

果实采摘机器人设计与导航系统性能分析

孙意凡¹ 孙建桐¹ 赵 然² 李世超² 张 漫¹ 李 寒¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 设计了一种果实自动采摘机器人,主要包括自动导航系统、采摘系统、运动系统、控制系统及动力系统。自动导航系统主要包括激光雷达导航和 GNSS 定位导航,可用于建立地图和规划工作路径;采摘系统通过双目立体视觉相机进行果实识别,再通过由六自由度机械臂和两指末端执行器(机械手)组成的执行机构抓紧果梗并剪断,完成果实采摘。试验结果表明,设计开发的机器人可以通过激光雷达导航完成室内工作,剪断并抓取果梗的两指末端执行器适用于多种果实,上位机软件可以完成图像采集、机械臂控制和机器人工作路线图建立等操作。激光雷达导航试验结果表明,在 1 m/s 的行驶速度下,导航绝对误差小于 3.5 cm,可满足温室果实采摘的需求。
关键词: 果实采摘机器人; 自动导航; 机械手; 立体视觉
中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0008-07

Design and System Performance Analysis of Fruit Picking Robot

SUN Yifan¹ SUN Jiantong¹ ZHAO Ran² LI Shichao² ZHANG Man¹ LI Han¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fruit picking is an important part of agricultural production, and automatic agricultural fruit picking robots can improve work efficiency and work accuracy. An automatic fruit picking robot was developed, which mainly included automatic navigation system, picking system, motion system, control and power system. Among them, the automatic navigation system mainly included two parts: LiDAR navigation and GNSS navigation, which can be used to establish maps and plan the working paths. The picking system carried out fruit recognition through binocular stereo vision, and then sent the results to the actuator (manipulator), which included a six-degree-of-freedom robot arm and two-finger end. The actuator then grasped the fruit stem and cut the grasping fruit stem to complete the fruit picking. The test results show that the designed and developed robot can complete indoor work through LiDAR navigation. The two-finger end effector that cut and grabbed the fruit stem can successfully finish the fruit picking job. And the developed computer control software can complete image acquisition, robotic arm control, road map creation and other operations. The results of LiDAR navigation accuracy test showed that the absolute error of navigation was less than 3.5 cm at 1 m/s driving speed, which can meet the demand of greenhouse fruit picking.
Key words: fruit picking robot; automatic navigation; manipulator; stereo vision

0 引言

我国果蔬产品的价格一直居高不下,其中很重要的原因是劳动力成本比较高。在果蔬生产作业中,收获采摘约占整个作业量的 40%,而人工采摘成本占整个生产成本的 60%^[1-3]。随着城镇化的

收稿日期: 2019-04-15 修回日期: 2019-05-20
基金项目: 中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2019TC124)和云南院士专家工作站(20170907)
作者简介: 孙意凡(1996—),男,硕士生,主要从事电子与通信工程研究,E-mail: 243566273@qq.com
通信作者: 李寒(1986—),女,副教授,主要从事多模态图像信息融合和墒情自动监测研究,E-mail: cau_lihan@cau.edu.cn

不断推进和社会老龄化的不断加剧,我国从事农业生产的人口出现严重的高龄化现象^[4],农业生产对于自动采摘机器人的需求越来越迫切。

目前,设计果实自动采摘机器人的主要问题是自动导航、果实识别以及末端执行器设计等。在自动导航方面,李鑫等^[5]开发的采摘机器人通过读取沿途的 RFID 标签获得目标以及障碍物位置与距离信息,并根据这些信息规划路径实现自动导航。崔维等^[6]提出基于计算机视觉路径规划和 RBF 神经网络自适应逼近算法的导航方法。郭素娜等^[7]设计的葡萄采摘机器人使用 RSSI 定位技术,对装有无无线传感器的葡萄树进行定位。在果实识别以及末端执行器设计等方面,西欧、日本等发达国家对果实采摘自动化研究起步较早,在自动采摘机器人方面已经取得了一定成果^[8-11]。近年来,国内果蔬自动采摘机器人研究也取得了一定的进展。张飞云^[12]开发的履带式户外苹果采摘机器人,通过卡盘卡住苹果,通过剪刀剪断果梗,最后使用柔性的输送网送到存果箱中。CHIU 等^[13-16]设计的番茄采摘机器人,通过单 CCD 相机的位置移动对目标果实进行识别和定位,使用五自由度机械臂与升降底盘相结合,四指末端执行器完成采摘。

已有的采摘机器人研究,自动导航方法大多采用导轨、RFID 标签等方式,这需要在采摘现场做大量的准备工作。而以往采用的吸盘、卡盘等采摘方式,对于表面容易受损的番茄采摘并不适用,对可采摘的果实品种具有局限性。针对以上问题,本文设计基于激光雷达导航的果实采摘机器人,采用双目立体视觉相机识别果实果梗的位置,通过六自由度的机械臂带动末端执行器运动到果梗位置,采用两指剪抓一体的机械手,在剪断果梗的同时抓紧果梗,完成果实采摘。

1 系统设计与试验方法

1.1 硬件设计

机器人整体硬件功能设计如图 1 所示,由 5 个部分组成:自动导航系统、采摘系统、运动系统、控制和动力系统。其中:自动导航系统包括用于室内导航的激光雷达和用于大田导航的 GNSS 系统;采摘系统包括用于果实识别的双目立体视觉系统和完成果实采摘的六自由度机械臂和末端执行器(机械手);运动系统包括机器人底盘和控制底盘车轮运动的伺服电机;控制系统包括业务工控机和运动控制主板;动力系统包括 48 V 锂电池、固态继电器组

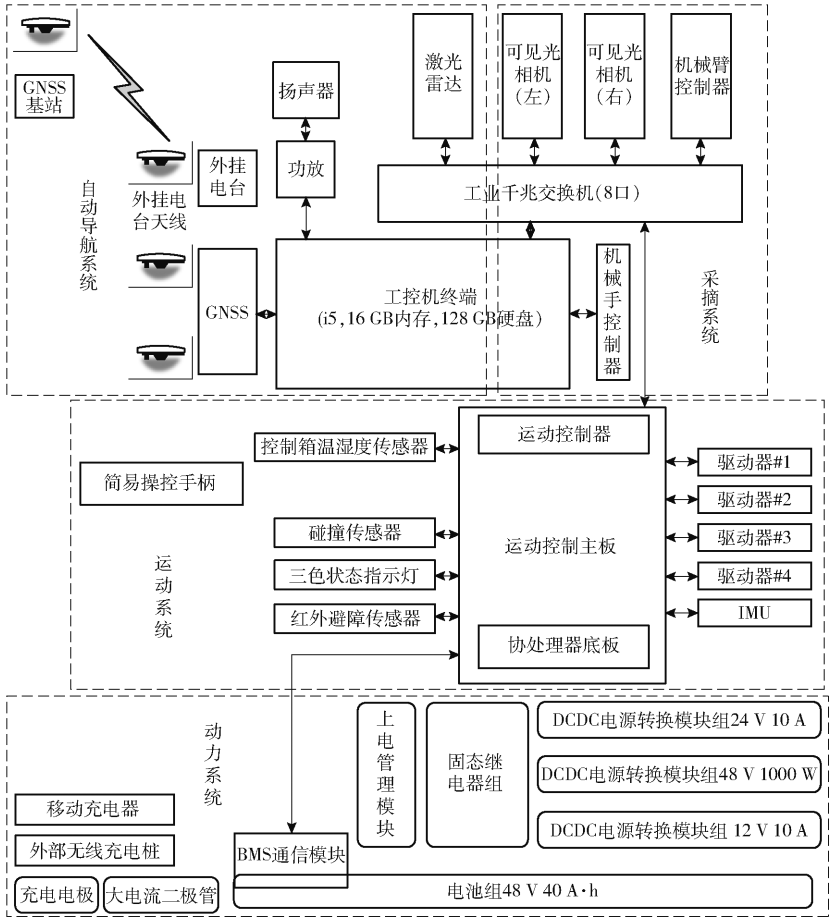


图 1 机器人整体硬件设计图

Fig. 1 Overall hardware design of robot

和无线充电模块。

机器人整体硬件结构设计示意图和实物图如图 2 所示,包括单线激光雷达、前 GNSS 天线、后 GNSS 天线、左相机、右相机、机械臂、机械手、果篮、碰撞传感器、红外避障传感器以及无线充电桩。选用 SICK LMS151 型激光雷达(西克中国)、P3-DT 型接收机 GNSS 系统(华测导航)、AUBO-i5 型机械臂(遨博(北京)智能科技有限公司)和 DS-2ZCN2007(C) 型相机(海康威视)。

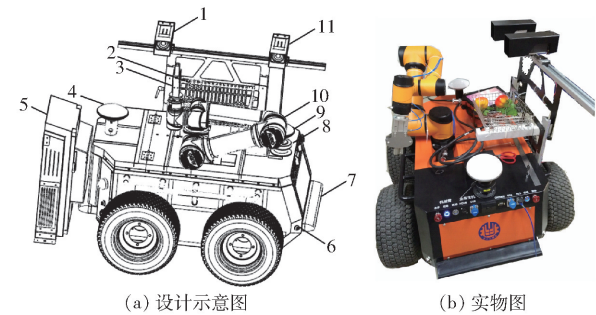


图 2 机器人整体硬件结构

Fig.2 Schematics of robot hardware structure
1. 左相机 2. 果篮 3. 机械手 4. 后 GNSS 天线 5. 无线充电桩
6. 红外避障传感器 7. 碰撞传感器 8. 激光雷达 9. 前 GNSS 天线 10. 机械臂 11. 右相机

1.1.1 自动导航系统设计

机器人自动导航系统由激光雷达和 GNSS 两部分构成(图 1)。根据机器人工作的不同环境(温室或大田),选用合适的方法(激光雷达或 GNSS)进行导航。机器人的前侧装有单线激光雷达,通过单线激光雷达向机器人前进方向发射范围为 270°的单线激光,激光扫描到遮挡物后会发生反射,通过反射的激光计算遮挡物距机器人的距离。采用单线激光雷达进行导航时,首先通过激光雷达建立工作环境地图,然后根据建立的地图设置路径点,并规划工作路线。由于激光在空旷区域或遇到透明物体具有很强的穿透性,因此使用激光雷达导航应在面积较小的封闭环境中。

GNSS 导航通过卫星定位系统确定机器人(移动站)当前大概位置,同时获取基站的当前位置。对移动站的位置信号与基站接收的信号进行差分获得机器人(移动站)运动过程中的精确位置(经纬度)。GNSS 系统进行定位时,无论是基站还是移动站,至少需要同时接收 4 颗卫星的信号才能保证定位的精确度,因此不适用于遮挡物较多的复杂环境。根据激光雷达和 GNSS 不同的技术特点,当机器人工作在温室时,可以采用激光雷达建图、设置路径点、规划工作路径的方法进行导航。当机器人工作在大田时,采用 GNSS 进行导航。

1.1.2 采摘系统设计

采摘系统包括视觉模块和采摘执行机构两部分。机器人视觉模块为两个可见光相机组成的双目立体视觉系统。两个相机同时采集果实的可见光图像,以左相机采集的图像为底图,将右相机采集的图像与左相机图像进行匹配校准,计算果实的位置和深度信息。采摘执行机构由机械臂和末端执行器(机械手)两部分组成(图 1)。机械臂采用六自由度的机械臂,有效工作半径为 800 mm,最大负载为 5 kg。末端执行器(机械手)采用刚性两指剪抓一体的机械手。机械手两根刚性手指顶部装有刀片,机械手工作时两个刚性手指闭合抓紧果梗的同时,机械手顶部的刀片剪断果梗完成果实摘取。机械手手指的开合由气压系统控制,通过改变气压系统中电磁阀的气路开闭改变机械手手指的开合状态,如图 3 所示。

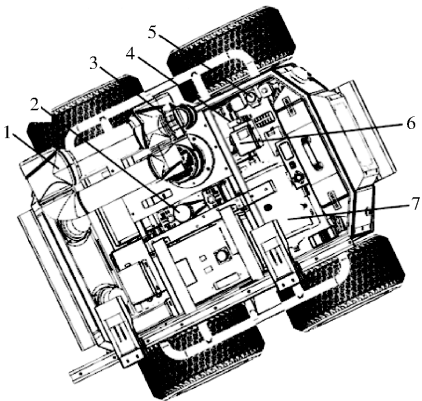


图 3 机器人采摘执行机构示意图

Fig.3 Schematic of robot picking actuator
1. 机械臂 2. 气泵 3. 机械手 4. 电磁阀 5. 空气滤清器 6. 压力表 7. 气罐

1.1.3 运动系统设计

果实采摘机器人采用四轮驱动的运动模式,如图 4 所示。每一个车轮由独立的伺服电机进行控制,车轮与伺服电机之间连接有减速器。机器人工作时运动控制主板通过控制伺服电机的转动方向和转动速度达到控制机器人运动方向和运动速度的目的。机器人采用差速转向的方式实现运动过程中的方向变化。当机器人前进方向左右两侧车轮转动方向相同、转速存在差值时,机器人可以完成弯道转向;当机器人前进方向左右两侧车轮转速相同、转向相反时,机器人可以实现直角转向、调转车头甚至原地旋转等功能。

1.1.4 控制与动力系统设计

机器人控制系统如图 5 所示,整个机器人由工控机进行控制,业务工控机采用 i5 处理器,16 GB 内存,硬盘为 128 GB。工控机借助路由器通过网线连

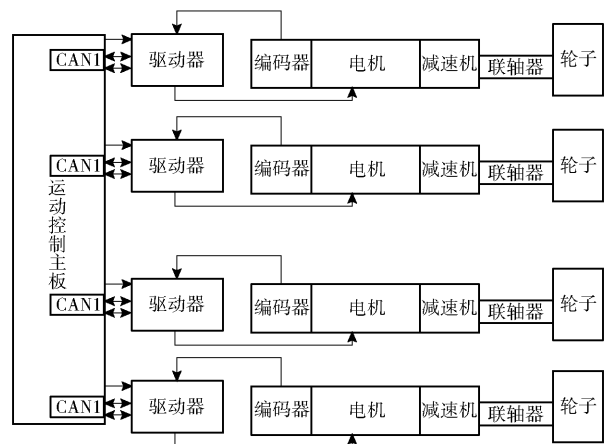


图4 机器人运动系统原理图

Fig.4 Schematic of robot motion system

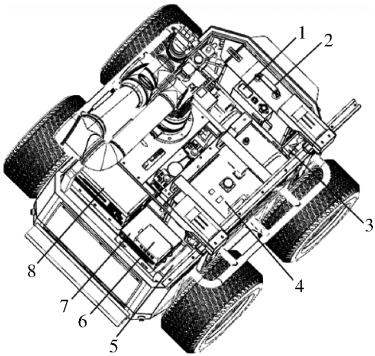


图5 机器人控制系统示意图

Fig.5 Schematic of robot control system

1. 电力显示表 2. 电源 3. 开关 4. 机械臂控制柜 5. 电台
6. 路由器 7. 运动控制板 8. 业务工控机

接运动控制主板、机械臂控制柜、激光雷达以及可见光相机等进行通信。该机器人采用48V锂电池为整个机器人提供动力。在电源充电方面,除了采用传统的220V电源充电外,还配置了无线充电模组,使机器人能够在附近没有电源的情况下获得较好的续航能力。

1.2 软件设计

机器人系统软件使用Microsoft Visual Studio 2015开发,主要包括机械臂运动控制软件设计和激光雷达导航软件设计两部分。

1.2.1 机械臂运动控制软件设计

机械臂运动控制软件程序流程如图6所示,机械臂接收双目立体视觉相机获取的果实位置坐标,首先将位置坐标 (x,y,z) 转换成四元数,再将四元数转换为路点信息,即6个关节每个关节的转动角。最后控制机械臂每个关节运动到指定角度,实现机械臂末端运动到果实位置的目标。机械臂运动结束后,通过控制电磁阀开关控制机械手开合完成果实采摘。

1.2.2 激光雷达导航软件设计

根据激光雷达导航的功能需求,激光雷达导航

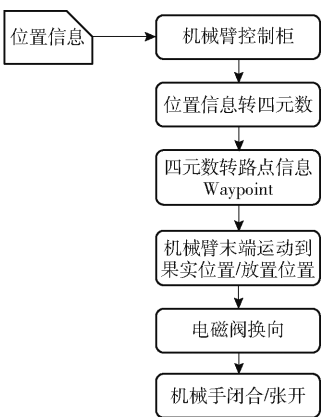


图6 机械臂运动控制程序流程图

Fig.6 Flow chart of manipulator motion control program

软件模块功能图如图7所示。包括数据通信、数据处理、数据存储和界面显示4部分。各个模块之间相互协作实现3个工作模式下的软件运行。激光雷达导航软件工作流程如图8所示,首先在建图模式下通过激光雷达扫描周围环境,建立机器人工作的环境地图;然后在设点模式下根据机器人的工作要求认为设置需要停车工作的路径点,计算各个工作点之间的距离权值,再根据距离权值计算结果,完成路径规划;最后在导航模式下按照规划的路径实现自动导航。

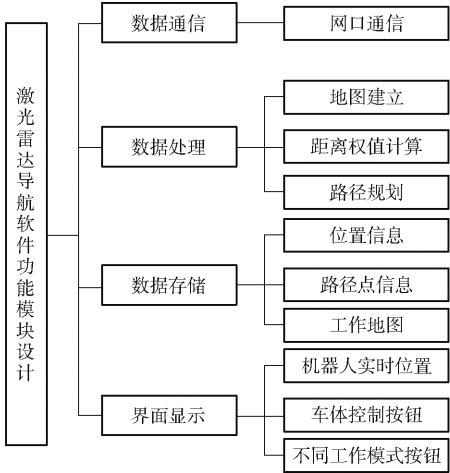


图7 激光雷达导航软件功能模块图

Fig.7 Module diagram of laser radar navigation

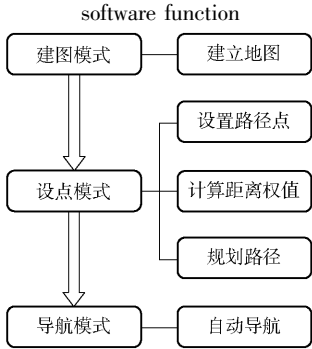


图8 激光雷达导航工作流程

Fig.8 Flow chart of lidar navigation

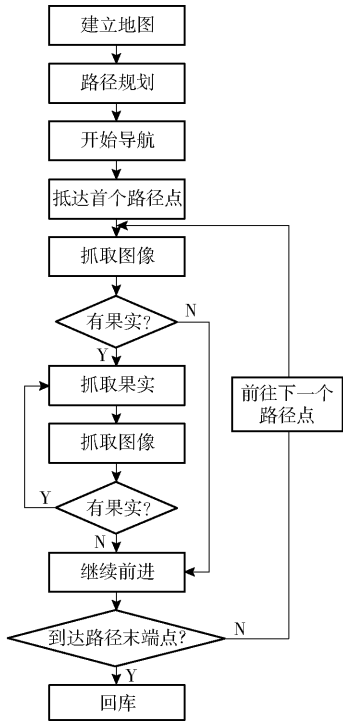


图 9 机器人工作流程图

Fig. 9 Flow chart of robot operation

1.3 工作流程

采摘机器人的工作流程如图 9 所示。首先,根据机器人的工作环境选择合适的方法建立地图(大田采用 GNSS,温室采用激光雷达),然后根据建立的工作地图,对采摘机器人的工作路线进行规划,设置需停车抓取图像的路径点。采摘机器人会依次抵达设置的路径点抓取图像,若发现果实,采摘机器人执行机构会在工作范围内摘取果实,并将无法抵达的果实位置反馈回工控机。执行机构工作结束后,视觉系统会重新抓取图像,确保工作范围内的果实已经全部被摘取。当所有路径点的采摘工作完成即到达路径末端点后,采摘机器人会自动回库为下一次采摘作准备。

1.4 试验方法

为了测试机器人的导航性能,本研究进行了激光雷达室内导航精度试验,测试机器人室内导航的精度和可靠性。试验地点为中国农业大学信息与电

气工程学院办公楼。首先在 5 个不同位置设置 5 个工作点,并贴上坐标纸;通过激光雷达建立地图后,将工作点设置在贴有坐标纸的位置,记录初始坐标。进行 7 次自动导航试验,记录每次自动导航过程中机器人在工作点的坐标。试验过程中机器人的运动速度为 1 m/s。

2 结果与分析

2.1 机械臂控制软件功能实现

机械臂控制软件工作界面如图 10 所示,能够实时显示机械臂的位置坐标、姿态信息以及 6 个关节角的角度。同时实现了控制机械臂停止、复位、机械手开合等功能。



图 10 机械臂控制软件工作界面

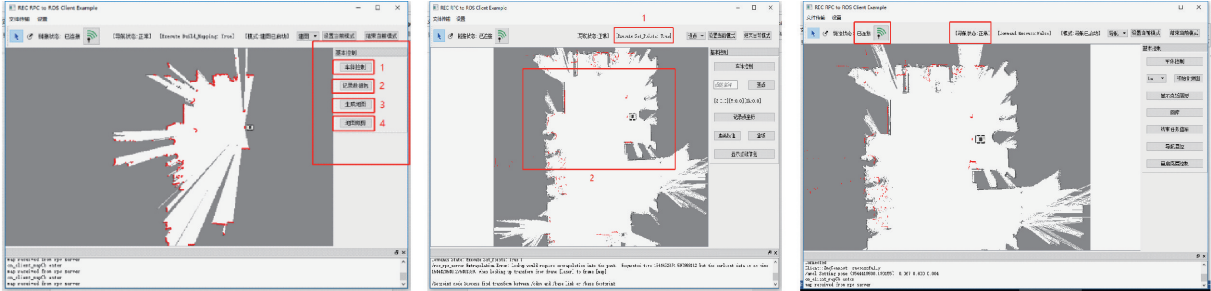
Fig. 10 Diagram of working interface of manipulator control software

2.2 激光雷达导航软件功能实现

软件根据不同功能目的分为建图模式、设点模式和导航模式 3 种模式。

建图模式工作界面如图 11a 所示。建图模式功能包括:车体控制,用于控制机器人运动;记录数据包,记录激光雷达扫描的数据;生成地图根据记录的数据生成工作地图;地图裁剪,根据实际情况对激光雷达建立的地图进行修剪。

设点模式工作界面如图 11b 所示。设点模式功能除了控制机器人运动外,还包括设置工作点并记录该点在在建图模式所建立的地图中的位置坐标。同



(a) 建图模式

(b) 设点模式

(c) 导航模式

图 11 激光雷达导航软件工作界面

Fig. 11 Diagram of working interface of LiDAR navigation software

时根据不同工作点的坐标计算不同工作点之间的距离,用于导航过程中行走路径判断。图 11b 中标记“1”和“2”表示设点模式设置成功。

导航模式工作界面如图 11c 所示,该图中标记“1”和标记“2”表示导航模式设置成功。导航模式包括命令机器人自动导航到指定工作点、停车、回库、复位等功能。

2.3 自动导航试验结果

通过激光雷达导航软件建立的机器人工作路线图如图 12 所示。计算 7 次试验相对误差的平均值和标准差,结果如表 1 所示。再计算每次试验之间的绝对误差以及 7 次试验绝对误差的平均值和标准差,结果如表 2 所示。

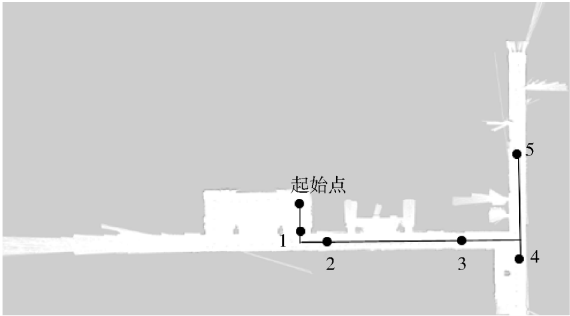


图 12 机器人工作路线图
Fig. 12 Map of robot

表 1 基于激光雷达的导航相对误差

Tab. 1 Relative navigation accuracy based on LiDAR

mm				
位置		左前车轮	右前车轮	左后车轮 右后车轮
1	平均值	41. 945 98	54. 258 03	46. 200 93 52. 828 66
	标准差	19. 338 13	21. 766 49	19. 158 43 20. 935 02
2	平均值	18. 776 78	28. 975 56	24. 318 26 24. 212 71
	标准差	15. 473 60	15. 642 97	15. 331 36 21. 034 70
3	平均值	70. 170 16	46. 053 43	78. 253 54 54. 314 57
	标准差	17. 647 49	13. 499 05	8. 423 489 6. 135 315
4	平均值	39. 827 35	86. 258 87	47. 306 95 83. 237 89
	标准差	15. 424 83	18. 481 06	6. 921 684 5. 782 646
5	平均值	160. 992 20	100. 175 80	157. 042 7 185. 741 5
	标准差	25. 311 00	21. 457 94	23. 294 04 23. 805 06

表 2 基于激光雷达的导航绝对误差

Tab. 2 Absolute navigation accuracy based on LiDAR

mm				
位置		左前车轮	右前车轮	左后车轮 右后车轮
1	平均值	30. 096 94	28. 201 59	31. 525 40 33. 360 73
	标准差	10. 664 19	16. 466 94	13. 813 11 14. 351 30
2	平均值	18. 916 74	26. 023 50	24. 208 51 25. 385 08
	标准差	13. 492 28	13. 181 70	15. 038 36 14. 545 00
3	平均值	19. 744 110	17. 993 480	16. 464 100 17. 266 040
	标准差	10. 228 350	6. 133 701	7. 548 135 8. 940 052
4	平均值	16. 514 67	20. 838 68	20. 277 02 19. 220 56
	标准差	8. 048 353	9. 369 645	9. 830 485 10. 466 44
5	平均值	25. 540 55	22. 308 59	22. 967 68 23. 583 56
	标准差	14. 072 94	13. 043 11	11. 059 94 11. 334 40

由表 1、2 可知,机器人室内激光雷达导航的相对误差及其标准差分别小于 20 cm 和 3.0 cm。绝对误差及其标准差分别小于 3.5 cm 和 2 cm,能够满足温室采摘作业的需求。

通过分析 5 个停车点 7 次试验的绝对误差的平均值和标准差以及相对误差的平均值和标准差,发现激光雷达导航的绝对误差远小于相对误差。纵向对比 5 个停车点的相对误差,发现相对误差越来越大,但是绝对误差并没有太大变化。出现这种情况的原因可能是机器人行驶的过程中存在累积误差。

2.4 果实采摘性能验证

利用设计的机器人,在实验室环境下采用仿真番茄作为采摘目标,进行 50 次采摘试验,成功率达 90%,视觉系统果实识别平均时间为 0.9 s/个,执行机构运动平均时间为 25 s。

3 结束语

设计果实采摘机器人,分别进行了硬件结构设计和软件平台搭建。基于激光雷达导航技术,该采摘机器人可以在室内环境下完成果实采摘,在 1 m/s 的前进速度下,导航绝对误差小于 3.5 cm。搭载双目立体视觉系统,采用六自由度的机械臂和能够剪断并抓紧果梗的末端执行器,实现了对形状、大小、表面硬度不同的果实采摘。

参 考 文 献

[1] 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158 – 162.
SONG Jian, ZHANG Tiezhong, XU Liming, et al. Research actually and prospect of picking robot for fruit and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(5):158 – 162. (in Chinese)

[2] 崔玉洁,张祖立,白晓虎. 采摘机器人的研究进展与现状分析[J]. 农机化研究,2007,29(2):4 – 7.
CUI Yujie,ZHANG Zuli, BAI Xiaohu. Research progress and status analysis of picking robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(2):4 – 7. (in Chinese)

[3] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(12):1 – 18.
LIU Jizhan. Research progress analysis of robotic harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):1 – 18. (in Chinese)

- [4] 耿端阳,张铁中,罗辉,等.我国农业机械发展趋势分析[J].农业机械学报,2004,35(4):208-210.
GENG Duanyang,ZHANG Tiezhong,LUO Hui,et al. Analysis on the development trend of agricultural machinery in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 208-210. (in Chinese)
- [5] 李鑫,李凌雁,李楠.基于RFID和WSN的采摘机器人自主定位与导航设计[J].农机化研究,2017,39(9):215-218,268.
LI Xin, LI Lingyan, LI Nan. Independent positioning and navigation design of picking robot based on RFID and WSN [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 215-218, 268. (in Chinese)
- [6] 崔维,丁玲.基于视觉导航和RBF的移动采摘机器人路径规划研究[J].农机化研究,2016,38(11):234-238.
CUI Wei, DING Ling. Research on path planning of mobile picking robot based on visual navigation and RBF [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 234-238. (in Chinese)
- [7] 郭素娜,张丽,刘志刚.一种高精度自主导航定位的葡萄采摘机器人设计[J].农机化研究,2016,38(7):20-24.
GUO Suna, ZHANG Li, LIU Zhigang. Design of a grape picking robot with high accuracy and self-guided positioning [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 20-24. (in Chinese)
- [8] VAN HENTEN E J, HEMMING J, VAN TUIJL B, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses [J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241-258.
- [9] VAN HENTEN E, VAN TUIJL B V, HEMMING J, et al. Field test of an autonomous cucumber picking robot [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 305-313.
- [10] KONDO N, MONTA M, FUJIURA T, et al. Study on control method for redundant manipulator—control of tomato harvesting manipulator with 7 degrees of freedom [J]. SHITA, 1993, 5(1): 44-53.
- [11] MONTA M, KONDO N, TING K. End-effectors for tomato harvesting robot [J]. Artificial Intelligence Review, 1998, 12(1): 11-25.
- [12] 张飞云.基于S7-200 PLC的苹果采摘机器人控制系统研究[J].江苏农业科学,2013,41(7):377-379.
ZHANG Feiyun. Research on the control system of apple picking robot based on S7-200 PLC [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(7): 377-379. (in Chinese)
- [13] CHIU Y C, CHEN S, LIN J F. Study of an autonomous fruit picking robot system in greenhouses [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(3): 92-98.
- [14] CHIU Y C, YANG P, CHEN S. Development of the end-effector of a picking robot for greenhouse-grown tomatoes [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(6): 1001-1009.
- [15] CHIU Y C, CHEN S, LIN J F. Study of an autonomous picking robot system for greenhouse grown tomatoes [C] // Proceedings of the 6th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agricultural and Biosystems Engineering, 2012.
- [16] CHIU Y C, CHEN S, YANG P Y, et al. Integrated test of an autonomous tomato picking robot [C] // Proceedings of the 7th CIGR Section VI International Technical Symposium “Innovating the Food Value Chain” Postharvest Technology and AgriFood Processing, 2012: 1-16.