doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.004

垄作草莓双臂采摘机器人设计与试验

董乃深[1,2]　程泓超[1]　应仇凯[1,2]　马锃宏[1,3]　杜小强[1,4]

（1. 浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)，杭州 310018；
3. 浙江省种植装备技术重点实验室，杭州 310018；4. 全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018）

摘要：根据种植模式的不同，可将草莓分为垄作地栽和高架种植两种模式。相比于高架种植，垄作地栽种植成本较低，在国内占据较大的比例。为适应垄作草莓种植农艺，实现垄作草莓采摘，解决劳动力短缺、成本上升等一系列问题，本文研制了一台适用于垄作种植模式下的双臂草莓采摘机器人。该机器人能够在草莓地垄间行驶并自动识别成熟草莓，完成采摘、收集。以 Arduino Nano V3.0 开发板为主控制器，基于 Ubuntu 20.04 进行开发，以 NVIDIA 边缘计算平台 Jetson Xavier NX 为核心，机器人的移动平台使用了高地隙四轮转向底盘，采用 RealSense L515 作为检测识别草莓的传感器，通过 YOLO v8-Pose 网络获取草莓果实的目标检测框和关键点信息，结合关键点与点云处理实现对草莓果柄姿态获取和采摘点的定位；两套机械臂安装剪切-夹持一体式末端执行器，实现对草莓果柄的剪切与夹持。整个采摘系统由 Arduino Nano V3.0 开发板进行驱动，机械臂两侧均配有 L515 相机，通过相机的识别与捕捉，再通过串行总线将草莓果实的坐标数据传输给 Jetson Xavier NX，驱动机械臂末端，实现草莓采摘。最后，在实地草莓大棚中进行采摘试验。试验结果表明，在果梗处无遮挡情况下采摘成功率达到 85.4%，存在部分遮挡时采摘成功率为 75.5%，采摘单个草莓平均耗时为 12.5 s，损伤率为 18.5%。

关键词：垄作种植草莓；双臂采摘机器人；末端执行器；三维点云

中图分类号：S225.93　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S1-0029-12

Design and Experiment of Picking Robot with Dual Arms for Ground Planting Strawberries

DONG Naishen[1,2]　CHENG Hongchao[1]　YING Qiukai[1,2]　MA Zenghong[1,3]　DU Xiaoqiang[1,4]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
4. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: According to different planting modes, strawberries can be divided into two types: ridge planting and elevated planting. Compared with elevated planting, ridge planting had lower costs and occupied a larger proportion in China. To adapt to the agricultural practices of planting strawberries in the field, strawberry picking in the field was achieved, and problems such as labor shortage and rising costs, a dual-arm strawberry picking robot suitabT for the field planting mode. This robot can travel between strawberry ridges and automatically recognize mature strawberries to complete picking and collection. The design used the Arduino Nano V3.0 development board as the main controller which was developed based on Ubuntu 20.04. With the NVIDIA edge computing platform Jetson Xavier NX as the core, the mobile platform of the robot usesd a four-wheel steering chassis with high clearance, the real sense L515 as the recognition device for mature strawberries, the target detection frame and key point information of strawberry fruits through YOLO v8-Pose network was obtained, and the acquisition of strawberry handle posture and the positioning of picking points in combination with key points and point cloud processing. Two sets of robotic arms were installed with integrated end effectors for cutting and clamping strawberry stalks. The entire picking system was driven by the Arduino Nano V3.0 development board, and both sides of the robotic arm were equipped with L515

收稿日期：2024-07-26　修回日期：2024-09-25

基金项目：浙江省自然科学基金重大项目(LD24E050006)和浙江省“三农九方”农业科技协作项目(2022SNJF017)

作者简介：董乃深(2001—)，男，硕士生，主要从事农业机器人研究，E-mail: 2322984818@qq.com

通信作者：马锃宏(1986—)，男，副教授，博士，主要从事农业机器人研究，E-mail: mzhsss@126.com

cameras. Through the recognition and capture of the cameras, the coordinate data of the strawberry fruit was transmitted to Jetson Xavier NX through a serial bus to drive the end of the robotic arm and achieve strawberry picking. Finally, a picking experiment was conducted in a strawberry orchard on site. The experimental results showed that the success rate of picking without obstruction at the stem was 85.4%, and the success rate with partial obstruction was 75.5%. The average time for picking a strawberry was 12.5 s, and the damage rate was 18.5%.

Key words: ground planting strawberries; dual-arm picking robot; end effector; 3D point cloud

0 引言

草莓收获的劳动密集型特点给该行业带来了重大挑战。传统的手工采摘方式不仅对采摘者的身体要求较高,要求采摘者长时间低头弯腰,还面临着劳动力短缺和成本上升的风险[1]。因此,实现草莓果实的自动化机械采摘,提高草莓采摘生产效率,降低采摘成本,成为一项急需解决的问题[2]。在我国根据种植模式的不同,可将草莓分为垄作地栽和高架种植两种模式,相比于高架种植,垄作地栽种植成本较低,在国内占据较大比例。

国外对采摘机器人研究开展较早[3],美国于20世纪90年代末研制出了第1台草莓采摘机器人[4]。挪威生命科学大学XIONG等[5]研制了一台双臂架栽草莓采摘机器人,能够实现在温室环境下的连续自主采摘。Octinion公司开发了一台针对温室架栽草莓采摘机器人[6],实现了草莓实时检测与采摘,能够在温室中自主导航。西班牙AGROBOT公司[7]研制出了针对垄作的多臂草莓采摘机器人,但相比于国内垄作种植环境,其体积相对较大,不太适用于国内的大棚垄作种植环境。我国对于草莓采摘机器人研究起步较晚,但近年来取得了一些进展[8]。我国一些大学以及国家农业智能装备工程技术研究中心[9-14]设计出不同的草莓采摘机器人,并实现了草莓采摘,这些采摘机器人主要针对高架种植模式,存在采摘误差大、采摘效率低等问题。

末端执行器是采摘机器人执行机构,用于实现抓取果实,大多要与采摘目标产生接触。国内外学者针对低损高效的末端进行了大量的研究。王粮局等[15]设计了大容错的草莓采摘末端执行器,降低了草莓采摘的定位精度,但对草莓的损伤较大。黎梦婷等[16]设计了一款软体采摘末端执行器,通过末端夹持剪切,实现柑橘的采摘,但成功率不高。XIONG等[17]设计了一种新型电缆驱动的末端执行器,用于草莓的感知采摘,但损伤率较高。李娜等[18]设计了一种刚柔混联欠驱动草莓采摘机械手,但采摘效率不高。

果实识别与定位在果实采摘过程中至关重要。为准确识别果实,文献[19-21]采用传统的识别方法来寻找目标果实,但易受到环境因素的影响。随着人工智能的发展,深度学习的应用变得更加广泛。文献[22-23]采用基于YOLO系列的目标检测算法,实现对果实的识别,但识别耗时较长。

本研究以垄作草莓为研究对象,针对缺少一体式草莓采摘机器人、草莓识别速度慢、采摘末端执行器尺寸相对较大以及草莓采摘损伤等一系列问题,为较快实现草莓果实快速识别、无损采摘,对轻巧化的低损草莓采摘末端执行器进行研究,采用深度学习网络结合点云的方式进行草莓果实的识别与定位,研制一种适用于垄作草莓的双臂采摘机器人。

1 垄作草莓采摘机器人设计方案

1.1 垄作草莓种植模式及特性分析

对垄作草莓的种植模式和特性进行分析主要包括对垄作草莓农艺特点、生长特性分析以及物理力学特性分析。其中农艺特点以及生长特性分析用来确定机械臂模块的设计以及布局,而物理特性和力学特性分析则是为末端执行器的设计提供参考以及优化。

温室大棚种植的地摘草莓,得益于这些设施对温度、湿度和光照的精细调控,不仅能够延长其生长周期,还能显著提高产量和果实品质。此外,这些种植环境还为草莓提供了一层保护,使其免受恶劣气候和病虫害侵害,如图1所示。

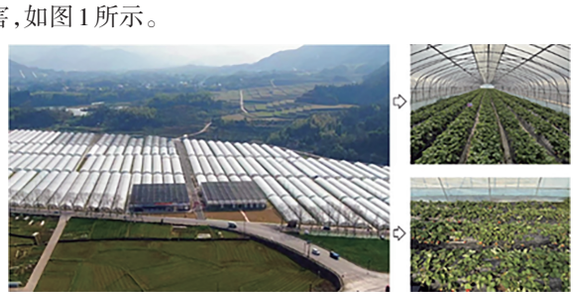
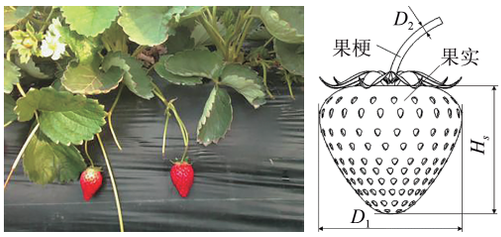


图1 垄作种植草莓园

Fig. 1 Field planting strawberry garden

采摘末端执行器的结构设计与草莓的物理特性有着密切的关联,因此本文对草莓果实与果梗物理参数进行了测量,主要包括果实直径D_1、果实高度H_s和果梗直径D_2,如图2b所示。

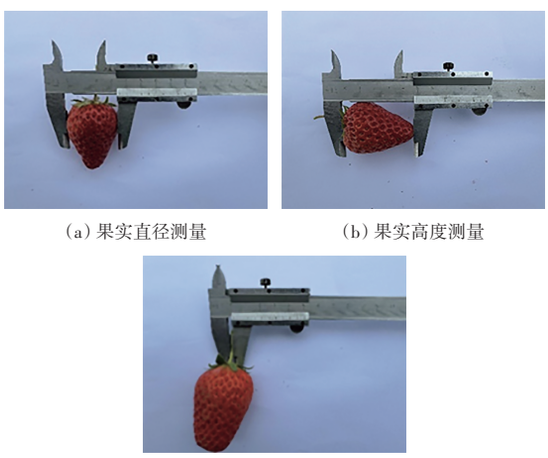
本文测量试验选取的草莓试验样本品种为浙江地区种植的“建德红”,样本采集地点为杭州市建德市草莓果园,测量工具为游标卡尺。随机在果园中选取50颗成熟草莓作为试验样本,分别对果梗直径D_2、草莓果实直径D_1和高度H_s进行测量。为保证测量数据的准确性,对每个试验样本进行多次测量,取平均值作为试验结果。测量过程如图3所示。



(a) 草莓实际生长场景　　(b) 草莓尺寸示意图

图2　草莓生物学特性

Fig. 2　Biological characteristics of strawberries



(a) 果实直径测量　　(b) 果实高度测量

(c) 果梗直径测量

图3　草莓物理参数测量

Fig. 3　Measurement of strawberry physical parameters

通过对试验结果统计与分析，得到草莓果实与果梗物理参数，如表1所示，为末端执行器的结构设计提供重要的数据支持。

表1　草莓物理参数

Tab. 1　Physical parameters of strawberry　　mm

统计项	D_2	D_1	H_s
最大值	2.24	49.52	60.64
最小值	1.16	32.08	44.25
平均值	1.82	38.50	59.15

使用万能材料实验机进行草莓果梗的切割受力和果实抗挤压试验，如图4所示，为末端执行器机构方案选择提供数据参考。

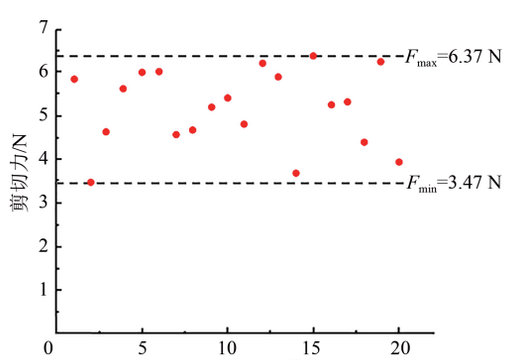


图4　草莓果梗剪切力散点图

Fig. 4　Scatter diagram of strawberry stem shear force

果梗切割受力试验主要是获取金属刀片切割草莓果梗时需要的剪切力，为末端执行器的方案选择、机构设计以及动力源的选型提供数据参考。选取20颗成熟草莓的果梗作为试验样本，试验时将果梗夹紧放置在3D打印的底座上，刀片垂直进入槽口完成剪切，试验结果如图4所示。从试验结果可以看出，成熟草莓果梗剪切力在3~7 N之间。

在草莓抗挤压试验中，选取20颗表面无损伤的完整草莓果实，将草莓放置在试验机的底座上，测试不同压力下的草莓表面破损程度并记录分析。最终，通过挤压力试验发现，草莓果实在受到约2 N的力时，表面会出现损伤。

1.2　草莓采摘机器人总体设计方案

针对大棚环境下垄作种植方式的草莓，结合实际的采摘环境，研制了一种垄作草莓双臂采摘机器人，如图5所示。草莓采摘机器人由高地隙四轮转向底盘、双臂采摘执行系统、视觉检测系统组成。其中底盘采用阿克曼式独转独驱，提高行走、转向控制的灵活性，以减小转向半径。采摘执行系统由末端执行器和机械臂组成：为满足草莓果实的采摘要求，减少草莓损伤，设计了剪切–夹持一体式采摘末端执行器，机械臂选用*XYZ*三轴直线模组。为获取草莓果实具体位置，搭建视觉检测系统：视觉传感器选用RealSense L515深度相机，获取草莓色彩图以及深度图，合成点云图，实现草莓果梗三维定位以及姿态检测。

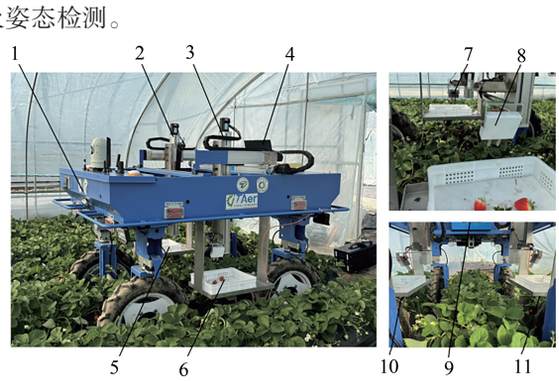


图5　双臂草莓采摘机器人样机

Fig. 5　Prototype of dual-arm strawberry picking robot

1. 行走底盘　2、3. 机械臂　4. 便携式计算机　5、6. 收集筐　7、8. 末端执行器　9. 机械手供电电源　10、11. RealSense L515相机

双臂采摘执行系统布置在行走机构的中间位置，两套机械手分别独立完成垄面两侧草莓的采摘。两个收集筐放置在底盘行走方向两侧。

双臂草莓采摘机器人的基本工作流程如图6所示，过程如下：采摘机器人上电，机械臂和末端执行器等硬件模块进行初始化设置，通过工控机启动控制程序；机器人控制程序启动后，两个RGB–D相机开始分别采集垄面两侧的图像数据，通过视觉系统完成对成熟草莓目标与关键点的联合检测，获取草莓的检测框和关键点的二维坐标信息。结合点云数据，对采摘点三维坐标和姿

态角进行计算，并通过串口通信将数据发送给机械手模块的控制器。两套机械手模块开始执行采摘与收集，当前区域的草莓全部采摘完毕后，通过CAN总线通信控制机器人行走一段距离，进行下一区域采摘工作。

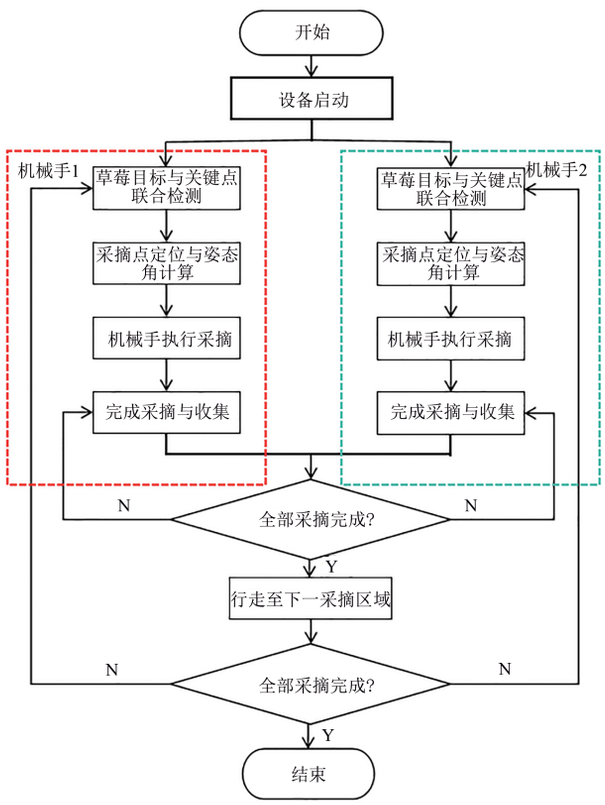


图6 双臂草莓采摘机器人工作流程图

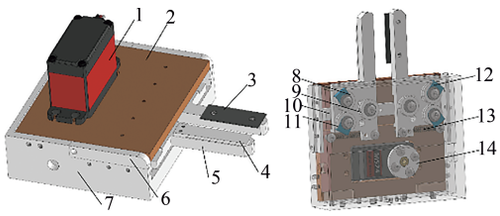
Fig. 6 Workflow diagram of dual arm strawberry picking robot

1.3 剪切-夹持-体式采摘机械末端设计

在草莓采摘机器人系统中，末端执行器的设计至关重要，因为它直接与目标接触，执行采摘任务。草莓作为一种极易受到损伤的水果，末端执行器需要满足的设计要求有：①末端执行器应设计为轻便、紧凑，尽量避免采摘过程中对植株和非当前采摘目标果实造成损伤。②采摘损伤率低，尽可能减少对草莓果实的损伤。③结构简单，效率高，可以高效、快速完成采摘草莓动作。

在采摘作业环节中，末端执行器对果实抓取方式主要有夹持式、吸入式、组合式。根据草莓的力学特性分析可知，草莓的表皮容易受到挤压而损坏。此外，草莓果梗剪切所需要的力较小。因此本文的采摘末端执行器采用夹持式，采摘脱离选择剪切方式。末端执行器直接作用在草莓果梗上，在剪切果梗的同时实现对果梗的夹持，且不接触草莓果实，从而降低草莓损伤率。

设计的草莓采摘末端执行器主要由动力源、传动装置和剪切夹持装置3部分组成，其三维模型如图7所示，主要包括舵机、传动绳、机架、第一滑轮、第二滑轮、第三滑轮、舵盘、滑轨、滑块、左夹指、右夹指、上端挡片、侧压板、挡片、金属刀片和外壳罩等，传动绳在三维模型中未被画出。末端执行器采用夹剪一体的设计，结构紧凑且小巧。通过绳驱的方式实现对草莓果梗的剪切与夹持，避免对草莓果实的直接接触，提高了采摘效率，同时有效减少了对果实的损伤。



(a) 整体结构 (b) 内部结构

图7 末端执行器三维结构图

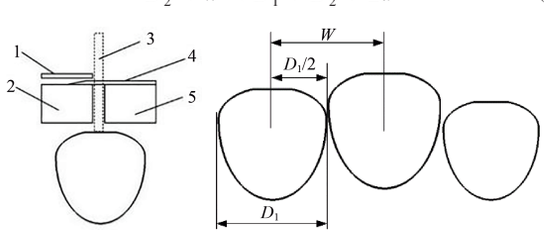
Fig. 7 3D structure diagram of end effector

1. 舵机 2. 机架 3. 金属刀片 4. 上端挡片 5. 夹指 6. 侧压板 7. 外壳罩 8. 第一滑轮 9. 第二滑轮 10. 滑轨 11. 第三滑轮 12. 挡片 13. 弹簧 14. 舵盘

末端执行器由舵机驱动，舵机与机架固定。剪切夹持装置主要由左夹指、右夹指、上端挡片和金属刀片等组成。刀片固定在左夹指上，当夹指闭合时，刀片将草莓果梗剪断，同时夹持住与果实部分连接的果梗，如图7a所示。此外，右夹指上方设有上端挡片，挡片与右夹指间留有间隙形成刀槽，有利于金属刀片剪断草莓果梗。由于末端执行器在采摘草莓时，其夹指头部可能会触碰到垄面的地膜，夹指闭合时容易将地膜夹起。因此，末端执行器的夹指头部设计成近似三角状，可以有效减少末端执行器对地膜的损坏。

完成剪切-夹持装置的结构设计后，进一步确定夹指宽度d、夹指张开间距W和舵盘旋转角θ等参数。若夹指间距过大，在采摘时容易对非目标草莓造成损伤。因此根据草莓果实的分布(图8b)，夹指间距应该满足

$$D_2 < W < D_1 + D_2 + 2d \tag{1}$$



(a) 果梗剪切夹持示意图 (b) 果实分布示意图

图8 草莓果梗剪切夹持与果实分布示意图

Fig. 8 Schematic at of strawberry stem cutting and clamping and fruit distribution

1. 上端挡片 2. 左夹指 3. 果梗 4. 刀片 5. 右夹指

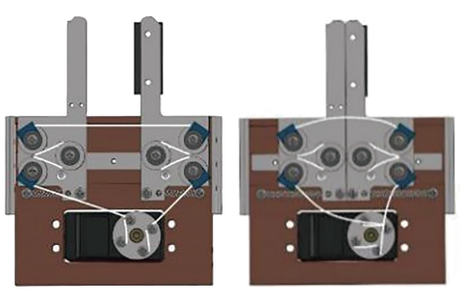
结合上文测量的草莓几何参数，夹指结构宽度设计为7 mm，夹指间距设计为20 mm。舵盘旋转角影响夹指闭合时对果梗夹持力，若夹持力过大会造成果梗挤压损伤，反之则会导致果实掉落。因此，本文进行舵机旋转角参数确定试验。试验时，准备多个带果梗的草莓果实，测试不同旋转角下，末端执行器对草莓的夹持效果以及果梗的损伤情况。最终获取两个末端执行器舵盘最优旋转角，确保既能稳定夹持果实，又能最小化对果

梗的损伤。具体参数为：左侧舵机旋转角为120°，右侧舵机旋转角为122°。

传动机构的主要作用是传递舵机的动力，驱动两夹指的闭合与张开。为减小末端执行器的整体尺寸，传动装置采用绳驱的方式，其主要包括两夹指上的滑轮组（第一滑轮、第二滑轮、第三滑轮）、舵盘、传动螺丝、挡片和装套在滑轮上的传动绳。

传动绳为首尾相连的环状，其缠绕路径为：传动绳的一端首先缠绕固定在舵盘上的两个传动螺丝上，再从下往上一次绕过左侧夹指的第三滑轮（顺时针方向）、第二滑轮（逆时针方向）与第一滑轮（顺时针方向），然后再从上往下依次绕过右侧夹指的第一滑轮（顺时针方向）、第二滑轮（逆时针方向）与第三滑轮（顺时针方向），最后缠绕在舵盘上的传动螺丝上进行固定。

传动装置的工作流程为：当需要夹指闭合时，舵机驱动舵盘转动一定角度收紧传动绳，通过滑轮组对夹指施加拉力，使得夹指克服弹簧的阻力相向运动，直到夹指闭合，完成草莓果梗的剪切与夹持，如图9b所示；当需要夹指张开时，舵机反转，在弹簧拉力的作用下夹指张开，完成草莓的收集，如图9a所示。此外，为了避免夹指闭合过程中传动绳从滑轮脱出，在滑轮上安装4个挡片，有助于提高传动稳定性。



（a）夹指开启　　（b）夹指闭合

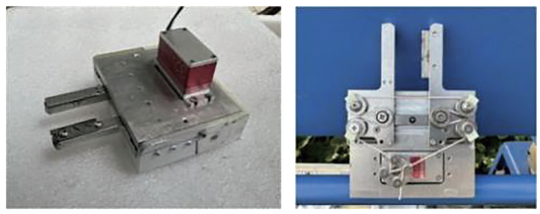
图9　末端执行器传动机构状态图

Fig. 9　State diagram of end effector transmission mechanism

末端执行器实物如图10所示，其工作流程为：首先，机械臂带动末端执行器到待采摘草莓位置，两夹指呈张开状态。然后，舵机转动，带动舵盘逆时针旋转，传动螺丝收紧传动绳，传动绳通过滑轮组带动夹指闭合，刀片伸入刀槽时切断草莓果梗，同时两夹指夹紧与草莓果实相连的果梗，实现无接触的采摘。最后，机械臂带动采摘末端执行器移动至收集筐上方，舵机反向转动释放传动绳，弹性件驱动夹指张开，草莓被放入收集筐中完成收集。

1.4　机械臂结构设计

机械臂是采摘执行系统的重要组成部分，主要负责驱动末端的执行器来执行采摘和收集任务。在采摘执行系统的机械臂设计中，通常有4种主要的结构类型：极坐标型、直角坐标型、圆柱坐标型和关节坐标型。设计的机械臂主要用于垄作种植草莓的采摘，对机械臂的精度以及效率有着较高的要求。因此结合表2中对不同类型机械臂工作特点的分析，选择直角坐标系型机械臂用于草莓采摘。



（a）整体实物图　　（b）内部结构

图10　末端执行器实物

Fig. 10　End-effector

表2　不同结构类型机械臂工作特点对比

Tab. 2　Comparison of working characteristics of mechanical arms with different structural types

类型	工作特点
极坐标系型	体积小，但控制复杂，运动范围受限
直角坐标系型	定位精度高，稳定性好，易于控制，但灵活性较差
圆柱坐标系型	结构简单，但灵活性较低，工作空间受限
关节坐标系型	灵活性高，工作空间广，但控制复杂，传动效率较低

机械臂自由度设计是决定采摘效率和成功率的关键因素。在空间中定位物体通常需要6个自由度，包括3个平移自由度（通常是X轴、Y轴和Z轴）和3个旋转自由度。垄作草莓成熟后常分布在垄坡两侧。依据本文设计的采摘末端执行器及已确定的机械臂结构类型，机械臂通过沿X轴、Y轴和Z轴移动，能够将末端执行器定位至草莓果梗附近，完成采摘。因此3个自由度基本可以满足草莓采摘需求。然而自然环境下草莓果梗姿态不一，草莓果实也并非都垂直向下生长。从Z轴方向（垂直草莓垄的平面方向）视角向下观察，草莓的果梗普遍有轻微的弯曲角度。缺少旋转自由度会导致一些果梗弯曲严重的草莓采摘失败或造成损伤。因此为提高采摘成功率，机械臂自由度设计为4，包括3个平移自由度和1个旋转自由度。

机械臂总体结构如图11所示，主要由X轴直线模组、Y轴直线模组、Z轴直线模组、舵机、舵盘组成。舵机用于驱动末端执行器进行旋转，各直线模组驱动选用57步进电机。

为确定机械臂各自由度行程参数，需要结合草莓分布空间。根据第1节分析，可以构造出草莓的分布范围，如图12所示。其中，草莓分布宽度d_s和收集区域d_g取50、150 mm。为保证绝大多数的草莓能够被末端执行器成功采摘，并考虑草莓的收集，机械臂的工作空间需要大于草莓的分布空间，图12中矩形框表示机器人的工作空间。

因此，结合机械臂工作空间，其X轴行程d_x需要满足

$$d_x > \frac{W_2 - W_1}{2} + d_s + d_g \tag{2}$$

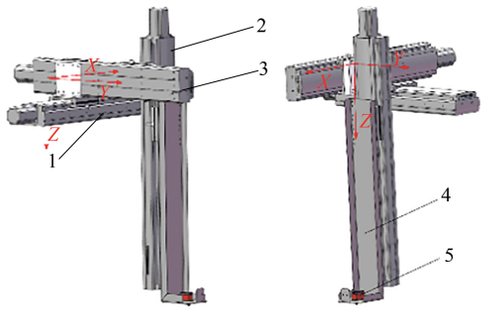


图11 采摘机械臂结构图

Fig. 11 Structural diagrams of picking robotic arm

1. X轴直线模组 2. Z轴直线模组 3. Y轴直线模组 4. 机械臂连接件 5. 舵机

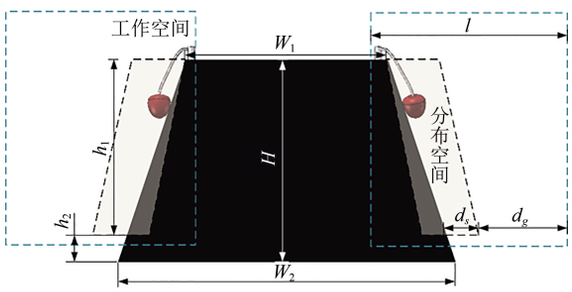


图12 草莓分布示意图

Fig. 12 Strawberry distribution diagram

根据第1节中的上垄面宽度W_1、下垄面宽度W_2和垄高H的数据，可计算出X轴行程d_x应大于250 mm。而Z轴行程d_z应该大于垄度H，因此机械臂Z轴行程至少为500 mm。最终完成对机械臂各自由度运动参数的确定，如表3所示。

表3 机械臂运动参数

Tab. 3 Mechanical arm motion parameters

自由度	传动方式	运动范围
X轴	滚珠丝杠直线模组	0~300 mm
Y轴	滚珠丝杠直线模组	0~400 mm
Z轴	滚珠丝杠直线模组	0~700 mm
旋转轴	数字舵机	0°~180°

1.5 机械手模块设计

为了便于采摘机器人的硬件系统集成以及空间布局的设计，本文将机械手采用模块化设计。机械手模块三维模型如图13所示，主要由机械臂、连接件和末端执行器组成。连接件的一端与机械臂的舵盘相连，另一端用于末端执行器的固定。

草莓成熟后通常分布在垄的两侧坡面上，果梗呈一定角度倾斜而并未垂直向下。采摘时，末端执行器的最优采摘姿态应与垄坡面垂直。因此，末端执行器与连接件之间采用可机械调节的固定方式，如图14a~14c所示。末端执行器的安装角度可以根据不同的种植农艺来进行调整，提高了末端执行器的适用性。末端执行器通过连接件与舵盘及机械臂的旋转轴相连，在舵机的驱动下进行摆动，如图14d、14f所示。

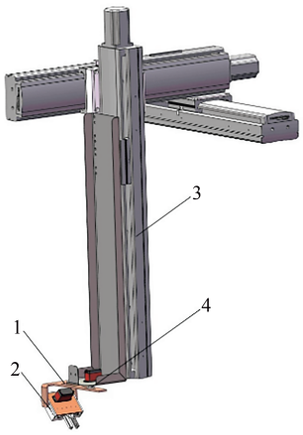


图13 采摘机械手模块三维模型

Fig. 13 3D model of picking robot module

1. 末端执行器连接件 2. 末端执行器 3. 机械臂 4. 舵盘

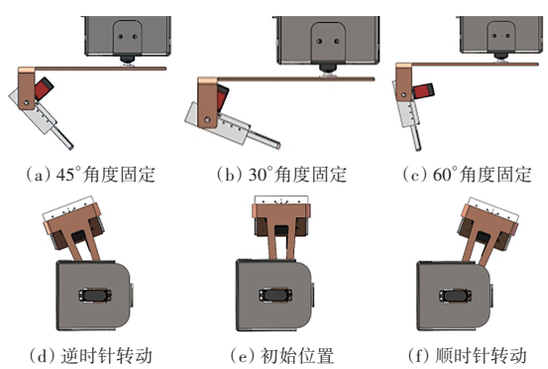


图14 末端执行器不同安装角度与运动示意图

Fig. 14 Schematic diagram of different installation angles and movements of end effectors

当草莓果梗姿态角度偏大时，可能会导致末端执行器采摘失败，如图15a所示。此时可以通过旋转轴调整末端执行器的姿态，提高采摘的成功率，如图15b所示。当姿态角度较小时，对末端执行器的采摘成功率影响较小。因此，综合考虑果梗直径、夹指宽度、夹指高度和定位误差等因素，仅当果梗姿态角大于45°时，进行末端执行器姿态调整，提高采摘效率。

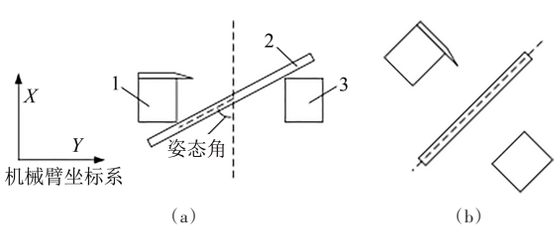


图15 果梗剪切姿态示意图

Fig. 15 Schematic diagram of cutting posture of fruit stem

1. 左夹指 2. 果梗 3. 右夹指

机械手模块工作流程如图16所示，首先进行机械臂X、Y轴方向移动，然后根据果梗姿态角判断是否需要进行旋转轴转动，随后，机械臂沿Y与Z轴方向移动，带动末端执行器到达果梗位置处完成采摘，并进行旋转轴复位。最后，机械臂移动至收集筐上方，末端执行器夹指

张开，完成草莓收集。

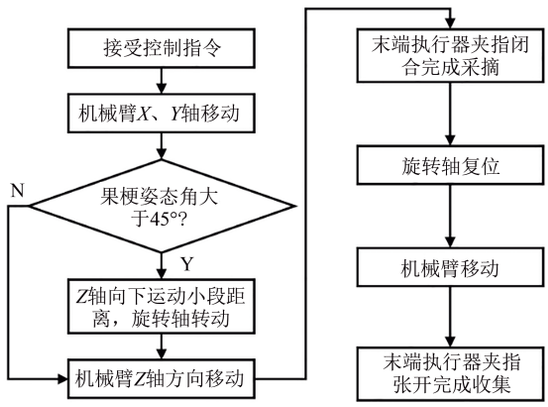
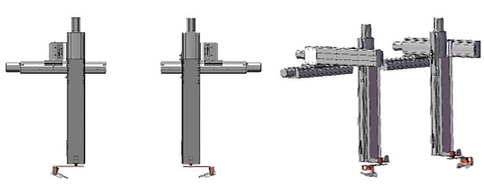


图 16　机械手模块控制流程

Fig. 16　Control process of robotic arm module

根据图 12 中草莓生长分布可知，草莓主要分布在垄的两侧坡面上。若采用单一机械臂的工作方式，需要机械臂首先完成一侧草莓的采摘后再移动至另一侧继续工作，这不可避免地会产生大量无效移动，从而降低采摘效率。因此本文设计的采摘机器人上搭载 2 组机械臂，双机械臂空间布局如图 17 所示。2 组机械手模块沿 X 轴并排布置，结构组成完全相同，两套机械臂上各自由度结构对称布局，分别负责垄的两侧草莓的采摘与收集。这种布局充分利用机械臂自由度，提升了作业效率，更符合草莓采摘机器人作业需求。



（a）正视图　　（b）侧视图

图 17　双机械臂空间布局

Fig. 17　Dual robotic arm spatial layout

通过结合两套机械手模块的空间布局设计与机械臂各个自由度的行程，能够进一步获取机械手工作范围，如图 18 所示。可以看到采摘机械手的工作范围能够覆盖草莓的分布空间，并留有足够的收集区域。虽然草莓垄的部分区域未在两套机械手模块的工作范围中，但该区域主要分布的是草莓植株本体，基本没有草莓果实，因此本文确定的双机械臂布局可满足草莓采摘需求。

2　草莓检测模型与采摘点定位方法

2.1　草莓目标与关键点联合检测模型

本文设计的末端执行器采用剪切草莓果梗的方式进行采摘，草莓果实与果梗的信息对于采摘机器人视觉系统都十分重要。因此，对草莓果实与果梗上关键点检测模型进行研究。

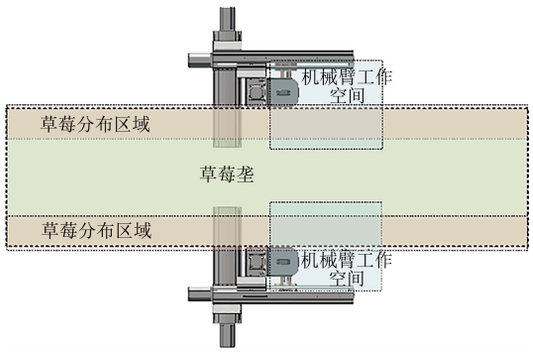


图 18　机械臂工作空间示意图

Fig. 18　Schematic diagram of working space of robotic arm

草莓果梗上采摘点定为关键点 3，这是末端执行器执行剪切动作的关键位置。为获取果梗的姿态信息，草莓果实与果梗的连接处定为关键点 2，这有助于机器人准确判断剪切的角度。相比于检测框，通过关键信息可以更加精准、有效地表征果梗的信息，提高视觉系统的精度，进而提高采摘成功率。由于自然果园环境中常出现枝叶遮挡以及果实相互遮挡的现象，果梗的位置通常位于果实的上方，容易被遮挡，导致果梗上关键点不可见。因此，为了提升视觉系统鲁棒性，本文引入第 3 个关键点，位置设定在草莓果实的尾端，即关键点 1。该点的选取有助于在果梗被遮挡时，对果梗的姿态进行估计，并对采摘点进行有效补偿。综合考虑，最终设计 3 个关键点，如图 19 所示，以实现更精确的采摘点定位和果梗姿态估计。

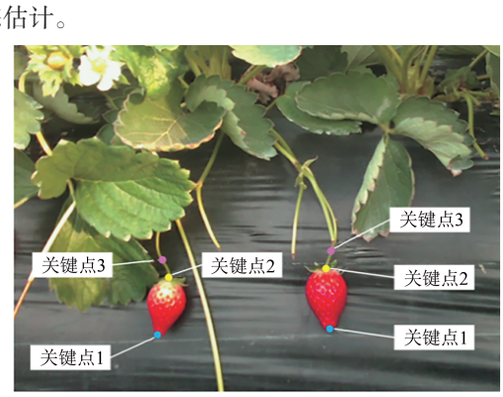


图 19　草莓关键点设计策略

Fig. 19　Strawberry keypoint design strategy

对复杂环境下草莓识别算法开展研究，提出基于改进 YOLO v8-Pose 的目标与关键点联合检测的草莓果梗辨识算法。通过关键点回归，可以基于点云处理等算法实时获取草莓及其果柄的姿态信息。这些关键点的位置信息对于精确控制夹爪的采摘力度至关重要。机器人可以根据关键点的位置和角度，调整夹爪的姿态，以实现精确的草莓采摘。检测流程如图 20 所示。首先通过数据采集以及预处理操作，构建草莓数据集，选用 Intel RealSense L515 相机进行拍摄，共获得垄作草莓数据集图像 3 262 幅。用 Labelme 软件对成熟草莓果实的检测框与关键点进行标注，最终将标注好的数据集按比

例8∶2分配为训练集和验证集，其中训练集图像数量为2 610幅，验证集为652幅。采用实例分割算法YOLO v8-Seg对草莓垄面进行分割，增加草莓识别度，之后使用改进的YOLO v8-Pose模型实现对成熟草莓准确识别。

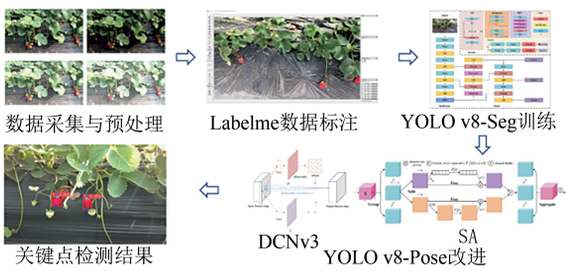


图20 基于YOLO v8-Pose的草莓果柄关键点检测流程图

Fig. 20 Flowchart of strawberry stem keypoint detection based on YOLO v8-Pose

2.2 RGB图像与深度图配准及点云数据获取

根据草莓种植农艺特点以及采摘机器人的定位精度要求，结合深度相机将获取的RGB图像与深度图像进行对齐，合成所需的点云数据。完成执行系统的手眼标定，获取从相机坐标系到机械臂坐标系的转换矩阵。实现草莓采摘点的精准定位。

RealSense L515相机可以同时获取到彩色帧和深度帧。彩色帧提供每个像素点RGB颜色数据，而深度图像帧则储存每个像素深度信息。相机捕获的彩色帧和深度帧分辨率均设置为640像素×480像素。由于L515相机彩色摄像头和深度传感器坐标系相互独立，采集到的彩色图像RGB信息与深度信息存在位置的偏差。因此为了生成精确的点云数据，必须先进行彩色图像与深度图像的配准对齐，确保彩色信息与深度信息之间正确对应。

彩色图像与深度图像的配准对齐本质是坐标系之间的转换，其中涉及到像素坐标系与世界坐标系的变换。根据相机成像原理，可获得图像坐标系到世界坐标系转换关系式

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{T} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$Z_c\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{M}\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{K}$——相机内部参数

$\boldsymbol{M}$——外参矩阵

f_x、f_y——沿图像x轴和y轴焦距

c_x、c_y——主点在图像平面上x、y坐标

$\boldsymbol{R}$——旋转矩阵

$\boldsymbol{T}$——平移向量

(X_w, Y_w, Z_w)——转换后三维坐标

由上述分析可知，在进行RGB图像与深度图像对齐时涉及到相机的内参。由于Intel公司在L515相机出厂时已经完成对相机的内参标定，因此可以直接通过官方RealSense SDK中的“get_intrinsics”函数进行相机内参的获取。通过相机内部参数，可以获得彩色摄像头和深度传感器内参矩阵为

$$\begin{cases} \boldsymbol{K}_{rgb}=\begin{bmatrix} f_{x_{rgb}} & 0 & c_{x_{rgb}} \\ 0 & f_{y_{rgb}} & c_{y_{rgb}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{K}_{depth}=\begin{bmatrix} f_{x_{depth}} & 0 & c_{x_{depth}} \\ 0 & f_{y_{depth}} & c_{y_{depth}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{6}$$

在RGB图像与深度图像对齐场景下，世界坐标系和相机坐标重合，因此旋转矩阵$\boldsymbol{R}$、平移向量$\boldsymbol{T}$和相机外部参数矩阵$\boldsymbol{M}$可表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

由此，式(5)可进一步表示为

$$Z_c\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

因此，图像像素坐标系中点$P_{rgb}(u_{rgb}, v_{rgb})$转换到世界坐标系中三维点$P_{wrgb}(x_{rgb}, y_{rgb}, z_{rgb})$，二者之间的转换关系式可表示为

$$z_{rgb}\begin{bmatrix} u_{rgb} \\ v_{rgb} \\ 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} f_{x_{rgb}} & 0 & c_{x_{rgb}} & 0 \\ 0 & f_{y_{rgb}} & c_{y_{rgb}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_{rgb} \\ y_{rgb} \\ z_{rgb} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

式(10)可进一步简化为

$$\boldsymbol{Z}_{c_{rgb}}\boldsymbol{P}_{rgb}=\boldsymbol{H}_{rgb}\boldsymbol{P}_{wrgh} \tag{11}$$

同理，可得到深度传感器坐标系下转换关系式为

$$\boldsymbol{Z}_{cdepth}\boldsymbol{P}_{depth}=\boldsymbol{H}_{depth}\boldsymbol{P}_{wdepth} \tag{12}$$

彩色图像与深度图像对齐通常有两种方式：一种是以彩色图像为基准，深度图像的每个像素会被映射或变换到彩色图像的坐标空间，深度图像将被调整以匹配彩色图像的视角和尺寸；另一种是以深度图像为基准，彩色图像的每个像素被映射到深度图像的坐标空间，彩色图像将根据深度图的视角和尺寸进行调整。采用第2种方式，将深度坐标系下点映射到彩色传感器坐标中，映射公式为

$$\boldsymbol{P}_{wrgb}=\boldsymbol{R}\,\boldsymbol{P}_{wdepth}+\boldsymbol{T} \tag{13}$$

对于RealSense L515相机，深度和彩色两个传感器坐标系之间转换的外部参数（即旋转矩阵$\boldsymbol{R}$和平移矩阵$\boldsymbol{T}$），可以通过RealSense SDK中提供的“rs2_get_extrinsics”函数来进行获取。

2.2.1　彩色点云数据生成

彩色点云数据包含像素点颜色信息与三维坐标，是机器人实现采摘点精准三维定位和果梗姿态估计的基础。为进一步获取点云数据，需将深度数据进行坐标变换，其原理是图像坐标下的二维像素点映射到三维的世界坐标系下。深度数据到点云数据转换关系式为

$$\begin{cases} x_w = z_c \dfrac{u - u_0}{f_x} \\ y_w = \dfrac{v - v_0}{f_y} \\ z_w = z_c \end{cases} \tag{14}$$

式中　(u,v)——图像坐标系下像素坐标

(u_0,v_0)——深度相机主点坐标

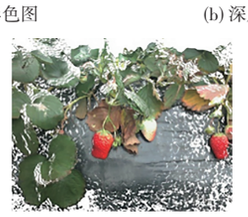
f_x、f_y——RealSense L515相机焦距

z_c——深度图像深度

将相机的内参参数和像素坐标代入式（14）中，即可获取每个像素点世界坐标系下的三维坐标，结合彩色帧中的每个像素对应的颜色信息，即可获取彩色点云数据，如图21所示。



(a) 彩色图　　(b) 深度图



(c) 点云图

图21　点云图合成结果

Fig. 21　Point cloud synthesis result

2.2.2　手眼标定

获取点云数据后，应进行手眼标定，通过求解出相机坐标系到机械臂基底坐标系或者末端执行器坐标系之间的转换关系，求得一个描述从相机坐标系到机器人手臂坐标系的旋转和平移的变换矩阵。对于本文的草莓采摘机器人，采摘机械臂相当于是“手”，而RealSense L515相机相当于“眼”。按照相机安装的位置不同，手眼标定又分为两种情况：一种是手在眼上，即相机安装的位置在机器人的机械臂上，随着机械手的运动而运动；另一种是手在眼外，即相机安装在机械臂外，与机械手的基座位置相对固定。设计的采摘执行系统中，相机固定安装在机械臂之外，因此本文选择手在眼外的标定方式。手眼标定主要步骤包括：首先，准备一张标定板，将标定板固定在相机的视场内，同时保证标定板上的9个点在机械臂上的末端执行器工作范围内；通过Intel RealSense Viewer获取9个点在相机坐标系下的三维坐标，如图22所示；在机械臂的旋转轴上安装标定针，控制机械臂带动标定针到达标定板上的9个点，并记录每个点在机械臂基座坐标系下的三维坐标；最后通过SVD分解法求解两组三维坐标之间的转换旋转矩阵和平移矩阵。

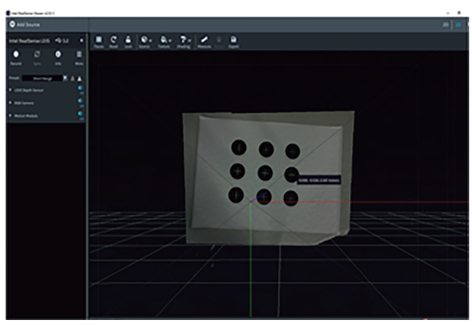


图22　RGB-D相机坐标读取

Fig. 22　RGB-D camera coordinate reading

将RGB-D相机和机械臂坐标系下两组点集记为$P=\{p_1,p_2,\cdots,p_i,\cdots,p_n\}$和$Q=\{q_1,q_2,\cdots,q_i,\cdots,q_n\}$。首先，计算点集$P$、$Q$重心，计算公式为

$$\begin{cases} \overline{P} = \dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n} p_i \\ \overline{Q} = \dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n} q_i \end{cases} \tag{15}$$

然后，将两个点集P、Q减去重心，获得2组新的点集$X=\{x_0,x_1,\cdots,x_i,\cdots,x_n\}$和$Y=\{y_0,y_1,\cdots,y_i,\cdots,y_n\}$。

$$\begin{cases} x_i = p_i - \overline{P} \\ y_i = q_i - \overline{Q} \end{cases} \quad (i = 0,1,2,\cdots,n) \tag{16}$$

计算两组新点集之间的协方差矩阵$\boldsymbol{H}$为

$$\boldsymbol{H} = \sum_{i=1}^{n} y_i x_i^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

对协方差矩阵$\boldsymbol{H}$进行奇异值分解

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{U}\sum\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

进一步计算旋转矩阵$\boldsymbol{R}$与平移矩阵$\boldsymbol{t}$

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{V}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \det\left(\boldsymbol{V}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\right) \end{bmatrix}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{t} = \overline{P} - \boldsymbol{R}\,\overline{Q} \tag{20}$$

最终，通过SVD分解法得到相机坐标系到采摘机器人机械臂坐标系的变换矩阵

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

获取转换矩阵$\boldsymbol{T}$后，根据末端执行器的安装位置以及旋转轴的旋转角度，可以进一步计算出机械臂X、Y、Z轴所需要运动距离。

2.3 采摘点定位与姿态角计算

本文通过改进的YOLO v8网络模型，能够准确地获取草莓果实的目标检测矩形框位置信息，以及3个关键点的二维像素坐标信息。本文将模型预测的关键点3（KP3）作为草莓的二维采摘点，如图23所示。



图23 采摘点定位

Fig. 23 Location of picking point

获得采摘点在图像上的二维坐标(u_3,v_3)后，采摘点三维坐标可通过点云图获取。经过彩色图与深度图对齐后的点云图数据，与彩色图上的像素位置一一对应。因此，可通过采摘点二维像素坐标(u_3,v_3)与点云图的宽度w_p获取采摘点在点云图中对应的索引i，计算式为

$$i=v_3w_p+u_3 \tag{22}$$

获取采摘点在深度相机中的三维坐标后，通过手眼标定得到变换矩阵，可以进一步计算得采摘点在机械臂坐标系下三维坐标(x_3,y_3,z_3)。

机械手执行采摘时，机械臂旋转轴角度调整需要结合果梗姿态。但不同视角下果梗姿态角会出现差异，为确定末端执行器旋转角，在机械臂坐标系下计算果梗姿态角，如图24所示。

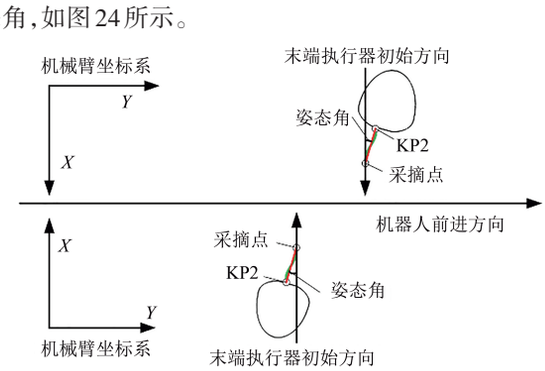


图24 果梗姿态角示意图

Fig. 24 Schematic of fruit stem posture angle

两个机械臂坐标系沿机器人前进方向对称，以机器人前进方向右侧机械臂坐标系为例，果梗姿态角θ计算公式为

$$\theta=\begin{cases}\arctan\dfrac{y_3-y_2}{x_3-x_2}\dfrac{180}{\pi} & (y_2<y_3)\\ \arctan\dfrac{y_2-y_3}{x_3-x_2}\dfrac{180}{\pi} & (y_2>y_3)\end{cases} \tag{23}$$

式中 (x_2,y_2)、(x_3,y_3)——点KP2和采摘点在机械臂坐标系下坐标

3 草莓采摘试验

3.1 试验方法

为验证双臂草莓采摘机器人性能，于2023年12月—2024年1月在浙江省杭州市建德市西乡草莓园进行实地采摘试验。试验的草莓品种为“建德红”，试验环境如图25所示。



图25 草莓采摘机器人试验场景

Fig. 25 Experiment scene of strawberry picking robot

田间采摘试验主要评估双臂采摘执行系统的采摘成功率、单个果实采摘时间和采摘损伤率3个性能指标。在草莓果园中，选取14个不同的区域用于机器人采摘试验，分别统计各个区域内两套机械手各自工作空间内，无遮挡和部分遮挡的成熟草莓数量。开始采摘后，记录下两套机械手各自完成采摘的时间、成功采摘以及存在损伤的数量。采摘流程如图26所示。

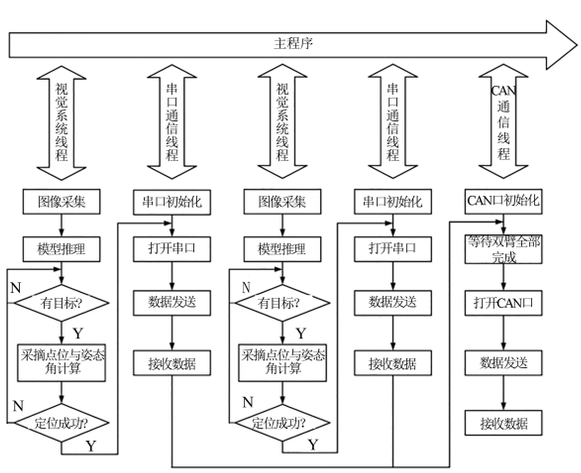


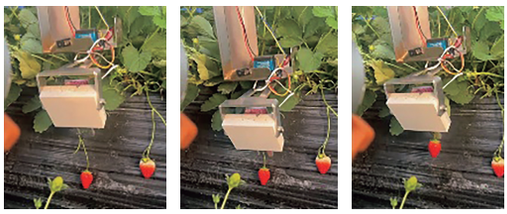
图26 多线程工作流程图

Fig. 26 Multi threaded workflow diagram

采摘损伤率定义为损伤个数与成功采摘草莓总数的比例。损伤主要包括以下两种情况：采摘过程中末端执行器对目标或非目标果实表面造成损伤；将非成熟与成熟果实一并采摘。而一并采摘叶片情况，不计入损伤个数。

3.2 试验结果与分析

机器人在实地场景下末端执行器采摘动作以及单机械臂工作过程如图27、28所示。首先，由算法计算并锁定草莓果梗位置，如图27a所示，接着，末端执行器移动至成熟草莓的果梗上方，如图27b所示。然后，夹指闭合剪断并夹持住果梗，实现采摘草莓的动作，如图27c所示。最后，末端执行器移动至收集筐，夹指张开，草莓进



(a)　(b)　(c)

图 27　末端执行器采摘过程

Fig. 27　End-effector picking process



图 28　单机械臂采摘过程(局部视角)

Fig. 28　Picking process of single robotic arm(local perspective)

入框中完成收集,其采摘局部视角如图 28 所示。双机械臂联合采摘时,两组机械臂相互独立,完成各自工作区域采摘与收集工作,如图 29 所示。



图 29　双臂联动采摘过程

Fig. 29　Picking process with two arms

草莓采摘机器人采摘试验采摘成功率结果如表 4 所示。在无遮挡情况下草莓采摘成功率达到 85.4%,存在部分遮挡情况下成功率为 75.5%,采摘效果良好,能够较好地满足自然环境下成熟草莓的采摘。

在试验过程中存在一些草莓未被成功采摘,分析其原因主要有:

(1)在大棚环境下,太阳光会照射到草莓垄面,不仅会导致草莓果实表面出现曝光现象,影响检测草莓,同时也会影响相机的深度数据,导致深度信息不准确,进而导致草莓采摘失败。

(2)在实际果园环境下,草莓果梗容易出现遮挡,影响了采摘点定位的精度,同时,在某些场景下,草莓植株叶片出现在机械臂的采摘路径上,末端执行器在采摘过程中难免会触碰到,进而使得果实位置发生移动,导致采摘失败。

表 4　采摘成功率统计结果

Tab. 4　Results of successful picking ratio

区域编号	遮挡类型	数量	机械手(左)			机械手(右)			整体成功率/%
			草莓数量	成功采摘数	成功率/%	草莓数量	成功采摘数	成功率/%	
1~7	无遮挡	21	11	10	90.9	10	9	90.0	90.5
	部分遮挡	29	12	8	66.7	17	13	76.5	72.4
8~14	无遮挡	27	14	11	78.6	13	11	84.6	81.5
	部分遮挡	24	13	10	76.9	11	9	81.8	79.2
总计	无遮挡	48	25	21	84.0	23	20	86.9	85.4
	部分遮挡	53	25	18	72.0	28	22	78.6	75.5

机器人采摘耗时统计结果如表 5 所示。在试验过程中,成功采摘草莓果实 81 个,两组机械臂耗时总计为 1 012 s,单组机械臂完成单个草莓平均采摘时间为 12.5 s。

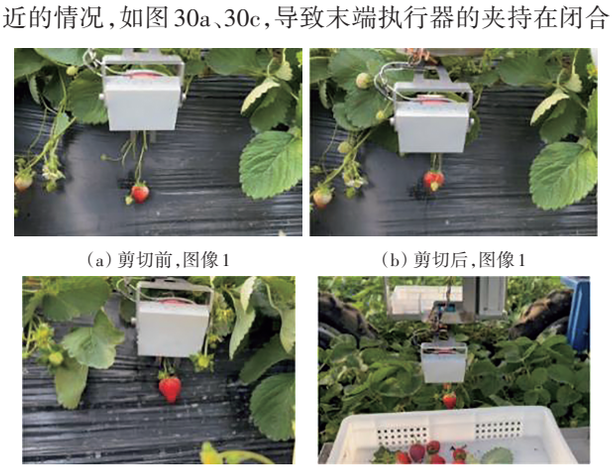
表 5　采摘耗时统计结果

Tab. 5　Statistical results of picking time

区域编号	成熟草莓数	采摘成功数	双臂采摘总耗时/s	单果采摘耗时/s
1	7	5	59	11.8
2	8	7	87	12.4
3	6	5	67	13.4
4	7	5	64	12.8
5	10	8	104	13.0
6	4	4	45	11.3
7	8	6	72	12.0
8	9	8	113	14.1
9	5	5	58	11.6
10	9	5	61	12.2
11	7	7	78	11.1
12	5	4	45	11.2
13	6	5	71	14.2
14	10	7	88	12.6
总计	101	81	1 012	12.5

采摘损伤率统计结果显示,实际可采摘草莓为 101 个,在成功采摘 81 个草莓中,存在或造成损伤个数为 15 个,损伤率为 18.5%。

通过分析损伤的样本,其主要是由于在自然果园环境中,成熟与未成熟草莓混杂,存在果梗彼此分布非常近的情况,如图 30a、30c,导致末端执行器的夹持在闭合



(a) 剪切前,图像 1　(b) 剪切后,图像 1

(c) 剪切前,图像 2　(d) 剪切后,图像 2

图 30　采摘损伤场景

Fig. 30　Picking damage scene

时会将其一并剪切,造成了非目标果实的损伤。

综合实地场景下试验结果表明,设计的双臂草莓采摘机器人可以满足大棚中垄作草莓采摘要求。

4 结论

(1)设计了一种适用于垄作草莓的双臂采摘机器人,该系统由高地隙移动底盘、双臂采摘执行系统、视觉检测系统组成,主要实现大棚中垄作草莓果实识别与定位以及剪切夹持一体化采摘的功能。

(2)结合垄作草莓形态特征和力学特性分析,设计了一种剪切-夹持一体式采摘末端执行器,减少采摘过程对草莓的损伤。

(3)提出了基于改进YOLO v8-Pose的目标与关键点联合检测的草莓果梗辨识算法,结合关键点与点云处理实现对草莓果柄姿态获取和采摘点定位。

(4)双臂采摘机器人在实地草莓大棚中采摘草莓试验结果表明:在果梗处无遮挡情况下采摘成功率达到85.4%,存在部分遮挡时采摘成功率为75.5%,采摘单个草莓平均耗时为12.5 s,损伤率为18.5%,采摘效果良好,满足大棚中垄作草莓采摘要求。

参 考 文 献

[1] CUI Y, NAGATA M, GUO F, et al. Study on strawberry harvesting robot using machine vision for strawberry grown on annual hill top (Part 2): Ripeness judgment and recognition of peduncle using picking camera, and fabrication of the picking hand[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2007, 69(2): 60-68.

[2] FENG Q, WANG X, WANG G, et al. Design and test of tomatoes harvesting robot[C]//2015 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2015.

[3] 赵敬, 王全有, 褚幼晖, 等. 农业采摘机器人发展分析及前景展望[J]. 农机使用与维修, 2023(6): 63-70.
ZHAO Jing, WANG Quanyou, CHU Youhui, et al. Analysis of the development of agricultural picking robots and prospects[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2023(6): 63-70. (in Chinese)

[4] 张芸, 柏文军. 草莓高产种植技术研究[J]. 农业开发与装备, 2020(10): 213-214.
ZHANG Yun, BO Wenjun. Research on high yield planting techniques for strawberries[J]. Agricultural Development & Equipments, 2020(10): 213-214. (in Chinese)

[5] XIONG Y, GE Y, GRIMSTAD L, et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation[J]. Journal of Robotic Systems, 2020, 37(2): 202-224.

[6] DE PRETER A, ANTHONIS J, DE BAERDEMAEKER J. Development of a robot for harvesting strawberries[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 14-19.

[7] TRINIDAD J B. Machine for automatically harvesting fruits cultivated in rows[P]. 2018-06-07.

[8] 汉永乾, 孙步功, 张鹏, 等. 农业采摘机器人研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(4): 4-8.
HAN Yongqian, SUN Bugong, ZHANG Peng, et al. Research progress of agricultural picking robot [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(4): 4-8. (in Chinese)

[9] 隗朋峻. 温室环境下高架栽培草莓采摘机器人的关键技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
WEI Pengjun. Key technology research on strawberry picking robot in greenhouse environment under elevated cultivation[D]. Beijing: North China University of Technology, 2023. (in Chinese)

[10] 冯青春, 郑文刚, 姜凯, 等. 高架栽培草莓采摘机器人系统设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(7): 122-126.
FENG Qingchun, ZHENG Wengang, JIANG Kai, et al. Design of strawberry harvesting robot on tab-top culture [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(7): 122-126. (in Chinese)

[11] 张曼. 草莓采摘机器人远-近景组合视觉系统设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
ZHANG Man. Design of distant-close view vision system for strawberry picking robot [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[12] 张曼, 徐瑞峰, 冯青春, 等. 单驱双夹式草莓末端执行器设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(6): 93-97, 103.
ZHANG Man, XU Ruifeng, FENG Qingchun, et al. Design of single-drive dual-clip strawberry end effector [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 93-97, 103. (in Chinese)

[13] 凌轩, 刘江涛, 梁超越, 等. 智能草莓采摘机器人设计及试验[J]. 现代农业装备, 2021, 42(1): 46-50.
LING Xuan, LIU Jiangtao, LIANG Chaoyue, et al. Desigh and experiment of intelligant strawberry picking robot[J]. Modern Agricultural Equipments, 2021, 42(1): 46-50. (in Chinese)

[14] 陈俊丞. 基于ROS的智能草莓采摘机器人设计[D]. 南充: 西华师范大学, 2022.
CHEN Juncheng. Design of intelligent strawberry picking robot based on ROS[D]. Nanchong: China West Normal University, 2022. (in Chinese)

[15] 王粮局, 张铁中, 褚佳, 等. 大容差高效草莓采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 252-258.
WANG Liangju, ZHANG Tiezhong, CHU Jia, et al. An efficient strawberry harvesting end-effector with large misalignment tolerance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 252-258. (in Chinese)

(下转第50页)

Image Processing, 2020, 30: 1169-1179.
[19] XU Z, WU D, YU C, et al. SCTNet: single-branch CNN with transformer semantic information for real-time segmentation[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2024:6378 - 6386.
[20] FAN M, LAI S, HUANG J, et al. Rethinking BiSeNet for real-time semantic segmentation[C] //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2021: 9716 - 9725.
[21] HONG Y, PAN H, SUN W, et al. Deep Dual-resolution Networks for real-time and accurate semantic segmentation of road scenes [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 24(3): 3448 - 3460..
[22] XU J, XIONG Z, BHATTACHARYYA S P. PIDNet: a real-time semantic segmentation network inspired by PID controllers[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023: 19529 - 19539.
[23] 李秀智, 方会敏, 朱玉垒, 等. 基于语义分割网络的植保机器人视觉伺服控制方法[J]. 农业机械学报,2024, 55(5): 21 - 27, 39.
LI Xiuzhi, FANG Huimin, ZHU Yulei, et al. Visual servo control of plant protection robot based on semantic segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(5):21 - 27, 39.(in Chinese)
[24] 毕松, 王宇豪. 果园机器人视觉导航行间位姿估计与果树目标定位方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8):16 - 26,39.
BI Song, WANG Yuhao. Inter-line pose estimation and fruit tree location method for orchard robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):16 - 26, 39.(in Chinese)
[25] 周学成, 肖明玮, 梁英凯, 等. 基于改进DeepLabv3+的火龙果园视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 35 - 43.
ZHOU Xuecheng, XIAO Mingwei, LIANG Yingkai, SHANG Fengnan, CHEN Qiao, LUO Chendi.Navigation Path recognition between dragon orchard using improved DeepLabv3+ Network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 35 - 43.(in Chinese)

(上接第40页)

[16] 黎梦婷, 陈霖, 王键, 等. 柑橘采摘软体末端执行器的设计与试验[J]. 河北农业大学学报, 2024, 47(1): 122 - 131.
LI Mengting, CHEN Lin, WANG Jian, et al. Design and experiment of citrus harvesting software end-effector[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2024, 47(1): 122 - 131. (in Chinese)
[17] XIONG Y, FROM P J, ISLER V. Design and evaluation of a novel cable-driven gripper with perception capabilities for strawberry picking robots[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018: 7384 - 7391.
[18] 李娜, 王家忠, 张建宝, 等.一种刚柔混联欠驱动草莓采摘机械手设计[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(1): 118 - 121.
LI Na, WANG Jiazhong, ZHANG Jianbao, et al. Design of underactuated strawberry harvesting manipulator with rigid-compliant structured[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2015, 38(1): 118 - 121. (in Chinese)
[19] 闫勇, 陈立夫, 郭坤坤, 等. Lab色彩模型下梯度Hough圆变换的成熟草莓识别[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(3): 488 - 493.
YAN Yong, CHEN Lifu, GUO Kunkun, et al. Ripe strawberry recognition based on gradient Hough circle transform in Lab color model [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(3): 488 - 493. (in Chinese)
[20] YAMAMOTO S, HAYASHI S, YOSHIDA H, et al. Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2014, 48(3): 261 - 269.
[21] HAYASHI S, YAMAMOTO S, SAITO S, et al. Field operation of a movable strawberry-harvesting robot using a travel platform[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2014, 48(3): 307 - 316.
[22] 金林华, 柳凯玲, 邹家正, 等. 基于YOLOv4的草莓目标检测技术研究[J]. 现代农业科技, 2023(1): 119 - 122.
JIN Linhua, LIU Kailing, ZOU Jiazheng, et al. Study on strawberry target detection technology based on YOLOv4 [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(1): 119 - 122. (in Chinese)
[23] ZHANG F, GAO J, ZHOU H, et al. Three-dimensional pose detection method based on keypoints detection network for tomato bunch[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106824.