

日光温室番茄采摘机器人设计与试验

于丰华^{1,2} 周传琦¹ 杨鑫¹ 郭忠辉¹ 陈春玲^{1,2}

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省农业信息化工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要: 针对目前日光温室中番茄采摘主要靠人工且费时费力的问题,设计并制作了一种可以应用于日光温室的番茄采摘机器人。该机器人能够在大棚垄道间巡检并自动识别成熟番茄,完成采摘、收集。本设计以 STM32 微控制器为主控制器,使用麦克纳姆轮全向移动平台作为机器人的移动底盘,采用由 Raspberry Pi 4B 控制器驱动的深度相机作为成熟番茄的识别装置,底盘上平台安装风力补偿风机、可水平滑动的 6 自由度机械臂,机械臂搭载了附有薄膜压力传感器的柔性手爪。整个上平台由安装在底盘下平台的垂直升降机构驱动,滑动机构和升降机构均配有测距传感器,通过 Raspberry Pi 4B 所驱动的摄像头识别与捕捉,再通过串行总线将成熟番茄的坐标数据传输至 STM32 控制器,STM32 控制器通过机械臂逆运动学分析驱动机械臂、滑轨与升降平台的联合动作,配合机械臂末端关节动作,即可实现番茄采摘。

关键词: 日光温室; 番茄采摘机器人; 机械臂; R-FCN 目标检测网络

中图分类号: S225.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)01-0041-09 **OSID:** 

Design and Experiment of Tomato Picking Robot in Solar Greenhouse

YU Fenghua^{1,2} ZHOU Chuanqi¹ YANG Xin¹ GUO Zhonghui¹ CHEN Chunling^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Liaoning Agricultural Information Engineering Technology Research Center, Shenyang 110866, China)

Abstract: With the popularization and development of solar greenhouse in recent years, more and more crops began to be planted in solar greenhouse. At present, in the greenhouse garden, picking tomatoes mainly relies on fruit farmers to complete manually, which not only consumes a lot of work force, but also wastes a lot of time. Taking tomato as an example, a tomato picking robot was designed which can be applied to solar greenhouse garden, patrol between greenhouse and ridge road and automatically identify ripe tomato in real time, and complete picking and collecting after identifying successful tomato. STM32 microcontroller was the main core of this design. The Mecanum wheel omni directional mobile platform was used as the mobile chassis of the robot, and the depth camera driven by Raspberry Pi 4B controller was used as the recognition device of mature tomatoes. The platform on the chassis was equipped with a wind compensation fan and a 6-DOF horizontal sliding mechanical arm. The arm was equipped with a flexible grip attached to a thin-film pressure sensor. The whole upper platform was driven by the vertical lifting structure installed on the platform under the chassis. The sliding mechanism and the lifting mechanism were equipped with ranging sensors. Through the recognition and capture of the camera driven by Raspberry Pi 4B, the coordinate data of the ripe tomato was transmitted to the STM32 controller through the serial bus. The STM32 controller drove the joint action of the mechanical arm, slide rail and lifting platform through inverse kinematics analysis of the mechanical arm, and can pick tomatoes at different heights and depths with the action of the end joint of the mechanical arm.

Key words: solar greenhouse; tomato picking robot; robotic arm; R-FCN target detection network

收稿日期: 2021-07-21 修回日期: 2021-09-25
基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2019YFE0197700)
作者简介: 于丰华(1989—),男,副教授,博士,主要从事智慧农业研究,E-mail: adan@syau.edu.cn
通信作者: 陈春玲(1971—),女,教授,博士,主要从事智慧农业研究,E-mail: chenchunling@syau.edu.cn

0 引言

设施农业是典型的劳动密集型产业,即使在设施农业领域拥有高度自动化作业的发达国家,其作物采摘环节仍依赖大量人工来完成^[1-2]。人工采摘费时费力,实现温室自动化采摘已成为当下设施农业发展的主要需求。

随着电子信息技术、人工智能技术、图像识别技术的逐渐成熟,日本、荷兰、英国、法国、美国等从 20 世纪 80 年代中期就开展了采摘机器人研究,采摘对象包括苹果、芦笋、草莓、葡萄、甘蓝、黄瓜、番茄、蘑菇等。

而我国对于农业采摘机器人的研究较晚,且目前仍处于起步阶段^[3]。王顺洸等^[4]设计了一款通过震动使果梗分离、通过仿雨伞机构收集果实的采摘机械臂。但此机械臂会由于果梗柔韧性过大而发生漏采现象,且在收集过程中无法避免果实间的碰撞,这将严重影响采摘覆盖率与果实品质。马廷辉^[5]设计了四自由度机械手,采用空间坐标转换进行运动学分析,实现了强适应能力草莓采摘机器人的研制,但自由度限制了机械臂灵活度^[6]。邵堃^[7]通过将采摘机器人的机械臂扩展到五自由度,在 9 个不同高度和不同方向的目标点采摘中,最大距离偏差仅为 6.71 mm。但其采用的履带式底盘由于行驶速度慢、需要大量的转向空间等问题,无法在日光温室内运行。此外,汤亚东^[8]通过双目视觉、机械臂运动仿真等构建了番茄采摘机器人样机,并完成了复杂环境下的番茄采摘测试,但因其刚性抓手的使用导致无伤采摘成功率仅为 76.3%。王晓楠等^[9]通过使用真空吸附装置、柔性气囊装置、旋拧电机等,实现了番茄的无伤采摘。但是由于枝干、叶片等会对识别系统产生干扰,从而导致机器人的采摘精准度下降。刘芳等^[10]运用改进型多尺度 YOLO 算法,从不同角度、不同光照强度等环境下对番茄进行训练识别。朱明秀^[11]基于 K-means 聚类算法,配合卷积神经网络与双目视觉技术,实现了采摘机器人的水果检测与定位。胡慧明^[12]使用双目视觉技术,为采摘机器人获取了果蔬的三维坐标,为温室环境下的果蔬机器人采摘奠定了基础。

本研究以北方日光温室中的番茄为采摘对象,设计并制作一款适用于日光温室、可以巡检并识别采摘成熟番茄果实的移动机器人。

1 采摘机器人系统功能设计

采摘机器人系统分为底盘四轮驱动系统、采摘系统、可升降平台系统、图像识别系统和风机系统。

其中底盘驱动系统包括 4 个麦克纳姆轮及其驱动电机、底盘悬挂结构和底部巡线摄像头等。采摘系统包括柔性手爪和滑轨型机械臂。可升降上平台系统包括驱动电机及上平台铝板,并附有机臂滑轨和图像识别系统、风机系统等安装支架。

目前,日光温室内机器人常用的作业方式有:地面自由移动式、悬挂导轨移动式、地面导轨移动式等。鉴于日光温室需要对光能的直接性利用^[13],安装悬挂导轨会占用大量日光温室内的上层空间,这将严重影响日光温室的透光率,导致对光能利用率下降;地面导轨的安装占用温室内大量种植面积,影响土地利用,且不利于后期大棚改造升级。故本研究采用了麦克纳姆轮地面导轨移动式机器人作业方式。麦克纳姆轮四驱移动平台相对于传统转向机构移动平台更加灵活,通过控制各个轮系的转速和方向即可组合出任意方向的移动^[14],可以在狭窄的温室内不改变自身状态完成采摘任务。

日光温室内的番茄主要采用架棚、作床的培育模式,列式分布、垂直生长种植方式。番茄果实纵向生长于植株上。故底盘的设计综合考虑了以上因素,采用摆式悬挂结构,此结构可以增加机器人的地形适应能力,保证机器人行驶时底盘的贴地性,提升了行驶时底盘的稳定性与控制精确度^[15]。日光温室番茄栽培模式如图 1 所示。



图 1 番茄栽培模式
Fig. 1 Patterns of tomato cultivation

采摘机器人工作时,机械爪的作用是抓紧果实以便进行果梗分离^[16-17],考虑到成熟番茄果实表皮的力学特性^[18],机器人采摘机构采用柔性手爪,柔性手爪由注塑工艺的橡胶材质制作。该柔性手爪采用三指抓取,由 42 步进电机驱动,手爪动作部分长 95 mm,夹取直径为 10 ~ 120 mm,抓取频率小于 40 次/min,相邻两指(可动)间距 H_1 长 8 ~ 100 mm,柔性手爪总长 H_2 为 152.5 mm,驱动器安装部分高度 H_3 为 40 mm,其结构图如图 2 所示。

此外,在抓手的内壁还贴有如图 3 所示的薄膜

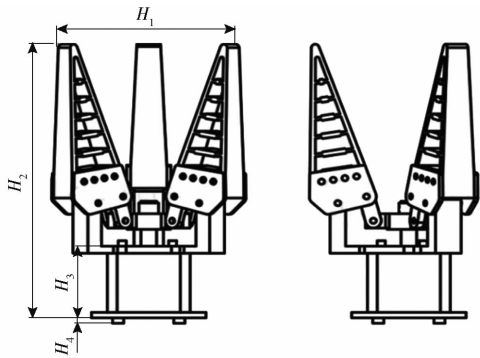


图 2 柔性手爪结构图

Fig. 2 Structure diagram of flexible gripper

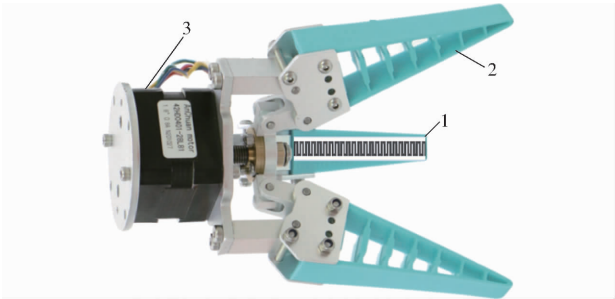


图 3 柔性手爪实物图

Fig. 3 Physical picture of flexible gripper

1. 薄膜压力传感器 2. 抓手柔性手指 3. 抓手驱动电机

压力传感器,控制器可以通过与之连接的 AD 转换电路^[19]获得抓手内部的压力数据,进一步精准控制番茄的采摘力度,从而防止番茄因发生机械损伤而导致的皱缩、品质降低、快速腐烂^[20]等。薄膜压力传感器的响应时间小于 1 ms,形变恢复时间小于 15 ms,可以在 -20 ~ 60℃ 的环境中工作。测试中随机读取 25 次柔性手爪采摘番茄时的压力传感器数据,绘制曲线如图 4 所示。

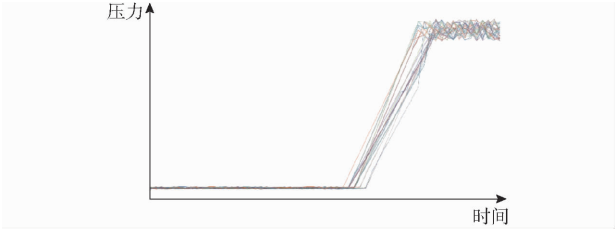


图 4 采摘番茄的手爪压力变化曲线

Fig. 4 Claw pressure change curves for picking tomatoes

为了使机械臂摘取番茄更为灵活^[21],支撑手爪的机械臂采用 6 自由度设计。其中单个关节舵机在 8.4 V 标准工作电压下的扭力为 52 kg/cm,机械臂底座直径 L_1 为 110 mm,底座高 L_2 为 81.5 mm,机械臂第 1 段关节长 L_3 为 105 mm,第 2 段关节长 L_4 为 77.5 mm,第 3 段关节长 L_5 为 58 mm,整体活动半径为 513 mm。且经过分析与讨论黄国伟等^[22]关于番茄果实与茎秆分离力的研究,确定了旋拧摘下的采摘方案,并设计了可以连续旋转 180° 的末端关节。

由此,在采摘动作方案的设计时便可使机械手在 0° 时深入番茄植株中,在抓取稳定后的 0.8 s 内,末端关节快速旋转 180°,使番茄梗与茎秆呈远离 90° 角的方向受力,以实现使用最小的力使果实与茎秆分离。手爪采摘示意图如图 5 所示。

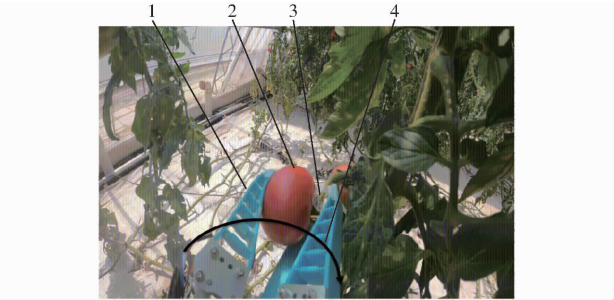


图 5 采摘示意图

Fig. 5 Picking diagram

1. 柔性手爪 2. 番茄 3. 番茄果梗 4. 手爪旋转方向

生长过程中,番茄果实位置并不固定,成熟番茄果实容易被四周枝叶所遮挡,导致摄像头无法准确判断甚至无法识别出成熟的番茄。因此,在上平台添加了带有二自由度云台的风力补偿装置,其装置结构简图如图 6a 所示。机器人在垄道间巡检过程中,风力装置向机器人的预识别区域吹风,枝叶被吹开后,即可使枝叶后面的成熟果实暴露于摄像头视角下,实现被遮挡果实的识别。

考虑到番茄并不是处于固定高度,故设计时采用 Z 轴(垂直于地平面的方向)升降结构,升降结构采用丝杆控制,通过电机转动带动上平台的升降,即可实现对不同高度番茄的采摘。且相对于机器人,番茄生长的深度(番茄果实与垄间中线水平距离)不同,故在机器人上平台上安装一由丝杆控制的可水平移动的 X 轴(水平面内垂直于机器人行进方向)滑轨结构。控制器通过深度相机等传感器获取番茄深度数据后,将自身坐标与机械臂坐标通过

$$AR = RB$$

式中 A ——机器人视觉坐标系

R ——视觉坐标系与机械臂坐标系转换矩阵

B ——机器人机械臂坐标系

换算,计算得出相较于丝杆平台中心位置的番茄深度数据,通过丝杆驱动电机与测距传感器负反馈调节的配合,使机械臂运动到正确的位置后,手爪再深入抓取番茄果实。X、Z 轴驱动结构简图如图 6a、6b 所示。其中 X、Z 轴结构设计参数如表 1 所示。

2 采摘机器人系统软件设计

手-眼协调是体现果蔬采摘机器人自主采摘作业的关键^[23]。根据相机的安装位置,机器人视觉系

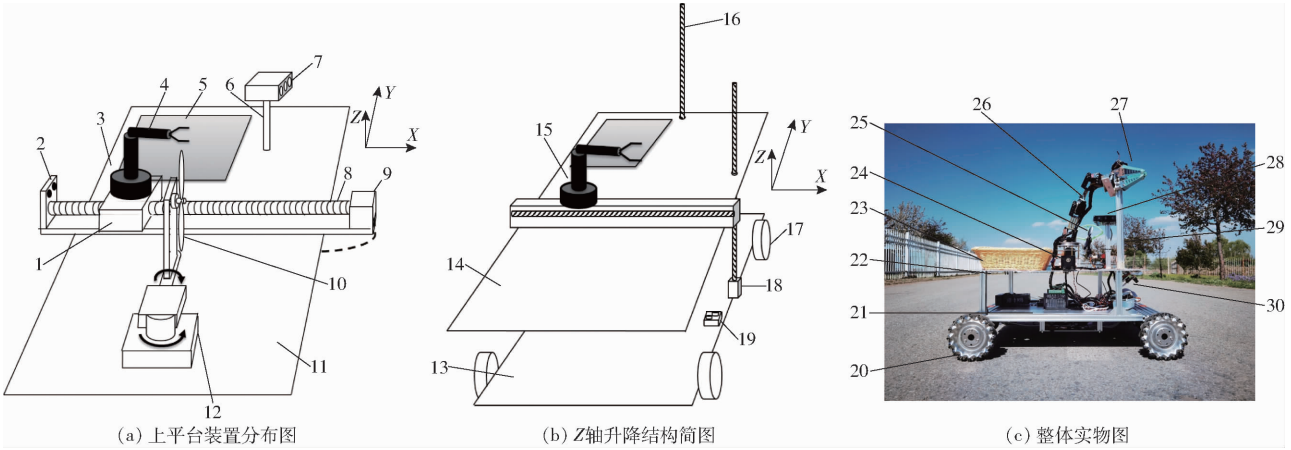


图6 番茄采摘机器人结构图

Fig.6 Pictures of tomato picking robot

1. 滑块 2、19. 测距传感器 3. 机械臂底座 4、15、26. 机械臂 5、23. 果篮 6. 摄像头支架 7、28. 摄像头 8、16. 丝杆 9、18. 步进电机 10. 风扇 11、14、22. 机器人底盘上平台 12. 二自由度云台 13. 机器人底盘下平台 17. 车轮 20. 麦克纳姆轮 21. 摆式悬挂底盘 24. 水平导轨 25. 风机 27. 柔性手爪 29. 升降驱动轴 30. 巡线相机

表1 底盘升降平台结构硬件参数

Tab.1 Hardware parameters of chassis lifting platform structure

参数	数值
X 轴长度/mm	580
X 轴滑轨移动速度/(mm·s ⁻¹)	18
X 轴丝杆直径/mm	8
X 轴电机扭矩/(N·m)	0.31
Z 轴长度/mm	970
Z 轴升降速度/(mm·s ⁻¹)	36
Z 轴丝杆直径/mm	12
Z 轴电机扭矩/(N·m)	2.3

统可分为 Eye - to - Hand 型和 Eye - in - Hand 型^[24],其中 Eye - to - Hand 型是将相机安装在机器人本体以外的某个地方,并固定不动;Eye - in - Hand 型则是将相机固定在机器人手臂上,并随机器人手臂一起运动^[25]。温室大棚高度限制、番茄植株的垂直生长方向、番茄果实相对过小等成为限制 Eye - to - Hand 型在温室内作业的主要因素。在考虑 Eye - in - Hand 型时,由于机械臂处于运动状态,这就导致摄像头的位置也在实时变化,这样系统的运算量就会十分巨大,而单片机等微控制器并不能满足系统实时控制的需求。综上,最终决定将相机放置于可升降上平台并固定,在如图 7b 所示上平台的笛卡尔坐标系下,设坐标系 XYZ 的原点 O_{car} 为 $(0, 0, 0)$,机械臂坐标系 $X_{Arm} Y_{Arm} Z_{Arm}$ 原点 O_{Arm} 为 $(X_{car}^{Arm}, Y_{car}^{Arm}, Z_{car}^{Arm})$,相机坐标系 $X_{cam} Y_{cam} Z_{cam}$ 原点 O_{cam} 为 $(X_{car}^{cam}, Y_{car}^{cam}, Z_{car}^{cam})$ 。

设偏移矩阵

$$\Delta = [d_x \quad d_y \quad d]^T$$

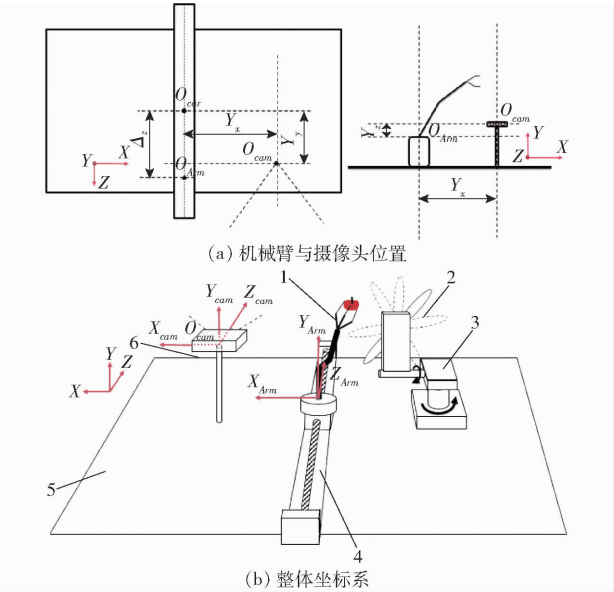


图7 上平台坐标系示意图

Fig.7 Schematics of upper platform coordinate system

1. 机械手爪 2. 风机 3. 二自由度云台 4. 水平导轨 5. 可升降上平台 6. 摄像头

则

$$\Delta = \begin{bmatrix} Y_x \\ Y_z \\ \Delta_z - Y_y \end{bmatrix} \tag{1}$$

且易知

$$\boldsymbol{O}_{Arm} = \boldsymbol{O}_{cam} - \Delta \tag{2}$$

式中 d_x ——偏移矩阵中相机坐标原点与机械臂坐标原点在 X 轴方向的距离
 d_y ——偏移矩阵中相机坐标原点与机械臂坐标原点在 Y 轴方向的距离
 d ——偏移矩阵中相机坐标原点与机械臂坐标原点在 Z 轴方向的距离
 Y_x ——实际测量相机坐标原点与机械臂坐标原点在 X 轴方向的距离

Y_y ——实际测量相机坐标原点与小车原点在 Y 轴方向的距离

Y_z ——实际测量相机坐标原点与机械臂坐标原点在 Z 轴方向的距离

Δ_z ——实际测量小车原点与运动中的机械臂坐标原点在 Z 轴方向的距离

采用图漾 FM810 - HD 型深度相机, 配合 Raspberry Pi 4B 使用。此外, 在相机和机器人上平台连接处采用减震球连接, 这样可以使相机在底盘遇到震动时保持平稳, 减少番茄位置信息的误报, 提升采摘准确度。摄像头摆放位置如图 6a 所示。

番茄识别主要由基于 RGB 图像的目标检测以及图像数据处理两部分构成。获取到的 RGB 图像经过 R-FCN 目标检测网络, 计算出番茄所在的矩形框, 然后将深度信息与目标检测产生的二维信息融合, 最终计算出番茄的点云中心位置。整体算法流程图如图 8 所示。

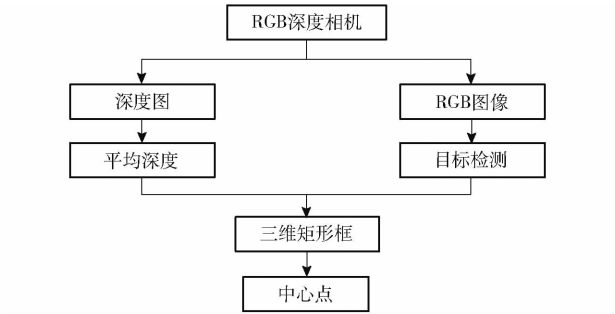


图 8 图像算法流程图

Fig. 8 Flowchart of image algorithm

R-FCN 卷积神经网络主要由网络卷积神经网络 ResNet101、RPN 网络、ROI pooling 层以及最后的

投票决策层构成, 其结构如图 9 所示。图像输入之后, 经过卷积层 ResNet 进行特征提取后传给区域建议网络 RPN, 经过计算之后生成候选区, 将候选区加入位置特征, 之后进入池化层和分类层, 从而得到番茄的具体位置。R-FCN 算法主要采用 ResNet 网络和 RPN 区域建议网络来进行训练, ResNet 的具体结构如表 2 所示, RPN 区域建议网络的结构由 512 个卷积核为 3×3 、边界填充为 1、滑动步长为 1 的卷积核组成的卷积层。R-FCN 处理速度在大量试验中比 Faster RCNN 更快^[26-28]。

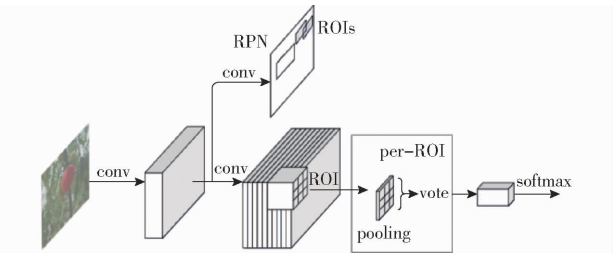


图 9 R-FCN 卷积神经网络结构图

Fig. 9 Structure diagram of R-FCN convolutional neural network

首先将预先拍摄好的番茄图像标注后, 按 4:1 分为训练集与测试集输入 R-FCN 目标检测网络训练模型, 并转换为 NCNN(腾讯开源的移动端神经网络模型)轻量级神经网络框架, 部署在 Raspberry Pi 4B 中。通过双目红外 RGB 深度相机获取图像, 以相机为坐标系构建点云地图, 将三维点云信息经过多平面分割、聚类算法过滤, 再将三维点云信息反投影到二维坐标, 并与检测到的番茄关键帧对应的二维信息匹配, 从而得到目标番茄对应的三维包围

表 2 ResNet 结构参数

Tab. 2 ResNet structure parameters

卷积层	输出尺寸	卷积层 18	卷积层 34	卷积层 50	卷积层 101	卷积层 152
conv1	112 × 112			7 × 7, 64, 步长 2		
				3 × 3 池化层, 步长 2		
conv2_x	56 × 56	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 64 \\ 3 \times 3 & 64 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 64 \\ 3 \times 3 & 64 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 64 \\ 3 \times 3 & 64 \\ 1 \times 1 & 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 64 \\ 3 \times 3 & 64 \\ 1 \times 1 & 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 64 \\ 3 \times 3 & 64 \\ 1 \times 1 & 256 \end{bmatrix} \times 3$
conv3_x	28 × 28	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 128 \\ 3 \times 3 & 128 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 128 \\ 3 \times 3 & 128 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 128 \\ 3 \times 3 & 128 \\ 1 \times 1 & 512 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 128 \\ 3 \times 3 & 128 \\ 1 \times 1 & 512 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 128 \\ 3 \times 3 & 128 \\ 1 \times 1 & 512 \end{bmatrix} \times 8$
conv4_x	14 × 14	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 256 \\ 3 \times 3 & 256 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 256 \\ 3 \times 3 & 256 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 256 \\ 3 \times 3 & 256 \\ 1 \times 1 & 1024 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 256 \\ 3 \times 3 & 256 \\ 1 \times 1 & 1024 \end{bmatrix} \times 23$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 256 \\ 3 \times 3 & 256 \\ 1 \times 1 & 1024 \end{bmatrix} \times 36$
conv5_x	7 × 7	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 512 \\ 3 \times 3 & 512 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3 & 512 \\ 3 \times 3 & 512 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 512 \\ 3 \times 3 & 512 \\ 1 \times 1 & 2048 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 128 \\ 3 \times 3 & 128 \\ 1 \times 1 & 2048 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1 & 512 \\ 3 \times 3 & 512 \\ 1 \times 1 & 2048 \end{bmatrix} \times 3$
	1 × 1			均值采样, 1 000 个分类的全连接层		
每秒浮点运算次数		1.8×10^9	3.6×10^9	3.8×10^9	7.6×10^9	1.13×10^{10}

框,计算三维包围框的中心,作为番茄的中心点。图 10 为番茄识别结果。



图 10 番茄识别结果
Fig. 10 Tomato identification results

传统的采摘机器人多自由度机械臂运动采用微分插补法^[29]、坐标逆运动学分析^[30]等,通过摄像头等传感器得到目标的坐标、朝向角等信息。控制器通过采集到的数据解算出各个关节的转角,再通过控制器的脉宽调制技术产生控制信号驱动机械臂旋转,把末端执行器以正确的角度送达指定位置以完成采摘任务。但是由于番茄等作物的生长方式较为固定,即由于重力作用,均向地心方向生长。所以如图 11 所示的机械臂模型的末端执行器所连接的关节 DE 始终保持与地面平行即可,即末端执行器倾角 α 始终为 0° 。则机械臂进行逆运动学分析的过程中 α 便可直接作为已知条件代入,大大减轻了控制器的运算强度。此外,由于考虑到机械臂过长,关节 B 所承受力的问题,系统在设计过程中将 BC 臂与水平面的夹角 β_3 固定为 45° ,其他关节不做限制。经过理论分析满足

$$L_3 \cos \beta_3 + L_4 \cos (\beta_3 + \beta_4) + L_5 \cos (\beta_3 + \beta_4 + \beta_5) + H_2 + \delta \geq \frac{D}{2} \tag{3}$$

式中 δ ——上平台滑轨可移动距离
 D ——大棚内供机器人行驶的垄间距
 β_4 ——机械臂第 2 段关节与第 1 段关节夹角

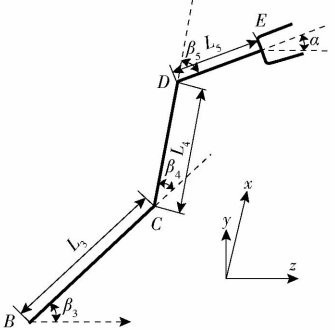


图 11 采摘机械臂关节结构简图
Fig. 11 Schematic of joint structure of picking manipulator

β_5 ——机械臂第 3 段关节与第 2 段关节夹角
在 β_3 与 α 都已知的情况下,对于执行器将运动到的番茄目标点坐标信息 $(X_{tmo}, Y_{tmo}, Z_{tmo})$,通过机械臂逆运动学解算分析与化简,将番茄相对于机械臂原点 O_{Arm} 的高度信息分为 4 个阶段

$$y_1 \leq L_3 \sin \beta_3 - L_4 \cos \beta_3 \tag{4}$$

$$L_3 \sin \beta_3 - L_4 \cos \beta_3 < y_2 \leq L_3 \sin \beta_3 - L_4 \cos \beta_3 \tag{5}$$

$$L_3 \sin \beta_3 - L_4 \cos \beta_3 < y_3 \leq L_3 \sin \beta_3 + L_4 \tag{6}$$

$$L_3 \sin \beta_3 + L_4 \leq y_4 \tag{7}$$

式中 y_1, y_2, y_3, y_4 ——第 1~4 阶段高度
由此得番茄果实在不同高度段下的深度信息为

$$Z = \begin{cases} L_3 \cos \beta_3 + L_4 \sin \beta_3 + L_5 & (Y \in y_1) \\ (L_3 + L_4) \cos \beta_3 + L_5 & (Y \in y_2) \\ L_3 \cos \beta_3 + L_4 \cos (\beta_3 + \beta_4) + L_5 & (Y \in y_3) \\ L_3 \cos \beta_3 + L_5 & (Y \in y_4) \end{cases} \tag{8}$$

机械臂各关节转角为

$$\beta_4 = \begin{cases} -90^\circ & (Y \in y_1) \\ 135^\circ - \frac{180^\circ}{\pi} \arccos \frac{L_3 \sin \beta_3 - Y_{arm}}{L_4} & (Y \in y_2) \\ -45^\circ + \frac{180^\circ}{\pi} \arccos \frac{Y_{arm} - L_3 \sin \beta_3}{L_4} & (Y \in y_3) \\ 45^\circ & (Y \in y_4) \end{cases} \tag{9}$$

$$\beta_5 = \begin{cases} 45^\circ & (Y \in y_1) \\ 90^\circ - \beta_4 & (Y \in y_2) \\ \beta_4 + \beta_3 & (Y \in y_3) \\ -90^\circ & (Y \in y_4) \end{cases} \tag{10}$$

且易知,机械手末端坐标即为番茄坐标,故
 $X_{Arm} = X_{tmo}$ $\tag{11}$
 $Y_{Arm} = Y_{tmo}$ $\tag{12}$

最终将机械臂逆运动学计算过程与式(1)、(2)和式(4)~(12)写入控制器中,机器人即可根据摄像头识别到的番茄坐标信息完成采摘动作。

3 试验与结果分析

3.1 试验方法

试验于 2021 年 4 月在沈阳农业大学后山科研基地 21—22 号日光温室中进行。温室长 60 m,宽 10 m,温室内种植 28 行番茄,行与行垄间距 1.2 m,番茄植株平均高度 1.9 m,番茄在植株上的分布范围为 0.6~1.5 m,垄道间铺有防止土壤水分蒸发的塑料布。

首先将温室地面铺设成如图 12 所示效果,将机器人放置于正确位置,将果蔬收集筐置于机器人上

平台后,系统开机运行。

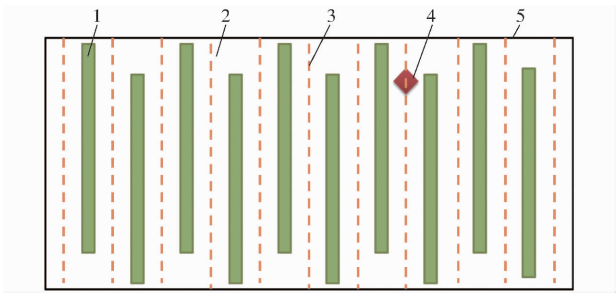


图 12 温室的定位胶带布线效果图

Fig. 12 Effect diagram of positioning tape wiring in greenhouse

1. 番茄种植区 2. 机器人行驶区 3. 定位线 4. 机器人 5. 日光温室

机器人巡检过程中记录每次采摘状态、采摘效果等;在单次测试完成后导出每次相机识别坐标与机械臂关节运动角度等;随机抽取当天所采番茄约 20 颗,在室内无光照(约 26℃)环境下观察其表皮褐变情况与果实腐烂程度,并与人工采摘番茄对比。试验现场如图 13 所示。

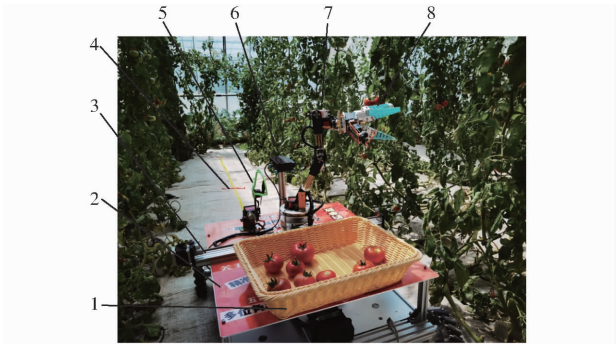


图 13 试验现场

Fig. 13 Field experiment diagram

1. 果篮 2. 升降平台 3. 滑轨 4. 定位线 5. 风机 6. 摄像头 7. 机械臂 8. 柔性手爪

3.2 试验结果

番茄采摘机器人试验数据如表 3 所示。控制器芯片导出数据经整理得采摘过程部分坐标信息如表 4 所示。经 1~28 d 观察与统计,番茄的表皮褐变与腐烂情况如表 5 所示。

表 3 机器人采摘效果数据

Tab. 3 Data sheet of robot picking effect

参数	数值
成功识别的成熟番茄数量	412
未能成功识别的成熟番茄数量	34
风力补偿装置辅助后识别的番茄数量	12
未成熟番茄的误识别数量	0
机械臂预采摘成熟番茄数量	408
成熟番茄一次采摘成功的数量	352
成熟番茄二次采摘成功的数量	392

表 4 采摘过程信息数据

Tab. 4 Picking process information data mm

相机视角番茄坐标	手爪坐标	X 轴丝杆移动距离
(-3,837,296)	(0,786,58)	226
(0,541,371)	(0,575,117)	241
(-4,461,373)	(0,508,74)	287
(-2,945,432)	(0,916,149)	277
(4,752,426)	(0,695,145)	267
(1,605,335)	(0,671,87)	260
(1,390,453)	(0,375,152)	312
(2,466,290)	(0,484,64)	234
(4,660,395)	(0,686,152)	258
(2,582,347)	(0,571,77)	286
(2,767,347)	(0,852,72)	292
(-1,632,402)	(0,643,148)	265
(-1,608,416)	(0,717,114)	291
(3,711,461)	(0,701,171)	278
(-2,928,452)	(0,967,184)	253
(-4,947,393)	(0,901,90)	319
(-3,911,353)	(0,843,83)	277
(-2,911,418)	(0,933,179)	232
(1,425,469)	(0,521,158)	317
(3,881,379)	(0,925,154)	231
(-4,584,423)	(0,679,127)	284
(-2,302,415)	(0,379,119)	311
(4,882,385)	(0,786,162)	216
(2,585,341)	(0,677,91)	239
(-3,418,414)	(0,396,127)	301

表 5 番茄状态数据

Tab. 5 Tomato state data

指标	手工采摘	机器采摘
3d 表皮褐变数量/采摘总数量	0/5	0/25
3d 腐烂数量/采摘总数量	0/5	1/25
5d 表皮褐变数量/采摘总数量	2/5	8/25
5d 腐烂数量/采摘总数量	1/5	4/25
7d 表皮褐变数量/采摘总数量	5/5	25/25
7d 腐烂数量/采摘总数量	3/5	18/25
10d 表皮褐变数量/采摘总数量	5/5	25/25
10d 腐烂数量/采摘总数量	4/5	22/25

综上所述,通过机器与人工采摘果实质量对比可知:采摘机器人在一定程度上不会对果实产生较大损伤,其产生的损伤也在可接受范围内。此外,尽管机械手爪与定位坐标仅有 2 cm 以内的误差,但是在测试过程中如图 14a 所示的采摘偏差仍不可忽略,图 14b 所示未完全采摘状况也尚未解决。

3.3 误差分析

经分析可知系统误差主要来源于摄像头所在上平面未与地面保持水平,导致摄像头与机械臂的坐标系与真实环境坐标系具有一定的旋转角度差异,从而导致采摘误差。此外,由于预先设计机械臂时



图 14 不良采摘状况
Fig. 14 Bad picking condition

没有考虑到结构强度与弹性变形,导致机器人工作一段时间后,机械臂第 2 关节发生了变形,从而导致采摘不精准。还有部分番茄果梗韧性较大,机械

手爪旋转不足以将其摘下,从而导致采摘成功率较低。

4 结 论

- (1)设计并制作了一种可以在日光温室内自动巡检并采摘成熟番茄果实的移动机器人。机器人采用贴有薄膜压力传感器的柔性机械手爪。
- (2)在手眼坐标系始终相同的前提下进行机械臂逆解、定位,控制的实时性得到了有效的提高。风力补偿装置对提高被枝叶遮挡番茄的识别有积极作用。

参 考 文 献

[1] 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 of greenhouse picking robot technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):1-18. (in Chinese)

[2] 郑刚,刘佳,李旭. 现代温室采摘机器人发展概况[J]. 农业工程技术,2019,39(31):35-40.
ZHENG Gang, LIU Jia, LI Xu. Development of modern greenhouse picking robot[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019,39(31):35-40. (in Chinese)

[3] 肖旭,李明,谢景鑫,等. 农业机器人技术发展综述[J]. 湖南农业科学,2020,4(11):113-118.
XIAO Xu, LI Ming, XIE Jingxin, et al. Review on the development of agricultural robot technology[J]. Hunan Agricultural Sciences,2020,4(11):113-118. (in Chinese)

[4] 王顺为,刘华雷,徐添翼,等. 一种振动式水果采摘机械臂设计[J]. 科学技术创新,2020(16):17-18.

[5] 马廷辉. 草莓采摘机械臂精准化控制算法分析[J]. 农机化研究,2021,43(5):23-27,34.
MA Tinghui. Analysis of precision control algorithm of strawberry picking manipulator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(5):23-27,34. (in Chinese)

[6] 王皓. 柔性连续体机械臂大变形性能的研究[D]. 北京:北京工业大学,2020.
WANG Hao. Research on large deformation performance of flexible continuum manipulator[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2020. (in Chinese)

[7] 邵堃. 五自由度机械臂的番茄智能采摘机器人[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):250-253.
SHAO Kun. Tomato intelligent picking robot based on 5-DOF robot arm[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(21):250-253. (in Chinese)

[8] 汤亚东. 番茄智能采摘机构优化设计及试验研究[D]. 郑州:河南农业大学,2018.
TANG Yadong. Optimization design and experimental research of tomato intelligent picking mechanism[D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University,2018. (in Chinese)

[9] 王晓楠,伍萍辉,冯青春,等. 番茄采摘机器人系统设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(4):94-98.
WANG Xiaonan, WU Pinghui, FENG Qingchun, et al. Design and experiment of tomato picking robot system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(4):94-98. (in Chinese)

[10] 刘芳,刘玉坤,林森,等. 基于改进型 YOLO 的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J]. 农业机械学报,2020,51(6):229-237.
LIU Fang, LIU Yukun, LIN Sen, et al. Fast identification method of tomato fruit in complex environment based on improved YOLO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):229-237. (in Chinese)

[11] 朱明秀. 采摘机器人水果检测及定位研究——基于图像处理和卷积神经网络[J]. 农机化研究,2022,44(4):49-53.
ZHU Mingxiu. Research on fruit picking robot detection and localization based on image processing and convolutional neural network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(4):49-53. (in Chinese)

[12] 胡慧明. 基于双目视觉的棚室番茄采摘关键技术研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2018.
HU Huiming. Research on key technologies of tomato picking in shanty based on binocular vision[D]. Wuhan:Hubei University of Technology,2018. (in Chinese)

[13] 李艳英. 日光温室的几种增效方式[J]. 河南农业,1998(10):33.
LI Yanying. Several ways of increasing efficiency in solar greenhouse[J]. Henan Agriculture,1998(10):33. (in Chinese)

[14] 崔财豪,史浩然,黄琳,等. 基于模糊 PID 轮式机器人控制系统的仿真与试验[J]. 科学技术创新,2021(16):85-87.
CUI Caihao, SHI Haoran, HUANG Lin, et al. Simulation and experiment of wheeled robot control system based on fuzzy PID[J]. Science and Technology Innovation,2021(16):85-87. (in Chinese)

[15] 周航,朱翰宸,李园园,等. 基于麦克纳姆轮的摆式悬挂系统设计及其运动学分析[J]. 电子制作,2020(9):65-66,59.

ZHOU Hang, ZHU Hanchen, LI Yuanyuan, et al. Design and kinematics analysis of swing-type suspension system based on Menum wheel[J]. Electronic Manufacturing,2020(9):65 – 66,59. (in Chinese)

[16] 刘继展. 番茄采摘机器人真空吸持系统分析与优化控制研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
LIU Jizhan. Research on vacuum absorbing system analysis and optimization control of tomato picking robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2010. (in Chinese)

[17] KONDO N,MONTA M,FUJIURA T. Fruit harvesting robots in Japan[J]. Advances in Space Research,1996,18(1):181 – 184.

[18] 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):109 – 112.
LIU Jizhan, LI Pingping, LI Zhiguo. Hardware design of the end actuator of tomato picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(3):109 – 112. (in Chinese)

[19] 钱素琴,孙悦. 基于 AD9226 的 FPGA 高速数据采集电路设计[J]. 电子测试,2021(11):5 – 8,12.
QIAN Suqin, SUN Yue. Design of FPGA high speed data acquisition circuit based on AD9226[J]. Electronic Testing, 2021(11):5 – 8,12. (in Chinese)

[20] 李智国. 基于番茄生物力学特性的采摘机器人抓取损伤研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
LI Zhiguo. Study on grabbing damage of picking robot based on tomato biomechanical characteristics[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2011. (in Chinese)

[21] 袁金生. 冗余自由度持镜机械臂的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
YUAN Jinsheng. Design of redundant DOF mirror-holding manipulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2011. (in Chinese)

[22] 黄国伟,毕新胜,肖彬彬,等. 番茄果实与茎秆分离力的影响因素分析[J]. 食品与机械,2013,29(3):187 – 190.
HUANG Guowei, BI Xincheng, XIAO Binbin, et al. Analysis of factors influencing separation power of tomato fruit and stem [J]. Food and Machinery,2013,29(3):187 – 190. (in Chinese)

[23] 金玉成,高杨,刘继展,等. 采摘机器人深度视觉伺服手-眼协调规划研究[J]. 农业机械学报,2021,52(6):18 – 25,42.
JIN Yucheng, GAO Yang, LIU Jizhan, et al. Hand-eye coordination planning with deep visual servo for picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):18 – 25,42. (in Chinese)

[24] 费致根,吴志营,肖艳秋,等. 基于 Adam 优化算法的双目机器人手眼标定方法[J]. 机床与液压,2021,49(11):26 – 30.
FEI Zhigen, WU Zhiying, XIAO Yanqiu, et al. Hand-eye calibration method of binocular robot based on Adam optimization algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021,49(11):26 – 30. (in Chinese)

[25] 任杰轩,张旭,刘少丽,等. 一种高精度机器人手眼标定方法[J]. 现代制造工程,2020(4):44 – 51.
REN Jiexuan, ZHANG Xu, LIU Shaoli, et al. A high precision hand-eye calibration method for robot [J]. Modern Manufacturing Engineering,2020(4):44 – 51. (in Chinese)

[26] 刘思言,王博,高昆仑,等. 基于 R – FCN 的航拍巡检图像目标检测方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(13):162 – 168.
LIU Siyan, WANG Bo, GAO Kunlun, et al. Aerial patrol image target detection method based on R – FCN[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(13):162 – 168. (in Chinese)

[27] 胡辉,曾琛. 基于改进 R – FCN 的车辆目标检测方法[J]. 计算机工程与设计,2020,41(4):1164 – 1168.
HU Hui, ZENG Chen. Vehicle target detection method based on improved R – FCN[J]. Computer Engineering and Design, 2020,41(4):1164 – 1168. (in Chinese)

[28] 薛晓珍. 基于 R – FCN 的合成孔径雷达图像目标识别[D]. 太原:太原理工大学,2020.
XUE Xiaozhen. Synthetic aperture radar image target recognition based on R – FCN [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2020. (in Chinese)

[29] 陈心怡,张春雨,朱丽华. 基于单片机的六自由度机械手臂控制系统设计[J]. 铜陵学院学报,2021,20(2):106 – 109.
CHEN Xinyi, ZHANG Chunyu, ZHU Lihua. Design of 6 – DOF robot arm control system based on single chip microcomputer [J]. Journal of Tongling University, 2021,20(2):106 – 109. (in Chinese)

[30] 王凤祥,张志杰,陈昊泽. 六自由度机械臂系统设计与控制方式研究[J]. 电子测量技术,2021,44(4):1 – 8.
WANG Fengxiang, ZHANG Zhijie, CHEN Haoze. Research on system design and control mode of 6 – DOF manipulator[J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44(4):1 – 8. (in Chinese)