速度的控制，最终达到路径跟踪的目的。其控制流程图如图 4 所示。

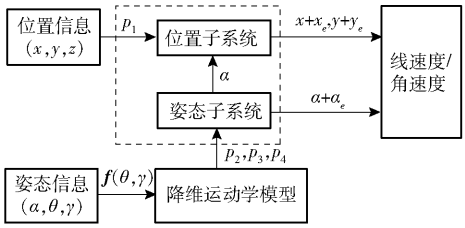


图 4　降维变系数控制系统流程图

Fig. 4　Flow chart of dimension reduction and variable coefficient control system

2.2　降维变系数控制系统组成

降维变系数控制系统由 STM32F407ZGT6 型微处理器、MTI－G－710 型惯导传感器、ZM－6615 型直流无刷电机驱动器、直流无刷电机等组成，如图 5 所示。其中，惯导传感器提供姿态信息，RTK 北斗定位系统提供位置信息，上位机根据控制模型输出控制变量，输出的控制变量通过运动控制器将线速度、角速度信息转换成左右履带轮电机转速，最终两轮差速运动实现路径跟踪。

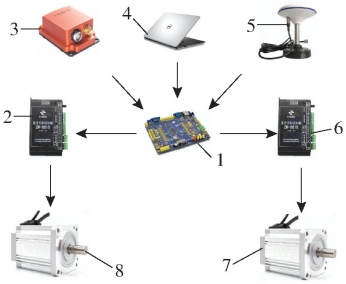


图 5　控制系统组成与结构

Fig. 5　Composite and structure of control system

1. 运动控制器　2、6. 直流无刷电机驱动器　3. 惯导传感器　4. 上位机　5. 北斗传感器　7、8. 直流无刷电机

2.3　降维变系数控制系统设计

2.3.1　位置外环控制律设计

对位置外环控制律 p_1 进行设计，以跟踪理想位置 (x_d,y_d)。选取 x 方向的滑模函数 $s_1=a_1x_e+\dot{x}_e$，此处，a_1 为正数。

$$\dot{s}_1=a_1\dot{x}+p_{1x}+q_1 \tag{6}$$

上述位置控制系统中 p_1 在 x 方向的子系统控制律为 p_{1x}

$$p_{1x}=-(\lambda_1 s_1+a_1\dot{x}+\eta_1\mathrm{sgn}s_1)\quad(\lambda_1>0,\eta_1>0)$$

式中　q_1——波动量　　λ_1、a_1、η_1——控制参数

由此可以得到

$$\dot{s}_1 = q_1 - (\lambda_1 s_1 + \eta_1 \mathrm{sgn} s_1) \tag{7}$$

若系统趋于稳定,则 x 方向线速度为

$$v_x = 0.5\dot{s}_1^2$$

由于 $\dot{v}_1 = -\lambda_1 s_1^2 - \eta_1 |s_1| + q_1 s_1 \leqslant -\lambda_1 s_1^2$,调节参数 λ_1、a_1、η_1 使 s_1 指数收敛,同时 x 指数收敛于 x_d,且 $\dot{x}$ 收敛于 $\dot{x}_d$。

同理,针对 y 控制系统,设计控制律为

$$p_{1y} = -(\lambda_2 s_2 + a_2 \dot{y} + \eta_2 \mathrm{sgn} s_2) \tag{8}$$

式中 λ_2、a_2、η_2——控制参数

p_{1y}——在 y 方向的位置子系统控制律

s_2——在 y 方向的滑模函数

因此,s_2 指数收敛,y 指数收敛于 y_d,$\dot{y}$ 指数收敛于 $\dot{y}_d$。最终实现履带机器人对理想位置曲线的路径跟踪。

2.3.2 偏航角内环控制律设计

在降维变系数控制策略的偏航角内环控制系统中,对偏航角 α 系统的控制律 p_2 进行设计。令 $\alpha_e = \alpha - \alpha_d$,$\alpha_d$ 为理想偏航角,取滑模函数 $s_4 = a_4\alpha_e + \dot{\alpha}_e$,$a_4 > 0$,控制律为

$$\dot{s}_4 = a_4 + p_2 - \ddot{a}_d + q_4 \tag{9}$$

其中 $p_2 = \ddot{\alpha}_d - (a_4\dot{\alpha}_e + \lambda_4 s_4 + \eta_4 \mathrm{sgn} s_4)$

$(\lambda_4 > 0, \eta_4 > 0)$

式中 q_4——波动量

得到 $\dot{s}_4 = q_4 - (k_4 s_4 + \eta_4 \mathrm{sgn} s_4)$

若系统趋于稳定,则需要 x 方向线速度为

$$v_4 = 0.5 s_4^2$$

由于 $\dot{v}_4 = -(\lambda_4 s_4^2 + \eta_4 |s_4|) + q_4 s_4 \leqslant -\lambda_4 s_4^2$,调节参数 λ_4、a_4、η_4 实现 s_4 指数收敛,α 收敛于 α_d,即履带式机器人实现偏航角 α 的理想姿态角跟踪。

同理,针对 θ、γ 控制系统,其控制律为

$$p_3 = \ddot{\theta}_d - (a_5\dot{\theta}_e + \lambda_5 s_5 + \eta_5 \mathrm{sgn} s_5) \tag{10}$$

$$p_4 = \ddot{\gamma}_d - (a_6\dot{\gamma}_e + \lambda_6 s_6 + \eta_6 \mathrm{sgn} s_6) \tag{11}$$

从而实现 s_5、s_6 指数收敛,θ、γ 收敛于理想姿态 θ_d、γ_d。最终实现履带机器人对理想姿态曲线的角度跟踪。

由于独立的外环控制在位置跟踪过程中易受到姿态波动的影响,产生跟踪误差大、稳定性差的情况,因此引入偏航角内环控制,通过内环收敛速度大于外环收敛速度的方法,确保整个降维变系数控制系统的稳定。

3 仿真试验

为了验证降维变系数控制方法可在二维路面上进行精确跟踪,以双轮差速转向模型作为仿真对象,在 Matlab/Simulink 环境下进行二维平整路面路径跟踪仿真试验。二维路径追踪试验中,初始位置与姿态设为(0,0,0,0,0,0),设置理想路径为

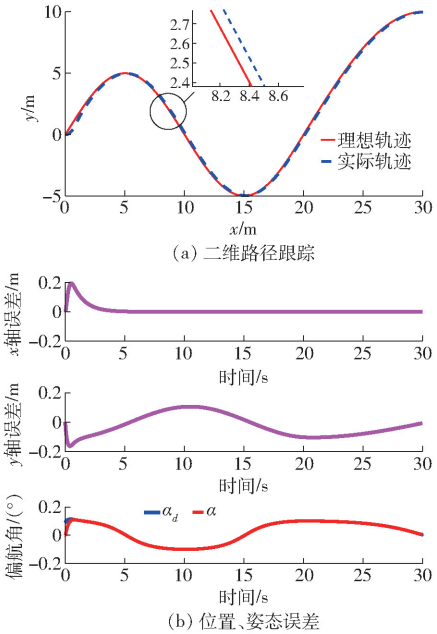
$$y_d = \begin{cases} 5\sin(0.1\pi x_d) & (0 \leqslant x_d \leqslant 20\ \mathrm{m}) \\ -10\sin(0.05\pi x_d) & (20\ \mathrm{m} < x_d \leqslant 30\ \mathrm{m}) \end{cases} \tag{12}$$

表 2 二维仿真相关参数

Tab. 2 2D simulation related parameters

参数	数值
仿真时间/s	30
采样间隔/s	0.1
转向角/rad	0.1
轮距/mm	350
a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6	5、5、0、30、0、0
λ_1、λ_2、λ_3、λ_4、λ_5、λ_6	5、5、0、30、0、0
$\eta_1 \sim \eta_6$	0.1

在此平面路径下,进行二维路径仿真跟踪时,由于不存在 z 轴数据,故而仅需仿真 x、y 轴误差与追踪 α 即可。仿真结果如图 6 所示。



(a) 二维路径跟踪

(b) 位置、姿态误差

图 6 二维路径跟踪仿真结果

Fig. 6 Simulation results of two-dimensional path tracking

二维路径仿真结果表明,二维平整路面路径跟踪过程中,x 轴误差在初始的 0 ~ 2 s 内便逐渐减少至 0。y 轴误差始终控制在 ±0.2 m 之间,偏航角最初的 1 s 内精确跟踪了理想角度。

为了验证降维变系数控制方法在三维崎岖路面跟踪的精确性,进行三维路径跟踪仿真试验,具体仿真参数如表 3 所示。

考虑到路面起伏,取理想路径函数为

$$\begin{cases} x_d = 30\cos t \\ y_d = 30\sin t \\ z_d = 0.3 - \cos(6t) \end{cases} \tag{13}$$

表 3　三维仿真相关参数

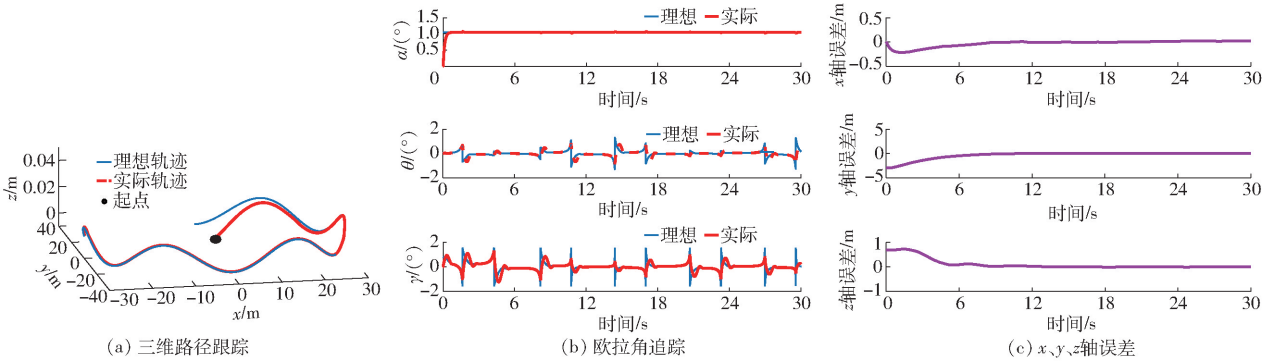
Tab. 3　3D simulation related parameters

参数	数值
仿真时间/s	30
采样间隔/s	0.1
转向角/rad	0.1
轮距/mm	350
a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6	3、3、30、30、30
λ_1、λ_2、λ_3、λ_4、λ_6	3、3、30、30、30
$\eta_1 \sim \eta_6$	0.1

初始位置与姿态设为(0,0,0,0,0,0)。

三维路径跟踪仿真结果如图 7 所示。图 7a 表明，履带机器人可精确跟踪二维平整路面理想轨迹，结合图 7b 欧拉角追踪，表明机器人在跟踪上理想偏航角 α_d 后，便无较大范围的波动。在三维路面的顶点或坑底等角度瞬间变化时，降维变系数控制方法能在 1 s 内快速地跟踪理想的偏航角、滚动角和俯仰角。

结合图 7a 与图 7c 可以看出，由于起始点位置设为原点，故而在 0 ~ 6 s 的初始阶段 x、y、z 轴存在较大的误差。6 s 后，随着时间的增加，三轴位置误差逐渐减小，直至误差在 ±0.1 m 内波动。



(a) 三维路径跟踪　(b) 欧拉角追踪　(c) x、y、z轴误差

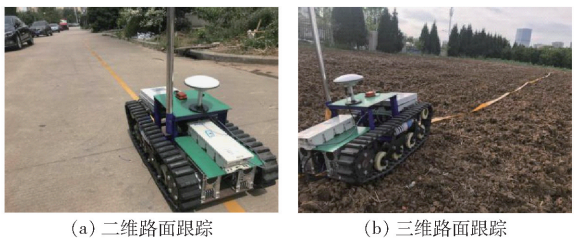
图 7　三维路径跟踪仿真结果

Fig. 7　Simulation results of three-dimensional path tracking

二维平整路面与三维崎岖路面相比，二维平整路面仿真时将 a_4、a_5、a_6、λ_4、λ_5、λ_6 设置为 0，仅改变剩余的控制参数，记录机器人的路径跟踪结果，仿真结果表明二维路面和三维路面误差均满足实际需要。

4　降维变系数控制试验

为了验证本文方法的可行性，以安徽农业大学安徽省智能农机装备工程实验室研制的履带机器人作为试验平台，试验环境为非硬化崎岖路面和硬化平整路面两种，设计车速为 1.5 m/s。对理想的二维平整路面与三维崎岖路面进行路径跟踪田间试验，如图 8 所示。



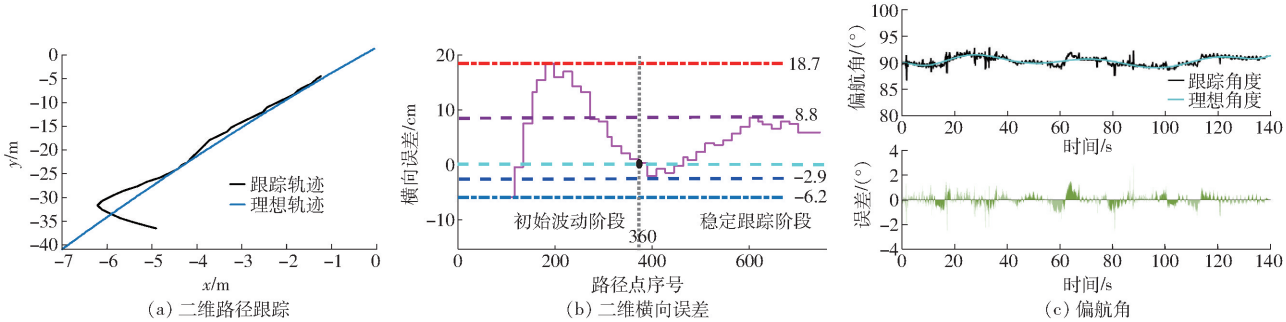
(a) 二维路面跟踪　(b) 三维路面跟踪

图 8　田间试验

Fig. 8　Field experiment

二维平整路面试验结果如图 9 所示。图 9a 中，在理想轨迹与实际轨迹第 2 次相交时可认为机器人由初始波动阶段进入稳定跟踪阶段。如图 9b 所示，在平面上跟踪时，其初始波动阶段的横向误差在 −6.2 ~ 18.7 cm 之间，在路径点为 360 时，机器人处于稳定跟踪，其误差在 −2.9 ~ 8.8 cm 内波动。偏航角跟踪如图 9c 所示，其跟踪误差在 ±2°之间，符合控制要求。

崎岖路面试验结果如图 10 与图 11 所示。其中，图 10a 为本文崎岖路面下行驶轨迹与路谱图；图 10b 与图 10d 分别为图 10a 在 xy 平面与 z 轴方向

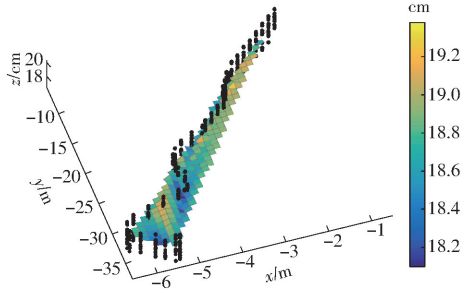


(a) 二维路径跟踪　(b) 二维横向误差　(c) 偏航角

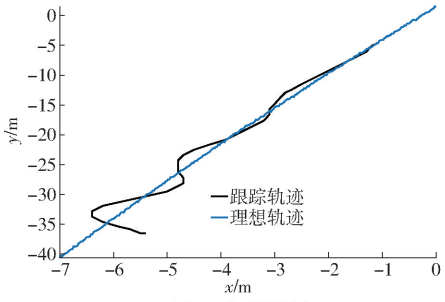
图 9　二维平整路面路径跟踪试验结果

Fig. 9　Tracking test results of two-dimensional smooth pavement

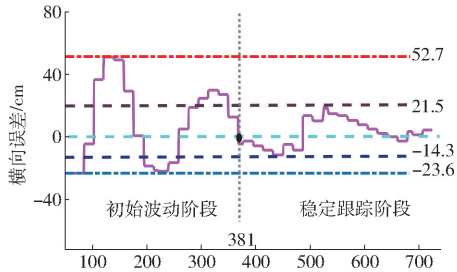
投影的跟踪图。如图 10b 与图 10d 所示,本文所提出的降维变系数控制系统能够较好地追踪目标路径;在实际轨迹与理想轨迹第 4 次相交时,机器人由初始波动阶段进入稳定跟踪阶段,其跟踪误差如图 10c 所示,横向误差在初始波动阶段的误差范围为 -23.6 ~ 52.7 cm,在路径点序号为 381 时,由初始波动阶段进入稳定跟踪阶段,机器人在稳定跟踪阶段的误差范围为 -14.3 ~ 21.5 cm,都处于合理的控制范围内。俯仰角、横滚角与偏航角分别如图 11 所示,其控制波动皆在 ±5°以内。



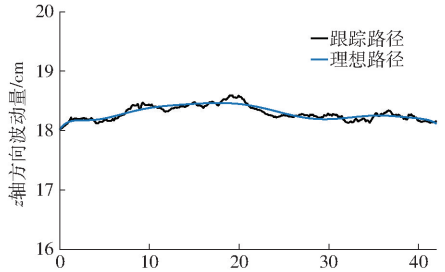
(a) 三维路径跟踪



(b) xy平面投影图



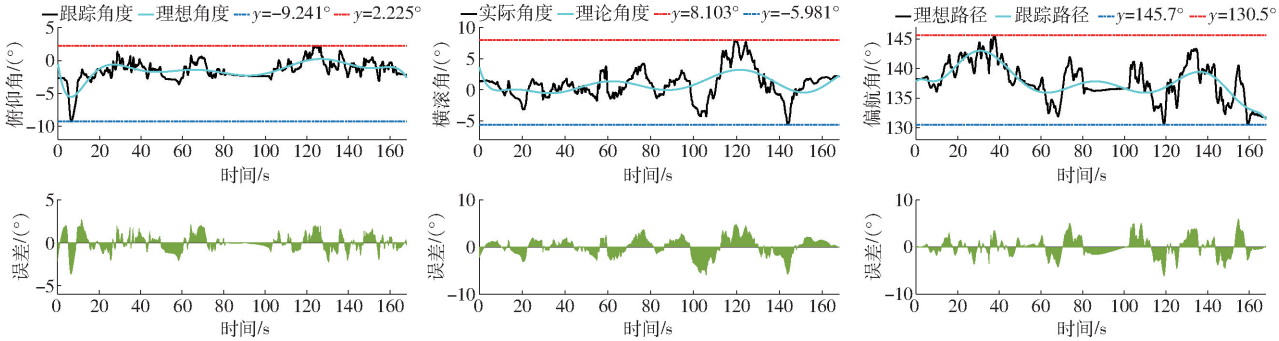
(c) 三维横向偏差



(d) z轴方向波动曲线

图 10 三维崎岖路面位置跟踪试验结果

Fig. 10 Experimental results three-dimensional rugged pavement position tracking



(a) 俯仰角 (b) 横滚角 (c) 偏航角

图 11 三维崎岖路面角度跟踪试验结果

Fig. 11 Experimental results of three-dimensional rugged pavement angles tracking

5 结论

(1)采用数学建模方法建立了三维运动学模型与误差方程,基于此设计了一种崎岖山地环境下的履带机器人降维变系数控制系统。

(2)Matlab 环境下的仿真结果表明,所提出的控制方法能够对履带机器人进行有效的控制,并且能够对理想路径进行有效的跟踪。其二维平整路面仿真结果表明,x 轴误差逐渐减少为 0,y 轴误差控制在 ±0.2 m 范围内,航偏角在 1 s 内完成跟踪理想角度;三维崎岖路面仿真结果表明,三轴姿态角在 1 s 内完成对理想姿态角的跟踪,同时三轴误差都控制在 ±0.1 m 内。因此,在仿真阶段能够满足履带机器人保持在 800 mm 宽作物行内的行驶要求。

(3)履带机器人在二维平整路面上进行路径跟踪时,其横向误差在初始波动阶段波动范围在 -6.2 ~ 18.7 cm 之间,机器人处于稳定跟踪时,其误差在 -2.9 ~ 8.8 cm 内波动,姿态角在 ±2°范围内波动。在三维崎岖路面上,采用降维变系数控制方法能够对理想路径进行有效跟踪,机器人横向误差在初始波动阶段范围为 -23.6 ~ 52.7 cm,在稳定跟踪阶段范围为 -14.3 ~ 21.5 cm,姿态角控制在 ±5°范围内。说明履带机器人能够保持在 800 mm 宽作物行内的正常行驶。

参 考 文 献

[1] 王韦韦,李俊,王晴晴,等. 耕作土壤沟形测量系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):93 - 99.
WANG Weiwei, LI Jun, WANG Qingqing, et al. Design and experiment for tillage soil groove measurement system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 93 - 99. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190709&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.009. (in Chinese)

[2] 刘立超, 张青松, 肖文立,等. 油菜机械直播作业厢面地表粗糙度测量与分析[J]. 农业工程学报,2019,35(12):38 - 47.
LIU Lichao, ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, et al. Measurement and analysis of surface roughness of rapeseed mechanized direct seeding operation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 38 - 47. (in Chinese)

[3] 刘立超,魏国梁,张青松,等. 基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):84 - 92.
LIU Lichao, WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of microtopography measuring device for agricultural cultivation based on LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 84 - 92. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.008. (in Chinese)

[4] 李世超,曹如月,魏爽,等. 基于 TD - LTE 的多机协同导航通信系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):45 - 51,65.
LI Shichao, CAO Ruyue, WEI Shuang, et al. Development of multi-vehicle cooperative navigation communication system based on TD - LTE[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 45 - 51, 65. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2017s008&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.008. (in Chinese)

[5] 陈黎卿,许泽镇,解彬彬,等. 无人驾驶喷雾机电控系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):122 - 128.
CHEN Liqing, XU Zezhen, XIE Binbin, et al. Design and test of electronic controlsystem for unmanned drive sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 122 - 128. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.013. (in Chinese)

[6] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21 - 26. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180502&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)

[7] 靳标,李建行,朱德宽,等. 基于自适应有限冲激响应-卡尔曼滤波算法的 GPS/INS 导航[J]. 农业工程学报,2019,35(3):75 - 81.
JIN Biao, LI Jianxing, ZHU Dekuan, et al. GPS/INS navigation based on adaptive finite impulse response - Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 75 - 81. (in Chinese)

[8] 杨海,李威,张金尧,等. 移动装备捷联惯性导航系统误差补偿技术研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(8):361 - 366,378.
YANG Hai, LI Wei, ZHANG Jinyao, et al. Error compensation technology of strapdown inertial navigation system for mobile equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 361 - 366, 378. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150850&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.050. (in Chinese)

[9] 焦俊,孔文,王强,等. 基于输入模糊化的农用履带机器人自适应滑模控制[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):14 - 19,13.
JIAO Jun, KONG Wen, WANG Qiang, et al. Self-adaptive sliding mode control based on input fuzzy for agricultural tracked robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 14 - 19, 13. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150603&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.003. (in Chinese)

[10] 姜立标,吴中伟. 基于趋近律滑模控制的智能车辆轨迹跟踪研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):381 - 386.
JIANG Libiao, WU Zhongwei. Sliding mode control for intelligent vehicle trajectory tracking based on reaching law[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 381 - 386. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180348&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.048. (in Chinese)

[11] 姜立标,杨杰. 基于滑模控制的自动泊车系统路径跟踪研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(2):356 - 364.
JIANG Libiao, YANG Jie. Path tracking of automatic parking system based on sliding mode control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 356 - 364. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190241&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.041. (in

Chinese)
[12] KHALIL A, ARSALAN B R, BAHRAM T. Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip[J]. Mechanism and Machine Theory,2019,138(8):16 - 37.
[13] 高国琴,周辉辉,方志明. 混联式汽车电泳涂装输送机构的时延估计自适应滑模控制[J]. 汽车工程,2018,40(12):1405 - 1412.
GAO Guoqin, ZHOU Huihui, FANG Zhiming. Adaptive sliding mode control for vehicle series-parallel electrophoretic coating conveyer based on time-delay estimation[J]. Automotive Engineering,2018, 40(12): 1405 - 1412. (in Chinese)
[14] 高伟,倪媛媛,丁世宏. 基于终端滑模和扰动观测的 Buck 型变换器复合控制技术[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):387 - 392,428.
GAO Wei,NI Yuanyuan,DING Shihong. Composite controller design for Buck converters based on terminal sliding mode and disturbance observer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49 (12):387 - 392,428. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181246&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.046. (in Chinese)
[15] LI Zhiqiang, CHEN Liqing, ZHENG Quan, et al, Control of a path following caterpillar robot based on a sliding mode variable structure algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2019,186(10):293 - 306.
[16] 薛金林,张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):55 - 60.
XUE Jinlin, ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9): 55 - 60. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140909&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.009. (in Chinese)
[17] 冯培德. 论混合式惯性导航系统[J]. 中国惯性技术学报,2016,24(3):281 - 284,290.
FENG Peide. On hybrid inertial navigation systems[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(3): 281 - 284, 290. (in Chinese)
[18] 何勇,蒋浩,方慧,等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(9):21 - 32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection methods of vehicles and their application on agriculture[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(9):21 - 32. (in Chinese)
[19] 黄培奎,张智刚,罗锡文,等. 田间作业车辆外部加速度辨识与姿态测量系统研制[J]. 农业工程学报,2019,35(3):9 - 15.
HUANG Peikui, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Development of external acceleration identification and attitude estimation system of field working vehicle[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(3):9 - 15. (in Chinese)
[20] 刘正铎,张万枝,吕钊钦,等. 扰动下农用运输车辆路径跟踪控制器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):378 - 386.
LIU Zhengduo, ZHANG Wanzhi, LÜ Zhaoqin, et al. Design on trajectory tracking controller of agricultural vehicles under disturbances[J/OL]. Tranactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):378 - 386. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181245&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.045. (in Chinese)

(上接第 28 页)

[23] 彭彦昆, 马营, 李龙. 苹果内部品质分级机械手设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 314 - 319.
PENG Yankun, MA Ying, LI Long. Design and experiment of apple internal quality sorting manipulator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 314 - 319. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190134&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.034. (in Chinese)
[24] 赵德安, 吴任迪, 刘晓洋, 等. 基于 YOLO 深度卷积神经网络的复杂背景下机器人采摘苹果定位[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 164 - 173.
ZHAO Dean, WU Rendi, LIU Xiaoyang, et al. Robot picking apple positioning based on YOLO deep convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 164 - 173. (in Chinese)
[25] 鲍官军, 张水波, 陈亮, 等. 基于气动柔性驱动器的球果采摘末端抓持器[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 242 - 246.
BAO Guanjun, ZHANG Shuibo, CHEN Liang, et al. Cone picking end gripper based on pneumatic flexible actuator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 242 - 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130542&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.042. (in Chinese)
[26] ZHAO D, LV J, JI W, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112 - 122.