

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.040

拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法

张智刚¹ 王桂民² 罗锡文¹ 何杰¹ 王进² 王辉¹

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 雷沃重工股份有限公司, 潍坊 261200)

摘要: 以雷沃 M904-D 型轮式拖拉机为研究平台, 采用 WYH-3 型无触点角度传感器, 研究了轮式拖拉机转向轮角的标定和检测方法。介绍了拖拉机转向轮角度传感器的安装方法; 采用带标度的转盘标定了角度传感器与拖拉机转向轮角之间的关系, 标定结果表明, 两者线性关系显著, 相关系数超过 0.99。对轮角测试中存在的误差进行分析, 提出基于最小二乘原理的转向轮角零位偏差估计方法, 以估计车轮相对零位偏差。路径跟踪试验结果表明, 其横向跟踪偏差的绝对值极值为 2.74 cm, 偏差绝对值的平均值为 0.49 cm, 标准差为 0.58 cm。提出的轮式拖拉机转向轮角测量模型在路径跟踪控制应用中表现出较好的效果, 验证了转向轮角测试方案的可行性与准确性。

关键词: 轮式拖拉机; 自动驾驶; 转向; 轮角检测; 最小二乘法

中图分类号: S219.1; TP29 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)03-0352-06

Detection Method of Steering Wheel Angle for Tractor Automatic Driving

ZHANG Zhigang¹ WANG Guimin² LUO Xiwen¹ HE Jie¹ WANG Jin² WANG Hui¹

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Lovol Heavy Industry Co., Ltd., Weifang 261200, China)

Abstract: Steering wheel angle detection is one of the key technologies to realize automatic navigation of agricultural machinery. The measurement results of agricultural machinery steering wheel angle directly affect the accuracy of automatic navigation control and the effect of agricultural machinery operation. Taking the Lovol M904-D wheeled tractor as the research platform, the WYH-3 non-contact angle sensor was used to study the calibration and detection method of steering wheel angle of wheeled tractor. The installation method of tractor steering wheel angle sensor was introduced. The relationship between angle sensor and agricultural machine steering angle was calibrated by scaled dial. The calibration results showed that the correlation was significantly and the coefficient was over 0.99. Focusing on the bias error in the wheel angle calibration test, a curve optimization fitting method based on the least squares principle was proposed to estimate the position deviation of the wheel relative to 0°. Preview tracking model based path tracking test showed that the extreme value of navigation control deviation was 2.74 cm, the average absolute value of deviation was 0.49 cm, and the standard deviation was 0.58 cm. It indicated that the path tracking control precision was high, and the feasibility and accuracy of the steering wheel angle detection scheme were verified.

Key words: wheeled tractor; automatic driving; steering; wheel angle detection; least squares method

0 引言

智能化是农业机械(简称农机)的发展趋势, 农机自动驾驶是农机智能化领域的研究热点^[1-5]。轮

角测量是实现农机自动驾驶的关键技术之一, 转向轮角测量的结果直接影响自动驾驶控制精度和作业效果^[6]。目前, 常见的农机转向轮角测量方法包括位移式间接转角测量法、角度传感器直接测量法、四

收稿日期: 2019-01-01 修回日期: 2019-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700404)和广东省科技计划项目(2016B020205003)

作者简介: 张智刚(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业机械导航研究, E-mail: zzg208@scau.edu.cn

通信作者: 王桂民(1968—), 男, 研究员, 博士, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: wangguimin@lovol.com

连杆式间接转角测量法以及陀螺仪间接测量法等^[7-9],可分为角度测量法和角速率测量法两类^[6-10]。两类转角测量方法各有利弊,角度测量法直接或者间接获取农机转向轮角的信息,检测精度较高,但机械连接和传感器安装复杂;角速率测量法主要采用惯性传感器如陀螺仪等,间接获得转向轮的角速率,进而获得农机的转向轮角,检测精度受随机漂移、累计误差和外部干扰等影响较大,需进行优化处理,但传感器安装简单、工作寿命长、实际应用中不易损坏^[11-12]。实际应用中,不论哪种测量方式都需要借助专用设备在转向轮左右摆角极限范围内进行标定,以期确定传感器和农机转向轮角之间的对应关系^[13-14]。胡书鹏等^[15]采用位移传感器和四连杆角度传感器获取拖拉机前轮转角,采用最小二乘拟合方法进行传感器标定,获得了传感器与拖拉机转向角的模型;缪存孝等^[16]采用双天线和单轴MEMS陀螺采集拖拉机轮角信息,通过卡尔曼滤波器对陀螺计算的角度实时校正,获得了较好的应用效果。现有研究和工程实践中,用以确定传感器AD采样值和物理轮角对应关系的标定试验不明确,建立其线性或者非线性测量模型缺乏充分的标定数据。标定过程中,如待测农机轮角存在零度位

置偏差(简称零位偏差),又没有进行相应的误差补偿或者零位校正,则也会对测量模型的精度产生影响。

本文对传感器的选取、安装、轮角零位偏差补偿等方面进行研究,提出一种轮式拖拉机转向轮角检测方法。利用带有刻度的角度转盘,通过对轮角传感器在转向轮左右摆角极限范围内进行等间隔标定,建立轮角传感器的测量模型;以RTK-GNSS定位定向系统为参照,基于阿克曼运动学模型和最小二乘方法,提出一种辨识转向轮角零位偏差值的方法,使轮角传感器能够准确采集车轮转角信息,为自动驾驶系统的转向控制提供精确反馈。

1 角度传感器选择与安装

1.1 传感器选择

本文采用的传感器是北京通磁伟业传感技术有限公司生产的WYH-3型无触点角度传感器,采用新型磁敏感元件,将机械转动转换为电信号变化输出,可以无接触地测量转动的角度。该传感器避免了工作环境和机械振动等对光电式角度传感器、位移传感器等的影响,适合农业机械转向轮角测量。其主要的技术参数如表1所示。

表1 WYH-3型无接触角度传感器的技术参数

Tab.1 Specifications of WYH-3 non-contact angle sensor

参数	数值或说明	参数	数值或说明
量程/(°)	360(线性输出)	灵敏度/(mV·(°) ⁻¹)	≈40(V _{in} =5V)
线性量程/(°)	±45、±30、±20	分辨率	连续
独立线性度/%	1.5、1.0、0.5	工作电流/mA	10~20
工作电压(传感器输入电压)/V	DC 5(3.8~8)	转动方式	轴承固定360°连续转动
输出电压(V _{in} =5V)/V	0.5~4.5	使用温度/°C	-25~75
相对湿度/%	0~95	存储温度/°C	-40~75
防护等级	IP65(轴承转动需另做防护处理)	工作环境	变化频繁,环境恶劣,耐水、油、气,抗震动
重复性/%	±0.05		

WYH-3型无触点角度传感器采用红绿黄三线接口,红、黄、绿线分别为电源正极、电源负极(接地端)、信号输出。采用金属屏蔽线,与外壳相通。信号输出线与地线之间为输出的模拟电压信号。传感器的实物图如图1所示。

1.2 传感器安装

WYH-3型传感器安装于拖拉机左前轮转向柱上。传感器一部分安装在相对机体静止的部位,另一部分安装在能随车轮转动而转动的部位。可以简化认为拖拉机两前轮直接装在同一前轴上,前轴中心与机体铰链连接。传感器的上端非旋转部位与拖

拉机的前轴紧固相连,传感器的旋转轴紧固拖拉机的转动车轮部位,如图2a所示,安装位置如图2b所示。



图1 WYH-3型无触点角度传感器

Fig.1 WYH-3 type non-contact angle sensor

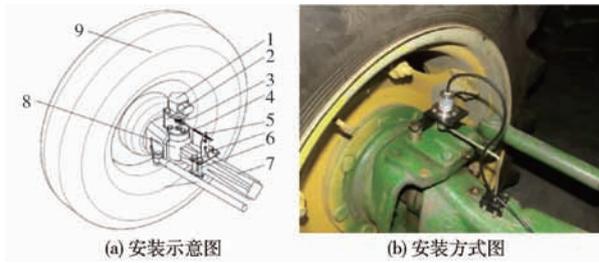


图2 传感器安装图

Fig. 2 Sensor installation diagrams

1. WYH-3型角度传感器
2. 传感器底座
3. 联轴器
4. 连杆
5. 连杆位置调整片
6. 连杆支架
7. 转向轴
8. 前轮转向柱
9. 前轮

2 拖拉机转向轮角的检测方法

依据1.2节方法在拖拉机上安装传感器后,先对车轮在转盘上转动的情况进行测量,再计算前轮转向的零位偏差。

2.1 角度传感器转盘标定

采用带有标度的转盘测量拖拉机的前轮转向角度,以避免车轮转动与地面接触点产生平面移动带来的测量误差^[17-18]。

试验前,两个转盘中心的距离应与两个转动前轮中心点之间的距离一致,并对转盘进行校正调整,如图3所示。固定好转盘0°位置后,驾驶员依靠经验将安装好传感器的拖拉机沿直线方向开至转盘上,拖拉机的前轮接地点应落在转盘的中心,并认为此时的前轮位置就是转向的0°位置,记录此时传感器输出的AD采样值,然后依据转盘显示的角刻度,使左前轮向左依次以5°为间隔等角度转动(左右极限约为30°),记录每次转动后传感器输出的采样值和左右两个转盘对应的角刻度值。车轮向左转动测试结束后,使转盘刻度回到0°位置,采用上述同样的方法,使右前轮向右以5°为间隔等角度进行转动,并记录下相应的数值。为确保测试精度,转动角度的最大值应小于拖拉机的前轮最大转向角。规定车轮向左偏转为正方向,试验结果如图4、5所示。可以看出,标定传感器采样值与车轮转角之间的线性关系显著,相关系数达到0.99以上。试验结果表



图3 角度传感器标定现场图

Fig. 3 Calibration scene of angle sensor

明,在采样点间隔的区间里,角度的变化与传感器的输出值近似为线性,传感器的安装与使用过程未造成其测量上的较大误差,没有影响传感器的灵敏性。

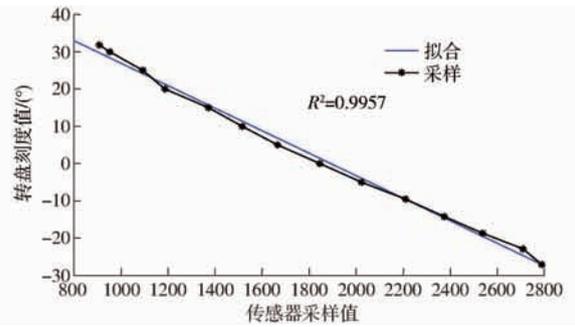


图4 传感器采样值与转盘测量的左轮角度关系曲线

Fig. 4 Relationship between sensor sample value and left wheel angle measured by scaled dial

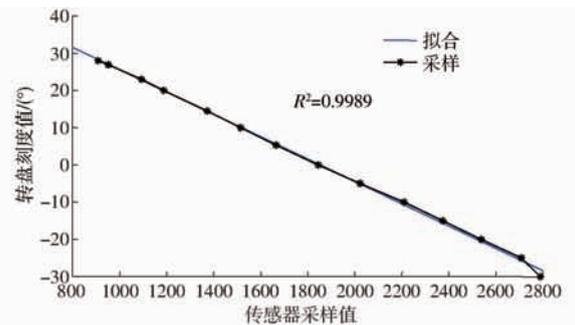


图5 传感器采样值与转盘测量的右轮角度关系曲线

Fig. 5 Relationship between sensor sample value and right wheel angle measured by scaled dial

据此,可建立拖拉机转向轮角的测量模型

$$\delta_L = K_L A_D + b_L \quad (1)$$

$$\delta_R = K_R A_D + b_R \quad (2)$$

$$\delta_M = \operatorname{arccot} \frac{\cot \delta_L + \cot \delta_R}{2} \approx \frac{\delta_L + \delta_R}{2} \quad (3)$$

式中 δ_L 、 δ_R 、 δ_M ——测量得到的拖拉机左前轮转向角、右前轮转向角、中位虚拟轮转向角

K_L 、 K_R ——拖拉机左前轮和右前轮转向角标定公式的斜率

b_L 、 b_R ——拖拉机左前轮和右前轮转向角标定公式的截距

A_D ——WYH-3型角度传感器的模拟输出AD采样值

其中, $K_L = -0.0308$, $b_L = 58.145$; $K_R = -0.0309$, $b_R = 58.097$ 。

2.2 拖拉机前轮转向角零位偏差的确定

利用角度转盘获得了拖拉机转向轮角的测量模型,由于经过了多点采样测量,其核心参数 K_L 、 K_R 比较精确,但 b_L 、 b_R 不太精确,因为驾驶员在将拖拉机左右前轮驶入角度转盘时,左右转向轮角很可能

不是零,这一误差存在于每一次角度测量值中,直接影响到 b_L 、 b_R 的线性回归计算。为了提高 2.1 节中测量模型的精度,在转盘标定的基础上提出了一种拖拉机转向轮角的零位偏差确定方法。

拖拉机行驶过程中,其行进方向角的递推可根据阿克曼车辆运动学模型^[19]得到

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \frac{v_k \Delta T}{B} \tan(\delta_{Mk} + \varepsilon) \quad (4)$$

式中 ϕ_k 、 ϕ_{k+1} —— k 、 $k+1$ 时刻拖拉机车身运动方向角

v_k —— k 时刻拖拉机行驶速度

δ_{Mk} —— k 时刻拖拉机虚拟轮转向角

ΔT ——测试数据采样时间间隔

B ——拖拉机轴距

ε ——拖拉机转向轮角的零位偏差

在连续采样获取的 N 组测试数据的基础上,定义零位偏差辨识的性能优化指标函数为

$$I = \sum_{i=2}^N \left(\phi_i - \phi_{i-1} - \frac{v_{i-1} \Delta T}{B} \tan(\delta_{M,i-1} + \varepsilon) \right)^2 \quad (5)$$

假设测试数据来源于直线或者近似直线行驶,则全程拖拉机转向角非常小,因此函数可进一步简化为

$$I = \sum_{i=2}^N \left(\phi_i - \phi_{i-1} - \frac{v_{i-1} \Delta T}{B} (\delta_{M,i-1} + \varepsilon) \right)^2 \quad (6)$$

为使 I 值最小,需 $\frac{dI}{d\varepsilon} = 0$ 。令 $P_{i-1} = \phi_i - \phi_{i-1}$,

$Q_{i-1} = \frac{v_{i-1} \Delta T}{B}$, 计算得拖拉机转向轮角零位偏差的最小二乘辨识的解析表达式为

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=2}^N (P_{i-1} Q_{i-1} - Q_{i-1}^2 \delta_{M,i-1})}{\sum_{i=2}^N Q_{i-1}^2} \quad (7)$$

获得零位偏差 ε 后,可进一步对测量模型进行修正,提高轮角检测精度,具体改进式为

$$\delta_L = K_L A_D + b_L - \varepsilon \quad (8)$$

$$\delta_R = K_R A_D + b_R - \varepsilon \quad (9)$$

$$\delta_M \approx \frac{\delta_L + \delta_R}{2} - \varepsilon \quad (10)$$

利用式(8),可以方便地计算出转向轮角零位时对应的角度传感器 AD 采样值

$$A_{D0} = (\varepsilon - b_L) / K_L \quad (11)$$

利用转盘标定结果可实现轮角传感器的检测和反馈,在此基础上选择平坦水泥路面进行直线路径跟踪控制测试,拖拉机轴距 $B = 2.34$ m, 采样间隔 $\Delta T = 0.1$ s, 所有测试数据都由轮角传感器和 GNSS 定位系统获得。将获得的测试数据截取 5 段进行零

位偏差识别算法的检验,得到结果如表 2 所示。

表 2 拖拉机转向轮角零位偏差的识别结果
Tab. 2 Recognition result of zero deviation of tractor steering wheel angle

数据段	采样长度 N	零位偏差/ (°)	零位 AD 估计值	零位 AD 估计偏差
第 1 段	900	0.615	1 823	0
第 2 段	850	0.303	1 834	11
第 3 段	910	0.671	1 821	-2
第 4 段	970	0.587	1 824	1
第 5 段	830	-0.168	1 851	28

分析表 2 中的数据可发现,5 次识别结果中,第 1,3,4 次的识别结果最为接近,在 3 个最接近的结果中,选取中间结果作为最终零位偏差识别结果,即 $\varepsilon = 0.615^\circ$ 、 $A_{D0} = 1 823$ 。据此,可对转盘标定结果进行零位偏差校正。

3 试验验证

如果转向轮角检测存在系统偏差或者较大测量误差,拖拉机直线路径跟踪控制的直线度会比较差、横向位置偏差中也会有系统偏差,导航精度受很大影响。为了对标定好的拖拉机转向轮角的测量模型进行验证,进行了拖拉机直线路径跟踪控制试验。

以雷沃 M904-D 型拖拉机作为试验对象,并在其上面安装自主研发的双天线农机自动驾驶控制平台。该平台由监控显示器、自动驾驶控制器、转向执行装置、轮角传感器和位姿传感器构成。采用司南 528 型双天线板卡接收和处理 GNSS 信号,差分数据传输电台为华信 420 型,角度传感器 AD 采样和 GNSS 定位数据采集由基于 Atmel9263 核心板的工控板卡 ECU(Electronic control unit)完成,各种算法已存入 ECU 电路板内的芯片中。

在平坦水泥路面上采集 A 、 B 两点,将由其确定的直线作为拖拉机跟踪的目标路径。然后在路径 AB 线附近启动拖拉机和自动驾驶控制系统,进行自动路径跟踪控制试验。当拖拉机接近路径 AB 的另一端时,通过人机界面发送停止自动驾驶命令,结束一次直线路径跟踪试验。为了验证测量模型的精度,特别是零位 AD 值的准确性,路径跟踪控制算法设定为不含积分环节的纯追踪模型。在平整水泥路面的直线路径跟踪效果如图 6 所示,试验数据统计结果如表 3 所示。

对直线路径跟踪的横向位置偏差均值、偏差绝对值的极值、偏差绝对值的均值和标准差进行了统计分析。偏差的均值反映了系统的稳态误差,偏差绝对值的极值和偏差绝对值的均值反映了驾驶控制



图6 水泥路面直线路径跟踪效果图

Fig. 6 Effect photo of path tracking control for concrete road

表3 水泥路面环境下路径跟踪横向位置偏差统计

Tab. 3 Statistical result of path tracking error for concrete road

试验 序号	横向位置偏差			
	均值	绝对值极值	绝对值平均值	标准差
1	2.11×10^{-4}	2.32	0.46	0.53
2	-3.90×10^{-5}	3.01	0.52	0.54
3	-1.07×10^{-4}	2.91	0.48	0.67
均值	1.87×10^{-5}	2.74	0.49	0.58

的精度,标准差反映了驾驶控制的稳定性。

由表3可知,在平整水泥路面上,其自动驾驶横向位置偏差绝对值极值为2.74 cm,偏差绝对值的平均值为0.49 cm,标准差为0.58 cm。数据表明,

本文提出的转向轮角测量模型在水泥路面上应用表现出良好的应用效果。这主要是因为:角度传感器在拖拉机转向轮左右摆动极限范围内进行了多点标定,模型参数精确;转向轮角的零位偏差得到校正,路径跟踪不会产生系统偏差。

4 结论

(1)采用WYH-3型无触点角度传感器和角度转盘,可以较准确地标定出传感器的输出值与拖拉机转向车轮实际转角值之间的关系,标定结果显示,传感器的输出AD采样值与拖拉机转向轮角值的线性关系极为显著,相关系数在0.99以上。

(2)基于GNSS定位定向系统和阿克曼车辆运动学模型,提出了一种基于最小二乘法的拖拉机转向角零位偏差识别方法。路径跟踪控制的横向位置偏差绝对值的平均值为0.49 cm,证明转向角零位偏差估计方法有效。

(3)提出了一种拖拉机转向轮角的检测方法,该方法既可保证轮角大角度检测精度,也可通过在线辨识的方式完成零位偏差识别和校正,有利于提高拖拉机的路径跟踪控制精度,对拖拉机自动驾驶系统的前装具有参考意义。

参 考 文 献

- [1] ENGLISH A, ROSS P, BALL D, et al. Vision based guidance for robot navigation in agriculture[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation(ICRA), Hong Kong, 2014: 1693-1698.
- [2] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红X-804拖拉机的DGPS自动驾驶控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- [3] 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 CSAE, 2018, 34(1): 15-21. (in Chinese)
- [4] 魏爽,李世超,张漫,等. 基于GNSS的农机自动驾驶路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊): 70-77.
WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.) 70-77. (in Chinese)
- [5] 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- [6] JAVIER Santana-Fernández, JAIME Gómez-Gil, LAURA Del-Pozo-San-Cirilo. Design and implementation of a GPS guidance system for agricultural tractors using augmented reality technology[J]. Sensors, 2010, 10(11): 10435-10447.
- [7] 王鹤,胡静涛,高雷. 农业机械自动驾驶车轮转角测量误差补偿模型[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 33-37.
WANG He, HU Jingtao, GAO Lei. Compensation model for measurement error of wheel turning angle in agricultural vehicle guidance [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 33-37. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140806&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.006. (in Chinese)
- [8] 连志鹏. 自动驾驶农机转向控制研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2015.
LIAN Zhipeng. Research on automatic steering control of agricultural machinery [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2015. (in Chinese)
- [9] 王朝阳. 基于陀螺仪的车辆前轮转角测量方法研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2015.
WANG Chaoyang. Research of the vehicle front wheel angle measurement based on the gyroscope [D]. Shanghai: Shanghai

University of Engineering Science, 2015. (in Chinese)

- [10] 陈艳, 张漫, 马文强, 等. 基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 126-130.
CHEN Yan, ZHANG Man, MA Wenqiang, et al. Positioning method of integrated navigation based on GPS and machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 126-130. (in Chinese)
- [11] 贾全. 拖拉机自动导航系统关键技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2013.
JIA Quan. Study on key technology of tractor auto-navigation system [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2013. (in Chinese)
- [12] GROVES P D. Navigation using inertial sensors [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 30(2): 42-69.
- [13] 张亚娇. 农机自动驾驶监控终端关键技术研究及系统开发[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
ZHANG Yajiao. Key technology research and system development on automatic navigation of monitoring terminal for agricultural machinery [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [14] 李军, 马蓉. 拖拉机自动转向系统设计研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2012, 39(5): 47-50.
LI Jun, MA Rong. Design and study of tractor automatic steering system [J]. Tractor & Farm Transporter, 2012, 39(5): 47-50. (in Chinese)
- [15] 胡书鹏, 尚业华, 刘卉, 等. 拖拉机转向轮转角位移式和四连杆式间接测量方法对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 76-82.
HU Shupeng, SHANG Yehua, LIU Hui, et al. Comparative test between displacement and four-bar indirect measurement methods for tractor guide wheel angle [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 76-82. (in Chinese)
- [16] 缪存孝, 楚焕鑫, 孙志辉, 等. 基于双 GNSS 天线及单陀螺的车轮转角测量系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 17-23.
MIAO Cunxiao, CHU Huanxin, SUN Zhihui, et al. Wheel turning angle measurement system based on double GNSS antennas and single gyro [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 17-23. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170902&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.002. (in Chinese)
- [17] 张宝富, 穆希辉, 杜峰坡, 等. 基于光电编码器和 PLC 的车轮转角检测显示系统[J]. 机械与电子, 2009, 27(7): 62-63, 77.
ZHANG Baofu, MU Xihui, DU Fengpo, et al. A wheel angle measuring and displaying system based on photoelectric encoder and PLC [J]. Machinery & Electronics, 2009, 27(7): 62-63, 77. (in Chinese)
- [18] 周全申, 乔永钦, 朱琳. 车辆转向机构设计与分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 60-62.
ZHOU Quanshen, QIAO Yongqin, ZHU Lin. Design and analyze of mechanism of vehicle change direction [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 27(2): 60-62. (in Chinese)
- [19] JEFFREY D W. Sensor fusion for field robot localization [D]. Urbana: University of Illinois, 2001.

(上接第 411 页)

- [15] ZENG Q, EHMANN K F, CAO J. Tri-pyramid robot: design and kinematic analysis of a 3-DOF translational parallel manipulator [M]. Pergamon Press, Inc. 2014.
- [16] LEE S, ZENG Q, EHMANN K F. Error modeling for sensitivity analysis and calibration of the tri-pyramid parallel robot [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(5): 1-14.
- [17] PRAUSE I, CHARAF E. Comparison of parallel kinematic machines with three translational degrees of freedom and linear actuation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(4): 841-850.
- [18] MAHMOOD M, MOSTAFA T. Kinematic analysis and design of a 3-DOF translational parallel robot [J]. International Journal of Automation and Computing, 2017, 14(4): 432-441.
- [19] 杨启志, 孙梦涛, 蔡静, 等. 温室穴盘苗并栽高速移栽机器人运动误差分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 18-27.
YANG Qizhi, SUN Mengtao, CAI Jing, et al. Kinematic error analysis and test of high-speed plug seeding transplanting machine for greenhouse based on parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 18-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180302&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.002. (in Chinese)
- [20] 杨廷力, 刘安心, 罗玉峰, 等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] YANG T L, LIU A, SHEN H, et al. Topology design of robot mechanisms [M]. Singapore: Springer, 2018.
- [22] 周结华, 彭侠夫. 三自由度冗余驱动并联机构的奇异性和工作空间分析[J]. 中国机械工程, 2014, 65(12): 751-756.
ZHOU Jiehua, PENG Xiafu. Singularity and workspace analysis of a 3-DOF parallel manipulator with redundant actuation [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 65(12): 751-756. (in Chinese)