



董 芒, 顾宝兴, 姬长英, 等. 水果采摘机器人智能移动平台的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(4): 128-133.

水果采摘机器人智能移动平台的设计与试验

董 芒, 顾宝兴, 姬长英, 张庆怡, 查启明
(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要:【目的】基于三自由度水果采摘机械臂,设计一种轮式智能移动平台。【方法】根据农田工作环境,设计了转向机构和防撞梁机构;借助 ANSYS 对车架在 3 种工况下的变形情况进行仿真分析;使用 Simulink 模块对车载电机进行了基于最大转矩电流比矢量控制(MPTA)以及 ID=0 模式下的仿真;使用 VC++ 语言编写了运动控制程序,开发人机交互界面;在南京市江浦农场进行样机行走试验。【结果】弯扭工况下车架变形量最大为 14.1 mm,应力值小于材料屈服极限;基于 MPTA 控制下的电机约 0.8 ms 达到稳定;该平台最大爬坡角度约为 10°,1.5 m·s⁻¹ 行进时跟踪路径的横向偏差约为 0.22 m。【结论】该移动平台结构合理,强度和刚度较高,运动精度高,符合实际工作要求。

关键词:水果采摘机器人;智能移动平台;ANSYS;有限元分析;直线追踪试验
中图分类号:S223.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2016)04-0128-06

Design and experiment of an intelligent mobile platform loaded with a fruit picking robot

DONG Mang, GU Baoxing, JI Changying, ZHANG Qingyi, CHA Qiming
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: 【Objective】To design a prototype of wheeled intelligent mobile platform at the basis of a 3-DOF fruit picking robot hand. 【Method】According to the working environment of farmland, the steering structure and anti-collision beam structure of the platform were designed. The deformation of the platform frame under three working conditions were simulated using ANSYS, and simulation of the motor was carried out using Simulink module based on MPTA or ID=0. The motion control program and human computer interface were programmed with VC++. The prototype walking experiments were carried out in Jiangpu farm, Nanjing. 【Result】The maximum deformation of the platform frame was 14.1 mm under the crankle working condition, and the value of stress was under the yield limit of material. The motor based on MPTA control achieved stability after 0.8 ms. The maximum climbing angle of the platform was 10°, and the tracking path lateral deviation was 0.22 m at a speed of 1.5 meter per second. 【Conclusion】This mobile platform has reasonable structure, with high strength, rigidity and motion accuracy, which meets the requirements of practical use.

Key words: fruit picking robot; intelligent mobile platform; ANSYS; finite element analysis; line tracing experiment

我国水果生产总量逐年增加,预计 2016 年将达到 2.7 亿 t^[1]。水果采摘在生产中耗时费力,需投入整个生产过程 40% 的劳动力。为降低水果采摘成本、减少对劳动力的依赖、提高采摘效率,智能采摘机器人的研究成为热点^[2]。移动平台是农业机器人运动的基础,是采摘机器人研制的关键环节之一,决

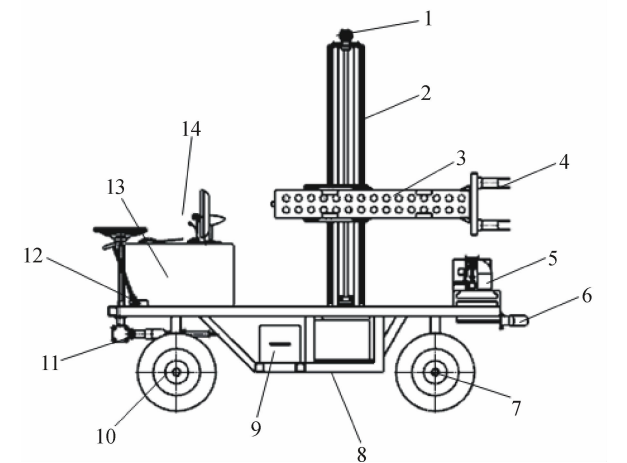
定着农业机器人运动的灵活性和控制的复杂性^[3]。国内外针对移动平台的研究较多^[4-6]。比利时的 Beaten 等^[7]研制的苹果采摘机器人的整个采摘机械臂及其控制系统安装在拖拉机后端,并设计提升装置可上下移动机械臂,但机器人体积较大,作业灵活性较差。对农业机器人的研究主要侧重于机器人末端执行机构及机械手的机构与控制以及机器人本体在三维空间中的连续运动控制技术^[8],有些研究^[9-10]是在拖拉机等农业机械装备上开发导航控制系统和变量输入控制系统,其操作较为复杂,在农田环境中的适应性较差。因此开发一款结构简单、紧凑、经济性好,符合农田环境实际要求的移动平台,对促进农业现代化、智能化、信息化显得颇为重要。

本文在对矮化标准苹果园实地调研后,结合水果采摘的具体要求,设计一种轮式智能移动平台,该平台搭载控制柜、机械臂、末端执行器、水果分级装置、GPS 装置等部件,合理布置各工作部件,使之互不干涉、结构紧凑、适应性强、自主导航。

1 结构与主要部件

1.1 总体结构及要求

智能移动平台分为控制系统与机械执行系统,其外观设计如图 1 所示,整车长 2 500 mm,宽 1 200 mm,离地 600 mm。主要包括后桥转向机构、前桥驱动机构、刹车装置、水果收集机构、控制柜、GPS 装置、防撞机构、车架等,搭载三自由度机械臂、四手抓末端执行器、水果分级装置等部件。控制系统主要由工控机、双目摄像机、MP2100 板卡、编码器、光电开关等组成。



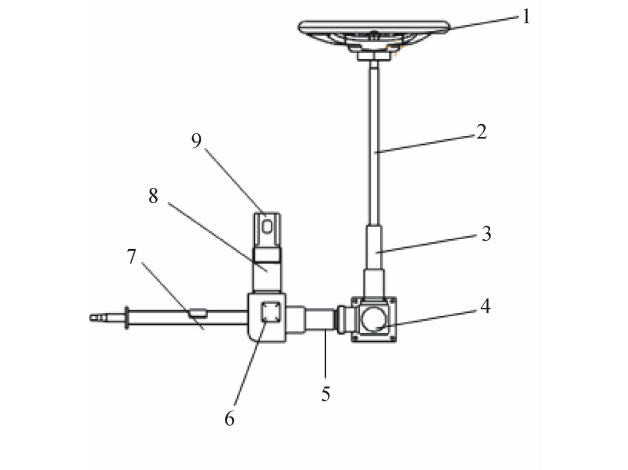
1:双目摄像机;2:机械臂 Y 轴;3:机械臂 X 轴;4:末端执行器;5:水果分级装置;6:防撞梁;7:前桥;8:车架;9:果实收集盒;10:后桥;11:转向系统;12:刹车装置;13:控制柜;14:人机交互模块。

图 1 智能采摘机器人移动平台结构简图
Fig.1 Structure of the intelligent mobile platform loaded with a fruit picking robot

要求结构简单,在田间地面环境通过性良好;机械臂、控制柜、水果分级装置间不发生干涉;能顺利通过 8°左右的坡道;工作速度可保持 0.5 m·s⁻¹,最大速度 1.5 m·s⁻¹,加速度不小于 0.2 m·s⁻²。

1.1.1 三自由度机械臂 目前,农业采摘机器人多选用工业关节型机械臂,控制比较复杂,成本较高。本采摘机器人采用自行设计的三自由度机械臂^[11],包含 1 个旋转关节和 2 个移动关节。以垂直轴电机中心线和 X、Y 水平面相交的位置,定义为机器人坐标轴水平面的 0 点,坐标轴的方向符合右手法则。将垂直轴电机中心线上离机器人水平底座最下边垂直距离为 823 mm 的位置定义为 Z 轴的 0 点,TCP 点的定义坐标为(−398,190,0)。

1.1.2 转向系统 农田路面情况较为复杂,存在地面不平、土壤坚实度不均、果树平齐度较差等问题。机器人移动平台在导航运动过程中,在行驶到坡度起伏较大或者果园死角的时候,单靠转向电机较难按照设定的角度和路径运动,从而影响了正常的采摘作业。本移动平台在电子助力转向系统(EPS)的基础上,设计了一种新型铰轴转向机构(图 2)。在原有的机械管柱上附加了转向电机,出现电气故障或者电动转向困难时,通过上位机关闭转向电机,此时系统恢复到原有的机械转向状态,使用方向盘控制前桥进行转向,从而有效地辅助机器人较快地度过转向困难处,提高工作效率。在转向机构上添加了扭矩传感器,当检测到转向扭矩异常时,将信号发送至上位机,执行刹车命令。



1:方向盘;2:方向盘轴;3:套筒;4:换向器;5:联轴器;6:扭矩传感器;7:EPS 管柱;8:减速机;9:电机。

图 2 转向系统结构简图
Fig.2 Structure of the steering system

1.1.3 防撞系统 采摘机器人在果园环境中工作,发生碰撞的几率较大。碰撞是一个瞬时的复杂物理过程^[12],容易对移动平台上的机械臂、末端执行器、控制柜等部件产生冲击,导致系统无法正常工作。

移动平台正面发生碰撞的概率最大,因此为移动平台前面设计了一套防撞梁系统(图 3)。其中,液压缓冲器^[13]最大吸收能量为 40 J,最大撞击速度为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;防撞梁前部横梁采用厚度为 1.0 mm 的合金结构钢。3 个同型号 NPN 常开光电开关,其检测距离 0~300 mm 可调,响应时间 $\leq 2\text{ ms}$ 。光电开关与横梁内壁之间的距离 X_1 、 X_2 、 X_3 以及光电开关的检测距离 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 是该防撞系统的研究重点;检测距离较小时,当移动平台与一般树枝碰撞时,会导致碰撞信号的误报;而如果检测距离过大发生碰撞时,留给上位机处理信号以及平台制动的的时间缩短,安全保护效果不明显。为确定最佳的检测距离,设计了碰撞模拟试验,使用直径为 10、20、30、40 mm 的树枝以 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度在横梁左、中、右垂直碰撞,最终确定 X_1 、 X_2 、 X_3 、 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为 120、95、95、90、80、80 mm。

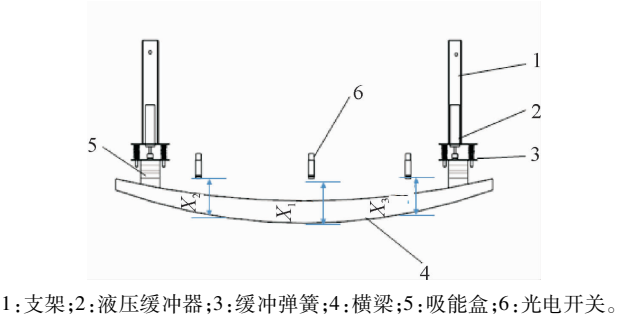


图 3 防撞梁结构示意图

Fig. 3 Structure of the anti-collision beam

1.2 车架的有限元分析

移动平台在实际工作中行驶速度慢、加速度小、转弯半径大,因此无需考虑起步、转弯、制动等工况。本文重点选取纯弯曲、弯扭联合、采摘运动等工况进行仿真分析,方法参照文献[14]。ANSYS 有限元分析之前对车架模型进行简化,具体规则为:省略非承载件,如车钩、防撞梁等部件;去除非装配孔;假设车架中焊接部位为理想焊接,焊接处材料与其他区域相同。

将简化后的车架三维模型导入 ANSYS 14.5 中。车架材料选用 Q235A,屈服极限为 510 MPa,截面尺寸 60 mm×60 mm,厚度 4 mm,其 $E=2.1\times 10^{11}$, $\mu=0.28$ 。单元类型选取 Solid 186,采用自由划分方式,网格大小设置为 10 mm。在机械臂等应力较集中的地方将网格细化到 6 mm。对车架离散后,共得到单元数 96 061 个,节点数 187 733 个。

主要部件控制柜、机械臂、收集盒、分级装置的质量分别为 40、270、40、75 kg;控制柜、机械臂、收集盒、分级装置车架的接触面积(长×宽)分别为 1 100 mm×700 mm、3 600 mm×410 mm、1 100 mm×206 mm、840 mm×300 mm。

纯弯曲工况主要是模拟移动平台静止或者匀速前进时车架的变形情况,此时车架主要受自身重力

<http://xuebao.scau.edu.cn>

以及各部件向下的压力。添加载荷后,将左前轮 UX、UY、UZ,右前轮 UX,右后轮 UX、UY,左后轮 UX 方向的自由度进行约束^[15],最后得到纯弯曲工况下的等效位移云图(图 4),此工况下车架第 3 根横梁中部变形最大,最大变形量为 18.4 mm,最大应力值为 61.4 MPa,远小于材料屈服极限。因此在纯弯曲工况下车架强度完全满足要求。

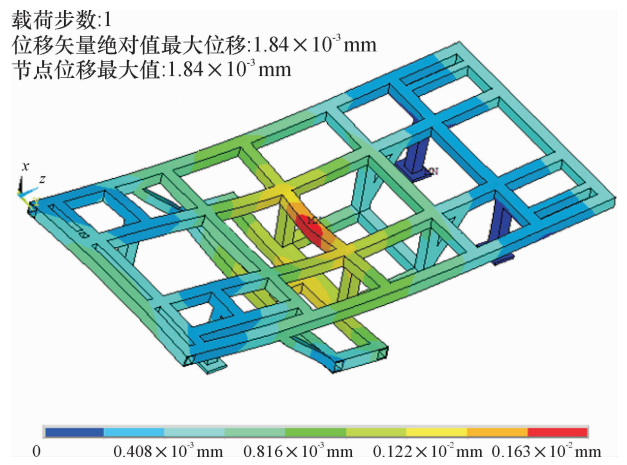


图 4 纯弯曲工况下车架等效位移云图

Fig. 4 Equivalent displacement image of the platform frame under pure bending working condition

弯扭联合工况时,农田地面具有非线性特征,一般来说,移动平台在工作中,4 个车轮不会处于同一个平面,最高点与最低点垂直距离可达到 90 mm。此工况下在左前轮 UX 方向设置向上的 45 mm 位移约束,在右后轮 UX 设置向下的 45 mm 位移约束,对右前轮 UX 进行约束,动载荷系数取 1.5,最后得到弯扭工况下的等效位移云图(图 5),弯扭工况下车架变形最为严重,最大变形处位移减去施加的 45 mm 位移约束后仍达到 14.1 mm,且应力集中的地方多为焊接部位。此时应在车架与前后桥的支柱上焊接支撑件,并采用电弧焊等特种焊接技术。

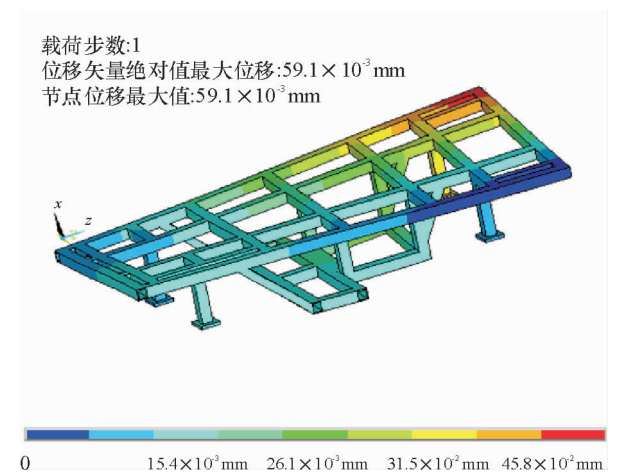


图 5 弯扭工况下车架等效位移云图

Fig. 5 Equivalent displacement image of the platform frame under twisting working condition

采摘工况为移动平台特有工况,采摘机器人在进行田间作业时,圆柱式机械臂 X 轴做上下变速以及旋转运动,在其加速以及减速运动中对车架产生冲击。为获得采摘工况下机械臂对车架的作用力,将机械臂模型处理后导入 ADAMS 软件中进行分析。

以水平轴做纵向变速运动为例,在 ADAMS 中,首先对机械臂主要部件进行定义,创建各部件之间的运动副。设定 $0 \sim 0.5\text{ s}$ 为加速阶段, $1.5 \sim 2.0\text{ s}$ 为减速阶段,其余为匀速阶段。最后得到此时机械臂对底座的作用力如图 6 所示,此时机械臂对底座作用力最大为 $2\,651\text{ N}$,加上旋转轴重力后共计 $3\,228\text{ N}$ 。同理可得机械臂旋转运动对底座的扭矩为 $152.4\text{ N}\cdot\text{m}$ 。将获得的压力与扭矩重新加载到车架上,获得采摘工况下车架的等效位移云图(图 7),该工况下由于施加了扭矩作用,车架在水平面上发生了扭曲,最大变形处为 2.7 mm ,变形量较小,符合要求。

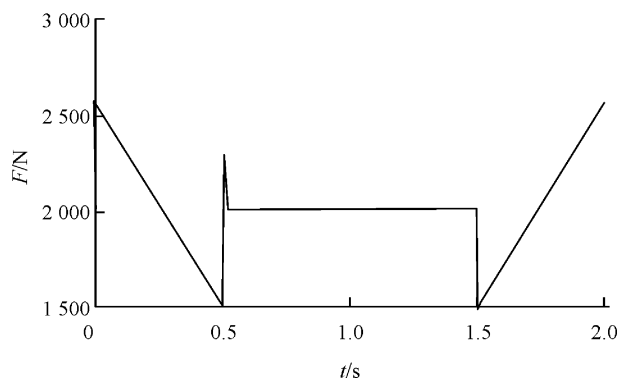


图 6 采摘工况下底座受力曲线

Fig. 6 Force curve of the platform base under picking working condition

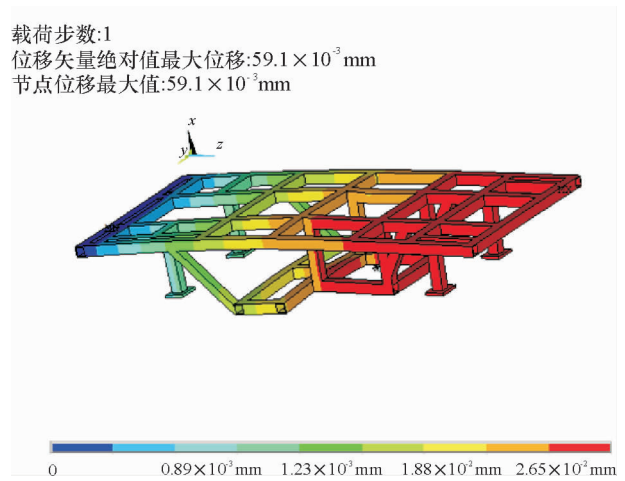


图 7 采摘工况下车架等效位移云图

Fig. 7 Equivalent displacement image of the platform frame under picking working condition

综合分析,该车架在满足各部件合理布局的基础上,在各种工况下比较稳定,满足设计要求。

1.3 电机的选择与仿真

1.3.1 车载电机的选择 电机容量和移动平台行进需要的驱动力以及所受地面摩擦力、迎风阻力、惯性阻力等有关。移动平台的驱动力应该与其所受的运行阻力保持平衡,即

$$F_t = \sum W_{\text{all}},$$

式中, F_t 为驱动力, $\sum W_{\text{all}}$ 为所受阻力之和。

根据公式计算结果,综合比较不同类型电机的优缺点后,选择安川永磁同步电机(PMSM)作为驱动电机,型号为 SGMGV-30ADC61,功率 2.9 kW , $i = 36$;转向系统选择安川永磁同步电机 SGMJV-02ADE6S,功率 0.27 kW ,减速机 $i = 25$ 。

1.3.2 电机控制方式的选择 水果采摘机器人移动平台在实际工作中的运动并不连续,在短距离内,移动平台频繁执行刹车、启动、变速等动作。这就要求车载电机具有快速响应、高精度控制、节能、扭变平滑性等特点。

在工程实践中,众多 PMSM 控制方式里面,最大转矩电流比矢量控制(MPTA)和 $ID = 0$ 控制最为常见^[16]。在高速、低转矩条件下,2 种控制方式都可以使电机较快达到稳定状态,转矩波动较小,但不一定适应水果采摘机器人移动平台特殊的工作方式以及恶劣的工作环境。

本文利用 MATLAB/Simulink 组件,基于 MPTA 以及 $ID = 0$ 控制方式的原理,将 2 种方式集成比较,利用 Switch 模块可自由切换。仿真时间设定为 0.8 s ,初始转速给定值为 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 0.4 s 后加速为 $800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。初始扭矩 $5\text{ N}\cdot\text{m}$, 0.6 s 后增加为 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 。得到电机转速响应,IQ、ID(IQ、ID 分别表示电机内部 D、Q 轴的电流)给定值与反馈值,电机输出力矩波形等曲线。以 MPTA 方式为例,电机转速响应曲线以及电机输出扭矩曲线如图 8 所示,电机启动之后 0.08 s 左右达到稳定值。电机加速阶段,IQ 值很大,ID 为负值,产生 $24\text{ N}\cdot\text{m}$ 恒定的力矩,当转速上升到 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 且稳定后,电机输出力矩 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。 0.4 s 时电机转速变为 $800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,IQ 变大,ID 为负值,电机输出力矩加大。 0.6 s 时力矩从 5 变为 $20\text{ N}\cdot\text{m}$,导致电机转速下降,为了维持转速,控制系统通过调节,使电机输出力矩增大到 $24\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右。转速稳定后,电机输出力矩 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 与设定力矩平衡。

通过 Switch 开关切换到基于 $ID = 0$ 控制模式,得到此方式下的仿真曲线,在 0.4 s 速度给定由 500

$r \cdot \min^{-1}$ 变为 $800 r \cdot \min^{-1}$ 时,由于输出的给定电流饱和,故出现 ID 和 IQ 电流无法跟上的情况,同时电机的输出力矩也会变小,加速变缓慢。

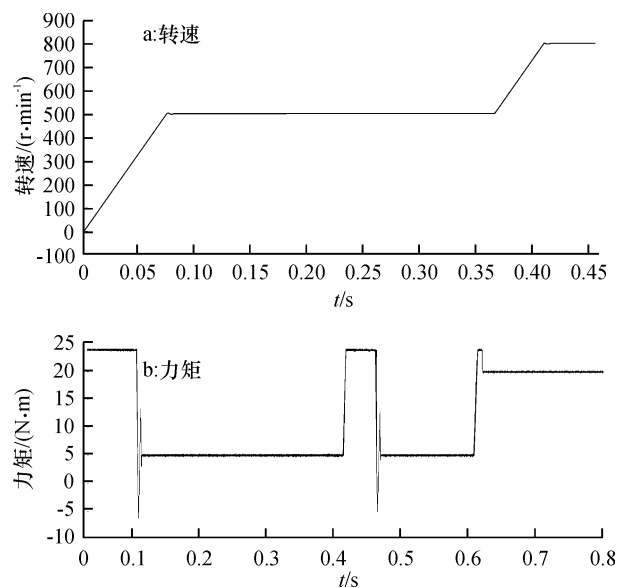


图 8 MPTA 控制下永磁同步电机转速和输出力矩响应曲线
Fig. 8 The speed response curve and torque response curve of PMSM under MPTA control

综上,PMSM 在水果采摘机器人移动平台特殊的工作环境下,采用 MTPA 控制的方式要比 $ID = 0$ 控制方式好,电机输出力矩响应快,同等输出力矩下电流要小,耗电量更小。2 种典型控制方式的比较简单直观,对以后的工作实践具有一定的参考意义。

1.4 控制系统的设计

1.4.1 控制系统设计 移动平台控制系统主要由上位机控制器、下位机控制器和各传感器系统等组成,硬件结构框图参见文献[2]。

上位机选用研华 IPC610-H 型工控机作为运算控制中心,内置数据采集卡、1394 转换卡等部件与下位机、传感器通信协同工作,实现自主导航、自主采摘。移动平台各部件协同工作内容主要包括:工控机通过 RS-232 与人机交互模块通信,可实时调整水果采摘机器人整体的运行状态;工控机实时解析 GPS 接收机输出的 NMEA 语句中包含的速度、位置信号值,实现对移动平台驱动速度、转向角度的动态控制;GPS 装置采用 DB9 型 COM 串口通信,采用 MAX232 芯片进行信号转换,信号输入单片机后,通过 CAN 总线输入到工控机,当检测到 GPS 坐标值到达终点时,移动平台停止运行;工控机调用双目摄像机自带 TriclopsRCDDToXYZ 函数,解析果实在相机坐标系下的坐标值,对坐标值进行转换后,向 MP2100 板卡发送运动信号;工控机接收防撞梁光电开关信号、机械臂故障等信号,接收到信号之后,向 MP2100

板卡发送制动命令。

1.4.2 CAN 总线设计 移动平台运动控制系统通信协议分为以太网和 CAN 总线控制,其中运动控制板卡 MP2100 通过 TCP/IP 协议与上位机构以太网;同时 MP2100 通过 CANN Open2.0 协议与下位机驱动器、控制器构成 CAN 总线。

在进行 CAN 总线设计之前,应确定系统总体功能。MP2100 作为主节点,其他控制节点作为从节点^[17],从节点基本模块应该包括:数据采集模块,采集移动平台车速、转角以及传感器信号等;数据转换模块,将采集到的数据转换为可以向其他节点传输的格式,同时将从其他节点接受的信息转换为自身可识别的格式;通信模块,实现相同层次间的信息沟通,即物理层与物理层的信息交换,应用层与应用层间的信号交换;输出模块,对上位机传输的信号进行打包,并在编码、解码后,通过 MDI 接口输出到电机驱动器上,控制电机的运行。

2 直线追踪试验设计与分析

一般来说,智能农业车辆的自主行走主要包括直线追踪、地头转向、视觉避障等任务,其中直线追踪是一种最基本的导航任务,通过信息传感器系统获取的位姿以及定位信息与预定航线的比较,实时调整运行速度以及转向角度,以便回归到正确航线。移动平台采用 DGPS 以及视觉传感器检测到的数据相融合获取位姿信息,采用 Trimble 公司生产的差分式 GPS 获取平台的移动速度以及定位数据,并且在上位机中使用 VC++ 编写自主导航控制程序。其中,差分式 GPS 标称速度检测误差约为 $0.04 m \cdot s^{-1}$,定位误差约为 $0.3 m$,双目摄像机测距精度约为 $0.208 mm$,上位机程序处理时间约为 $0.1 s$ ^[18]。

试验方法及控制策略如下:各设备自检并进行初始化操作,若检测到硬件故障或者程序错误,工控机停止导航,移动平台原地报警^[19];在导航程序中编辑目标航线 $Ax + By + C = 0$ 、移动平台初始坐标值、运行速度等信息,上位机读取 GPS 和 AHRS 数据,计算行走路线;移动平台导航开始,上位机实时计算横向偏差 E 即平台中心点 (x_p, y_p) 与目标航线的距离:

$$|E| = \frac{|Ax_p + By_p + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}},$$

若 $Ax_p + By_p > C$, 则 E 取正值,反之 E 取负值;根据横向偏差 E ,实时调整移动平台转向角度。具体规则如下:当横向偏差 E 大于最小转弯半径 R_{min} 时,平台距离目标航线较远,此时平台作直线行驶,转向角 $\alpha = 0^\circ$ 。当运行至 $E \geq R_{min}$ 时,上位机程序计算最佳

转向角并转化为电机实际脉冲数,开始转向,向目标航线逐渐靠近,实现直线追踪。

直线追踪行走试验在南京农业大学校园水泥路以及江浦农场苹果园路面进行,移动平台初始设置为:横向偏差 $E = 1.2 \pm 0.1 \text{ m}$,转角 $0^\circ \pm 1^\circ$,车速 $1.0、1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。横向偏差的实时变化曲线见图9,导航初始时,由于 E 较大,移动平台作斜直线匀速行驶。土壤路面上行走至 22 s 时, E 趋于稳定,由于土壤较为松软,移动平台的惯性与地面的摩擦的滤波作用显著, E 的变化总体平滑,最大偏差值为 0.22 m 左右。水泥路面下横向偏差最大为 0.34 m,视觉处理的延时对误差有一定影响^[20]。

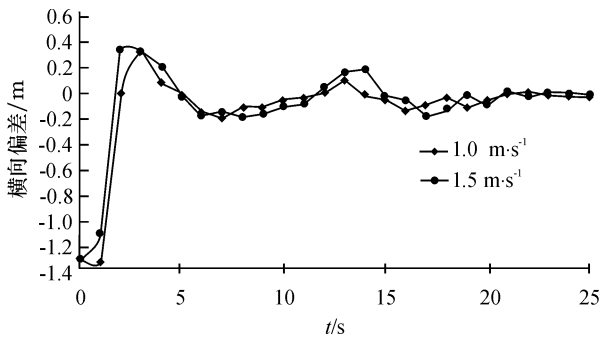


图9 行走试验结果

Fig.9 Walking test results

3 结论

1)基于三自由度机械臂,设计了一种轮式智能移动平台,各工作部件之间无干涉、结构紧凑、适应性强。

2)基于 ANSYS 对车架进行了有限元分析,极限工况下最大变形量为 14.1 mm,对容易发生应力集中的几处区域加强处理后,可满足农田环境工作要求。使用 MATLAB 对电机进行了基于 MPTA 和 ID=0 控制方式的仿真分析,电机约 0.8 ms 达到稳定,扭变平滑性较好。

3)使用 VC++ 语言开发了人机交互界面,编写了运动控制程序。搭建了基于 CAN 总线开放式控制系统,协调 GPS、AHRS、DGPS 等设备,实现了该移动平台的高精度运动。

参考文献:

[1] 郑燕,张吉国,史建民. 我国水果加工业发展现状、问题及对策[J]. 山东农业科学, 2014, 46(4): 121-124.
[2] 顾宝兴,姬长英,王海青,等. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 153-160.
[3] ZHAO D A, LV J D, JI W. Design and control of an apple

harvesting robot[J]. Biosyst Eng, 2011, 110(2): 112-122.
[4] 胡彦福. 基于超声波传感器的轮式喷药机器人移动控制系统研究[D]. 重庆:西南大学, 2009.
[5] 陈飞,蔡建荣. 柑橘收获机器人技术研究进展[J]. 农机化研究, 2008, 68(7): 232-235.
[6] 陈淑艳,陈文家. 履带式移动机器人研究综述[J]. 机器人技术, 2007, 24(12): 232-235.
[7] BAETEN J, DONNE K, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester[M] // SICILIANO B, KHATIB O, GROEN F. Springer tracts in advanced robotics: Field and service robotics, Berlin: Springer-Verlag, 2008: 531-539.
[8] 闫树兵,姬长英. 农业机器人移动平台的研究现状与发展趋势[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(5): 13-15.
[9] 陆怀民. 林木果球采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 52-58.
[10] 焦俊,孔文,辜丽川,等. 基于 UKF 和 SMO 农用履带机器人滑动参数计算[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1577-1583.
[11] 张杰,姬长英,顾宝兴,等. 三自由度苹果采摘机器人本体设计[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(23): 251-257.
[12] 张飞. 欠驱动机械手末端执行器的设计与研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2013.
[13] 刘海江,张夏,肖丽芳. 基于 LS-DYNA 的 7075 铝合金汽车保险杠碰撞仿真分析[J]. 机械设计, 2011, 28(2): 19-22.
[14] 赵宇楠,司景萍,王二毛,等. 基于 ANSYS 的矿用自卸车车架结构优化设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(3): 18-21.
[15] 康元春,刘瑛. 货车车架尺寸优化设计[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2012, 26(3): 10-12.
[16] 史光辉,于佳,张亮. 永磁同步电动机最大转矩电流比控制[J]. 电机技术, 2009, 31(5): 28-31.
[17] 佟为明,金显吉,林景波. 基于 C8051F023 微控制器的 CAN 总线实验系统设计与实现[J]. 低压电器, 2007, 37(23): 37-40.
[18] 姜雨彤,杨进华,刘钊,等. 双目 CCD 测距系统的高精度标定[J]. 计算机工程, 2013, 39(7): 228-232.
[19] 田光兆,安秋,姬长英,等. 基于立体视觉的智能农业车辆实时运动检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 210-215.
[20] 王友权,周俊,姬长英,等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 110-113.

【责任编辑 霍 欢】