doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.003

温室番茄采摘机器人伸缩式机械臂设计与试验

王亚薇[1,2]　何津立[1,2]　林熙淼[1,2]　陆文武[1]　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. 浙江省种植装备技术重点实验室，杭州 310018；3. 全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018；4. 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）

摘要：针对番茄采摘环境复杂、可移动空间小等问题，设计了一种适用于宽沟窄畦温室种植模式下高效率采摘的番茄自主采摘机器人。采摘机器人的执行机构由四自由度伸缩机械臂、多位姿腕关节及三指扭转采摘末端手构成。通过分析番茄的生长情况和作业环境，设计了一种绳排式可伸缩移动关节，减少伸缩机构的尺寸。针对实际番茄采摘时的动作，采用三指式扭转采摘末端执行器，增加多位姿腕关节实现多位姿多方位的扭转采摘。采摘控制系统基于ROS集成采摘、规划等策略，控制机械臂完成采摘功能。基于宽沟窄畦种植模式下番茄温室的可移动空间，设计了一款四转四驱移动底盘，可实现在番茄种植垄间的移动和转向。研制了番茄采摘机器人样机，在番茄设施温室中进行了实地采摘试验，果实采摘成功率达到88.7%，采摘周期时间为13.4 s/个，具有较高的采摘作业效率和采摘成功率，满足温室番茄采摘要求。

关键词：番茄；采摘机器人；伸缩式机械臂；温室；宽沟窄畦种植模式

中图分类号：S225.92　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S1-0018-11

Design and Experiment of Tomato Picking Robot Based on Telescopic Robotic Arm

WANG Yawei[1,2]　HE Jinli[1,2]　LIN Ximiao[1,2]　LU Wenwu[1]　MA Zenghong[1,3]　DU Xiaoqiang[1]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*
4. *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*)

Abstract: The development of intelligent agriculture is the future trend in the agricultural field, and the development of intelligent harvesting equipment is a key issue in promoting the transformation and upgrading of the farming industry. Given the complexity of the tomato picking environment, small mobile space, and other issues, an autonomous tomato picking robot suitable for high-efficiency picking under the wide trench and narrow ridge greenhouse planting mode was designed. The actuator of the picking robot consisted of a four-degree-of-freedom telescopic robotic arm, a multi-positional wrist joint, and a three-finger twisting picking end hand. By analyzing the growth of tomatoes and the operating environment, a rope-row type of retractable mobile joint was designed to reduce the size of the retractable mechanism. For the actual tomato picking action, a three-finger twist picking end-effector was used, and a multi-position wrist joint was added to achieve multi-position multi-directional twist picking. The picking control system was based on ROS-integrated picking, planning, and other strategies to control the robotic arm to complete the picking function. Based on the movable space of tomato greenhouses under the planting mode of wide trench and narrow ridge, a four-rotation and four-wheel-drive mobile chassis was designed, which can realize the movement and steering between tomato planting rows. Finally, a prototype tomato-picking robot was developed, and a field picking test was carried out in a greenhouse, and the fruit-picking success rate reached more than 85%, and the picking cycle time was 13.4s, which had a high picking operation efficiency and picking success rate, and met the requirements of tomato picking in greenhouses.

Key words: tomatoes; picking robot; telescopic robotic arm; greenhouse; wide trench narrow ridge cultivation mode

收稿日期：2024－07－20　修回日期：2024－09－20

基金项目：浙江省自然科学基金重大项目(LD24E050006)

作者简介：王亚薇(2000—)，女，硕士生，主要从事农业机器人研究，E-mail: 1138427411@qq.com

通信作者：杜小强(1978—)，男，教授，博士，主要从事智能农业装备研究，E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

0　引言

我国是目前世界上番茄种植面积最大的国家[1]。番茄以其丰富的营养价值广受欢迎，种植面积及产量逐年上升。但目前国内番茄采摘仍以人工为主，用工整体老龄化，同时设施温室环境作业强度大，机械化水平低，采摘效率低[2-4]。

人工采摘成本的增加促进了采摘机器人的研究。美国华盛顿州立大学的DAVIDSON等[5]开发了一款6自由度机械臂和三指末端执行器的苹果采摘机器人，该机器人通过3D相机获取果实坐标信息，在实验室环境下，果实的采摘成功率为56%。江苏大学赵德安团队[6]同中国农业机械化科学研究院张小超团队合作开发了一款5自由度的苹果采摘机器人，具有整体升降和小臂伸缩功能，在实验室条件下的抓取成功率为80%，采摘周期为15 s。针对丘陵果园地形环境，鲍秀兰等[7]设计了一种可以自适应调平平台的柑橘采摘机器人，结合剪切夹持一体化的末端执行器降低果实的损伤。国外率先开展了对番茄采摘机器人的研究，第一台番茄采摘机器人由美国研制[8]。国内高校和研究中心对番茄采摘机器人的研究起步较晚，冯青春、梁喜凤、刘继展等团队[9-15]相继开展了对番茄采摘机器人的研究，构建的番茄采摘机器人样机多采用工业机械臂进行采摘试验。

近年来，随着技术的发展，国内外针对番茄采摘机器人进行了进一步的研究。针对日光温室番茄采摘，于丰华等[16]设计并制作了一台可以实现巡检、采摘、收集的番茄采摘机器人。李兴旭等[17]采用四轴协作机械臂，基于级联视觉检测流程搭建机器人系统，实现了在日光温室场景中的检测、采摘试验。SU等[18]设计了一种应用于番茄棚架栽培生长环境的温室番茄采摘底盘，具有较好的路径巡航功能和定位精度。为了降低采摘过程中对果柄和主茎的损伤，ZHENG等[19]提出了一种嵌套采摘的方法，应用于番茄采摘机器人系统，采摘周期时间为14.9 s。

由于视觉技术的限制，传统的检测方法针对果实遮挡的番茄目标识别准确率不高，从而导致机器人的采摘成功率下降。随着深度学习的研究深入，被广泛应用于果蔬识别中。HU等[20]提出了一种结合深度学习和边缘轮廓检测的成熟番茄检测方法，用来区分开重叠的番茄。为了检测植物上高遮挡的未成熟番茄，MU等[21]使用深度学习模型自动检测得到完整的绿色番茄，检测的平均精度达到了87.83%。张勤等[22]提出了一种基于实例分割的番茄串视觉定位与采摘姿态估算方法，实现果梗姿态识别和采摘点精准定位，并基于果梗姿态确定末端执行器的采摘姿态，提高番茄采摘成功率。

本文针对宽沟窄畦种植模式下的番茄生长环境，同时为了满足采摘机器人在田间的高效作业效率，设计了一种可在该环境中移动和自主采摘的番茄采摘机器人。该机器人的采摘机械结构基于伸缩式机械臂和多自由度末端执行器，底盘结构根据种植农艺特点设计尺寸，采用四轮独转独驱的电力驱动方式。

1　采摘机器人机械系统设计

1.1　采摘作业环境分析

传统的温室番茄种植主要采用宽畦窄沟、双行种植的栽培模式，不利于进行机械化作业。宽沟窄畦栽培模式可以改善植株外部光照条件和通风条件，降低病害发生率，提高番茄精品果的质量，通过番茄采摘的机械化作业，可提高劳动效率[23]。为了方便农机采摘作业，同时减少人为机械损伤，试验在浙江省温州市苍南县直勇阳光农场宽沟窄畦种植模式下的温室番茄中进行，目前该农场番茄采摘方式均采用人工采摘。温室内栽培畦上底宽60 cm，下底宽80 cm，行与行之间的垄间距为90 cm，采用单行种植。此外，番茄之间的株距为40 cm，番茄植株平均高度180 cm，番茄的主要生长范围为30~120 cm，番茄栽培模式如图1所示。两种模式下温室番茄栽培模式数据如表1所示。



图1　宽沟窄畦栽培模式

Fig. 1　Wide furrow and narrow bed cultivation pattern

表1　温室番茄不同栽培模式

Tab. 1　Different cultivation patterns of greenhouse tomatoes

栽培模式	栽培畦宽/cm		沟宽/cm	株距/cm	种植方式
	上底	下底			
宽畦窄沟	60	80	90	40	单行种植
宽沟窄畦	90	110	40	45	双行种植

如表1所示，宽沟窄畦栽培模式下温室番茄垄间区域相较于传统栽培模式下垄间距扩大50 cm，可以满足小型的移动底盘在垄间行走。针对温室番茄这种果实空间密集分布、垄间间距狭窄的特点，采摘机器人一般采用行走-检测-停止-采摘的方式进行果实采摘，这就要求机械臂有很大的作业空间，且具有较小尺寸结构，多级伸缩的结构为机器人采摘提供了更多的可能。

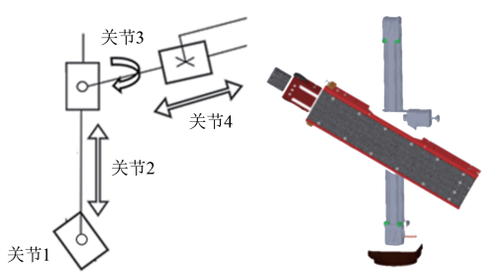
1.2　伸缩式机械臂

1.2.1　工作原理

采摘机器人多采用通用型工业机械臂，这种通用型

工业机械臂会影响机器人、操作环境和拾取对象之间的协调，也会带来操作和维护方面的缺点[24]。在满足工作空间的情况下，通用型工业机械臂存在结构庞大、难以轻量化等问题。SASIADEK[25]提出的伸缩式机械手具有结构紧凑、重量轻的优点，在温室番茄生长环境中有着明显的优势。ARIKAPUDI等[26]提出了一种伸缩式机械手来实现线性水果可达性，但其复杂的结构和缓慢的运动限制了其在水果采摘领域的应用。此外，在这些情况下，有效负载、工作空间和控制并没有针对果园应用进行全面优化。

针对采摘作业环境中番茄果实的分布范围、垄间空间小等情况，机械臂设计需要满足大工作空间、小体积及轻量化等要求。本文设计了一种4自由度的伸缩式采摘机械臂，包括2个旋转关节与2个平移关节，可以控制机械臂到达目标预采摘点的位置，如图2所示。为了满足采摘要求，本文将关节1和关节3设置为旋转关节，扩大机械臂在X轴和Y轴方向上的运动空间，以此来采摘不同高度和范围下的番茄果实，同时有助于果实的收集工作。旋转关节3的设计实现了在不扩大移动关节2和移动关节4的条件下提升机械臂高度行程，同时受到工作空间的限制，关节4需采用多级伸缩结构以满足大行程、小体积的要求。



(a) 关节示意图 (b) 三维模型

图2 伸缩式机械臂关节

Fig. 2 Schematics of joints of telescopic robotic arm

伸缩轴的作用是能够快速地移动末端抓手到指定位置进行抓取，实现番茄采摘收集工作，从而提高机械臂作业效率。宽沟窄畦栽培模式下的温室番茄生长范围较大，采用普通单级伸缩型机械臂难以满足要求，末端关节振动问题更会大大影响机械臂定位精度。为实现高效稳定运行，伸缩关节需要结构简单、控制方便、重量轻、体积小、行程大等特点。绳排式伸缩机构控制简单、成本低，能够体现最佳的轻量化和紧凑的设计方案。因此，机械臂伸缩关节采用绳排式三级同步伸缩结构方案，相比单级的伸缩机构能够提升采摘速度，缩小伸缩臂的体积。图3为本文设计的绳排式多级同步伸缩机构原理图。为实现高精度与高速的伸缩运动，使用同步带替代绳索阵列，同步伸缩臂主要由3级臂组成，结构相对液压驱动更加小巧，中间不存在液压缸，在缩小体积的同时更加容易实现轻量化设计，使得结构更加稳固。

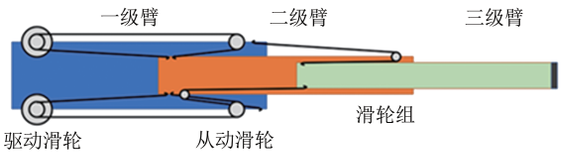
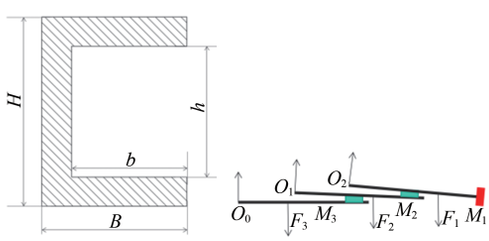


图3 同步带绳排多级同步伸缩机构原理图

Fig. 3 Schematic of synchronous belt rope row multi-stage synchronous expansion mechanism

1.2.2 伸缩臂关节尺寸确定

由于伸缩轴完全伸缩时整体为悬臂梁结构，其末端的变形与截面形状、尺寸都有较大的影响。为使得伸缩轴整体更加轻盈且具有可靠的稳定性，材质采用碳纤维板。同时，为了保证机械臂整体的运动精度，其末端精度应控制在0.5 mm内，其两级伸缩末端挠度应在±0.5 mm内。番茄平均质量为0.5 kg，为了防止机械臂与番茄枝干发生碰撞，将末端受力设置为100 N，最终根据以上设计要求对材料截面宽度以及厚度进行计算求解。将各级截面近似为槽型截面，如图4所示。



(a) 槽型截面示意图 (b) 伸缩关节变形

图4 截面与关节变形

Fig. 4 Cross-sectional and joint deformation

截面惯性矩计算式为

$$I_x = \frac{BH^3 - bh^3}{12} \tag{1}$$

式中 I_x——截面惯性矩

B——截面外部宽度

H——截面外部高度

b——截面内部宽度

h——截面内部高度

三级臂需完全缩进入二级臂内部，同时二级臂需能收入至一级臂内部，各级臂之间均取上级臂宽度、厚度的0.8倍。计算以二级臂为起点，由

$$I_x = \frac{BH^3 - (B - t)(H - 2t)^3}{12} \tag{2}$$

可得

$$I_{x3} = 0.409\,6I_{x2} \tag{3}$$

式中 t——截面厚度

I_{x3}——三级臂截面惯性矩

I_{x2}——二级臂截面惯性矩

两级臂完全伸出时其变形量为

$$\delta = \frac{F_1 L_1^3}{3EI_1} + \frac{F_2 L_2^3}{3EI_2} \tag{4}$$

式中 δ——变形量

F_1——一级臂受到的力

L_1——一级臂长度
F_2——二级臂受到的力
L_2——二级臂长度
E——杨氏模量
I_1——一级臂截面惯性矩

由于两级伸缩结构存在，作用在二级臂上的力矩与一级臂相关，一级臂固定点位于中点处，为方便计算将其简化成简支梁集中力矩至连接点。

$$F_1=\frac{0.64G\rho L_2\left[HB-(B-t)(H-2t)\right]\left(\frac{L_2+2L_1+L}{2}\right)+F_2\left(\frac{2L_2+2L_1+L}{2}\right)}{0.5L+L_1} \tag{5}$$

式中　L——三级臂长度　G——重力
ρ——伸缩臂密度

表2为已知参数。将已知参数代入式(4)可得总变形量与截面参数关系式为

根据末端负载初步优化各级槽型宽度B、高度H、厚度t以最小化末端变形量。

$$\delta=\frac{576(2Bt+tH-2t^2)+20.8}{1.725\times10^{10}\left[BH^3-(B-t)(H-2t)^3\right]}+\frac{6.4}{7.065\,6\times10^{9}\left[BH^3-(B-t)(H-2t)^3\right]} \tag{6}$$

表2　伸缩关节参数

Tab. 2　Parameters of telescopic joint

参数	g/(m·s^{-2})	ρ/(kg·m^{-3})	L_1/mm	L_2/mm	L/mm	F_2/N	E/GPa
数值	9.8	2700	400	400	500	20	69

在Matlab中进行优化求解，将δ关于t与B的图像在Matlab中进行绘制，根据图5a可知截面的厚度与宽度对末端的挠度都会产生较大的影响，其结果并非是正相关的，因此选取挠度在0.5 mm范围内的B、t作为设计初值，编写Matlab程序求出在当前挠度范围内的质量最小值，结果如图5b所示。

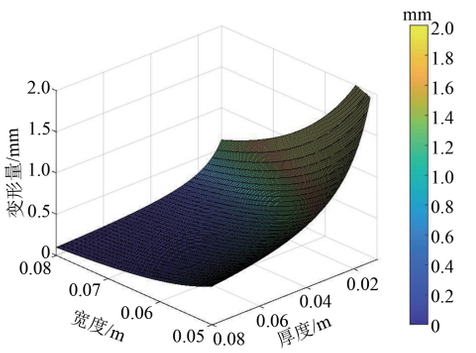
根据计算结果即可得到二级臂尺寸参数，如表3所示。其截面宽度与高度选取0.065 m，厚度选取0.003 m。三级臂尺寸参数为二级臂0.8倍，其宽度与高度选取为0.050 m，厚度也保持不变。基座关节同样按照0.8倍标准进行计算，截面宽度与高度为0.085 m，厚度为0.004 m。一、二、三级臂长度分别为0.5、0.4、0.4 m。

1.3　三自由度末端执行器设计

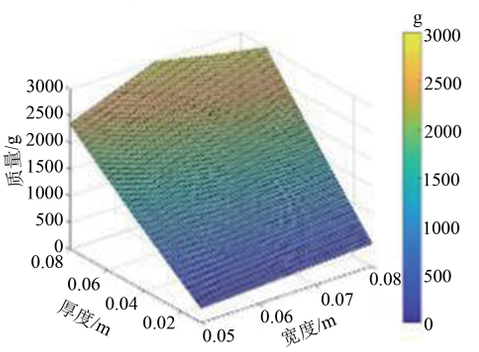
采摘机器人末端执行器是机器人提高工作效率和采摘成功率的关键。HOHIMER等[27]设计了一款气动式柔性末端执行器，能够有效避免水果损伤，分离成功率达到67%。为了使末端执行器适应不同水果，LU等[28]设计了3种不同几何形状的末端执行器，并实验发现直型末端执行器性能最好，采摘成功率最高。三指抓取的末端执行器可以减少果实损伤率，适应不同大小和形状果实[29-30]。

无损抓取目标果实是农业采摘机器人推广应用的关键之一，采摘机械臂抓取的对象是果实，因此末端执行器既要满足不损伤采摘对象也要在采摘过程中牢牢抓住果实。即使是标准化种植的番茄，其果实的生长姿态也各不相同，水平靠近进行抓取时抓手受力不同，受力大的地方很容易在成熟的番茄内部产生瘀伤，最终导致整个番茄的溃烂。通过对番茄果实生长姿态进行识别，设计姿态可调的末端执行器沿果实生长方向进行抓取采摘，能够有效减少抓取过程中各手指之间的受力不均。同时，番茄果梗连接较硬，姿态可调的末端执行器在抓取过程中可以沿果柄垂直方向进行旋转，更加有利于果实的脱落，也不会对果实造成过大的损伤。因此，采用一种三自由度腕关节末端执行器(图6)，采用3个舵机串联方式实现腕关节三自由度采摘姿态变化，使采摘末端手能够实现大幅度的姿态调整，以适应识别到的各种果实采摘姿态来提高果实的采摘成功率。在具体的采摘过程中，可以根据相机获得的果实的位置线由机械臂将腕关节末端执行器送达果实预采摘点附近，再根据获得的果实姿态进行腕关节姿态调整实施采摘，具有结构紧凑和灵活的优点。

三指节驱动绳的连接方式种类较多，采用并联的连



(a) 变形量关于厚度和宽度的响应面



(b) 质量关于厚度与宽度的响应面

图5　变形量与质量关系曲面

Fig. 5　Deformation-mass relationship

表3　二级臂参数计算结果

Tab. 3　Calculated results

参数	B/m	T/m	M/g	δ/m
数值	0.063 8	0.002 6	716.379 6	0.502 7

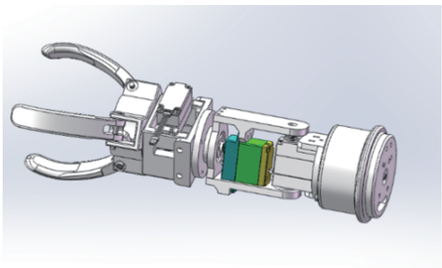
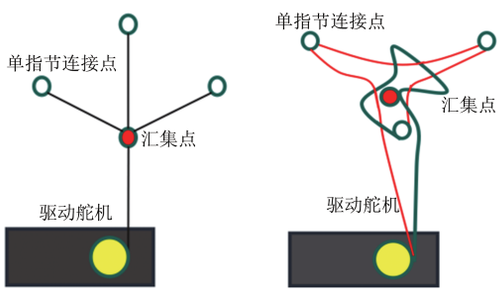


图6 三自由度采摘末端执行器

Fig. 6 Three-degree-of-freedom picking end-effector

接方式，其绳子在长时间运行后易磨损，且并联方式三指节只能同步运行。因此，本文设计了一种单绳串联的方式，一根尼龙绳连接3个指节与驱动器，每个指节相互连接，同时又存在有一定的运动余量。如图7b所示，当红色起点与绿色终点环绕一圈后拉紧，驱动绳将自动汇集于汇集点并保持形状，各个指节件相互独立且具有一定的连接。图8为优化设计的末端夹爪实物图，通过固定在驱动电机的旋转带动绳索的运动以控制3个指节的抓取和松开。



(a) 并联型 (b) 串联型

图7 多指节驱动绳连接方式

Fig. 7 Multi-knuckle drive rope connection

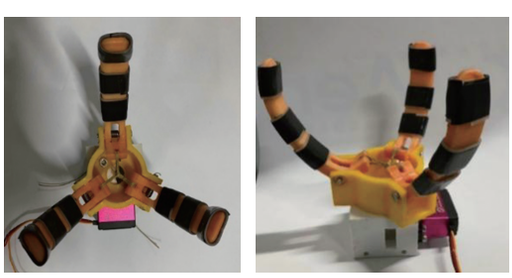


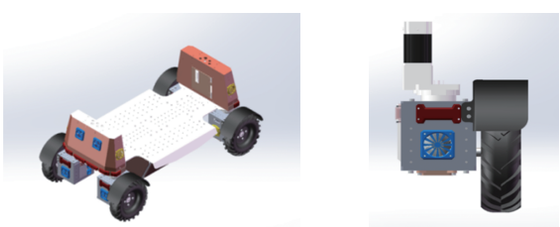
图8 多指节夹爪

Fig. 8 Multi-jointed jaws

夹爪闭合由驱动舵机进行控制，采用扭簧使夹爪在张开夹爪后自动复位，保证了末端夹爪开口大小与开口的一致性。

1.4 底盘设计

在底盘结构设计方面，传统的前转后驱阿克曼转向底盘转弯半径较大，难以在狭窄的温室大棚内实现转向、换垄等操作。考虑到大棚番茄空间狭窄，采用四轮独转独驱的动力系统，提高行走、转向控制的灵活性，也减小转向半径。通过调研宽沟窄畦栽培模式种植农艺，实地测量垄宽、垄间距、种植高度等农艺参数，确定移动底盘的基本尺寸大小。整个底盘系统主要由轮组、电池组、控制系统组成。一个轮组通过两个电机分别控制轮子的前进和转向，8个伺服电机支持每个轮组独立高精度控制，实现底盘运动自由、运动灵活、承载力强等特点，底盘结构如图9a所示。控制系统分别集成在车头和车尾部分。电池组模块集成在整个底盘底部中间位置，便于给整个机器人其余系统供电。在底盘上预留多排安装孔位，以便之后二次开发和升级。轮组结构如图9b所示，采用模块化设计，通过旋转平台的安装孔位将轮组和底盘连接。这种一体式的模块化设计便于整个轮组拆卸、更换和维护。机器人底盘尺寸为1 000 mm×600 mm×400 mm，轮距为550 mm，车体仅为120 kg。该底盘采用三元锂电池进行驱动，装配4个型号为MD60AIS113的驱动电机和4个MD57AIS77的转向电机，可以实现四轮独立驱动和转向的功能，同时配有自主刹车和防撞杆，适用于宽沟窄畦种植模式下狭小环境。



(a) 底盘装配轴测图 (b) 独立模块轮组

图9 底盘结构图

Fig. 9 Chassis structure diagrams

为了满足不同地形及工作环境下的灵活需求，设计多种转向模式(图10)。斜向行驶模式提升横向移动稳定性，原地转向模式方便窄距果园掉头，四轮转向模式实现减小转弯半径。原地转向模式根据4个转向轮组均可360°转动，根据底盘轮组至整体质心距离计算轮组转动至轮胎轴线的延长线交叉于底盘的几何中心，即可实现原地转向。



图10 不同转向模式示意图

Fig. 10 Schematic of different steering modes

2 采摘机器人视觉与控制系统设计

2.1 视觉识别与定位系统

温室番茄多呈簇状生长，每串数量为3~5个，果实生长密集且彼此相互粘连，不同果实的生长姿态千变万化。基于番茄的生长特性，本文基于卷积神经网络和点云处理技术实现设施温室种植模式下番茄果实的识别与检测，具体过程包括图像采集、番茄目标检测、RGB-D信息融合和点云处理获取番茄果实位姿(图11)。

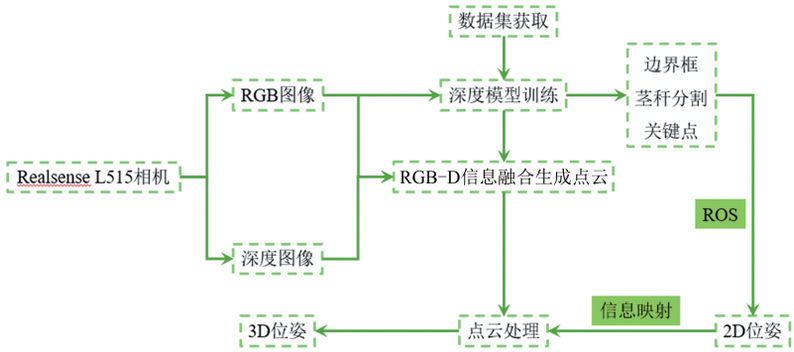
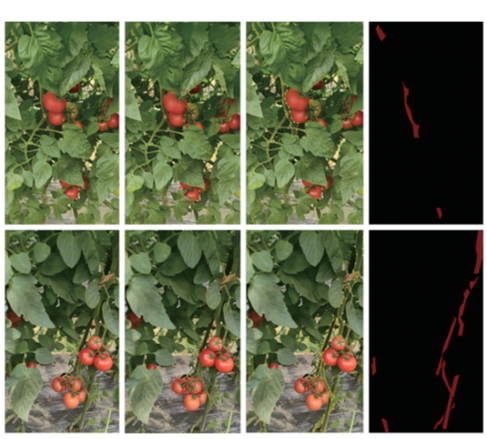


图 11　番茄果实识别与检测技术路线图

Fig. 11　Technical route of tomato fruit identification and detection

2.1.1　数据集构建

Realsense L515 相机配备有 RGB 传感器和深度传感器，可以获取到高质量的彩色和深度图像，用于后续的图像处理和特征提取，最终实现目标识别和定位。设施温室番茄的种植环境复杂，果实生长密集，同簇果实的成熟度不同，面临着识别难的问题。番茄采摘机器人需要实现在一个深度模型中完成果实三维位姿和障碍物快速准确识别。为了提高果实位姿识别精度，本文构建了复杂温室背景下关键点和语义分割数据集，如图 12 所示。图 12a 为原始图像，图 12b 为制作的用关键点和边界框标注的关键点数据集，图 12c 为标注主茎掩模的语义分割数据集，图 12d 为最终获得的掩模标签。其中，若番茄花萼可见，花萼中心被标记为关键点；若因番茄姿态花萼不可见，关键点标记花萼与果轴交界处；若花萼或交界处因遮挡不可见，则不标记关键点。由于机器人与番茄植株的主茎碰撞容易导致采摘失败，并对机械臂造成损坏，因此本文将番茄植株的主茎进行分割，制作为语义分割数据集。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 12　番茄数据集制作过程

Fig. 12　Tomato dataset produced process

2.1.2　多任务卷积神经网络

番茄果实识别与检测是采摘机器人视觉系统中的关键部分。本文对复杂环境下的番茄目标位姿识别展开了研究，提出了一种多任务卷积神经网络，它可以在一个网络模型中同时完成番茄位姿检测和茎秆语义分割，实现采摘场景信息表征，通过融合多尺度特征并确定语义分割分支位置，提出 4 种语义分割分支添加策略，提高茎秆分割能力。

番茄果实识别算法采用端到端多任务卷积神经网络同时完成语义分割、目标定位和关键点检测任务。算法基于 YOLO v5s 网络进行改进，增加语义分割分支，目标检测和语义分割共享主干网络，并在边界框回归中加入关键点预测参数。YOLO-MCNN 架构如图 13 所示。

相比级联两个网络，此方法减少冗余计算，但带来两个问题：语义分割分支在网络中的哪一个位置进行添加能达到最佳效果；在同一个骨干网络上执行多个任务是否会影响网络的准确性。语义分割通过下采样提取目标特征以增大感受野，并通过上采样恢复图像分辨率便于分类。不同的语义分割策略如图 14 所示。YOLO v5s 主干网络对图像进行了 5 次下采样（C1-C5），分辨率为原图的 1/32。第 1 次下采样通过 Focus 模块，接下来 4 次通过 Conv 模块。Neck 部分完成了 2 次上采样，将分辨率恢复到 1/8。特征融合能够合并详细特征并增大感受野。浅层特征图适合检测小目标，深度特征图适合检测大目标。YOLO v5s 仅融合了 C3 和 C4 级别的特征。由于茎是小目标，融合浅层 C2 特征有利于提高分割能力，但增加计算量。YOLO v5s 的上采样达到原图的 1/8，添加语义分割的最佳位置是第 16 层 Concat 层或第 17 层 C3 模块。簇生番茄多任务卷积神经网络可视化结果如图 15 所示。

2.1.3　点云处理

点云处理模块由 6 部分组成：点云分割、体素下采样、去除异常值、欧氏颜色聚类、RANSAC 球面拟合、关键点索引。通过点云将获得番茄质心的 3D 位置和关键点的 3D 位置，可用于确定番茄果实的 3D 姿态。

本文采用深度相机实时获取采摘环境的彩色图信息和深度图信息，将彩色图和深度图像生成点云图像进行分割处理。经过训练，输入一幅彩色图模型会输出番茄目标边界框和果实关键点。将边界框、关键点的二维信息映射到点云图上分割出番茄果实目标，达到减少点云数量的目的，从而加快点云处理时间。由于番茄果实形状为扁球型，花萼部分点云对 RANSAC 球拟合番茄果

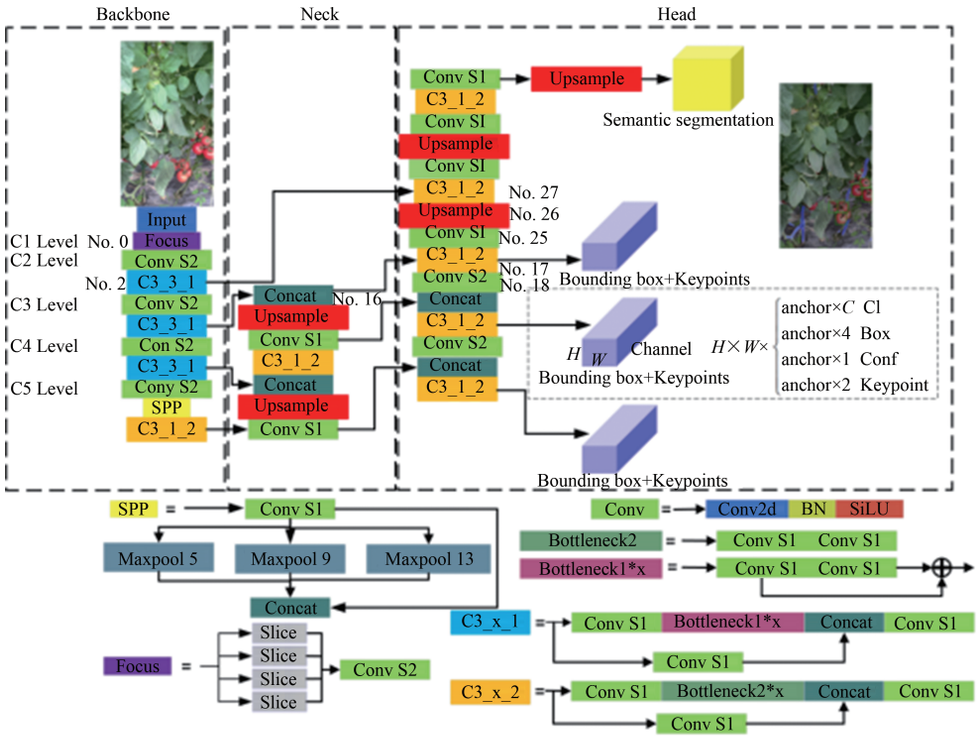


图13 多任务卷积神经网络架构

Fig. 13 Multi-task convolutional neural network architecture

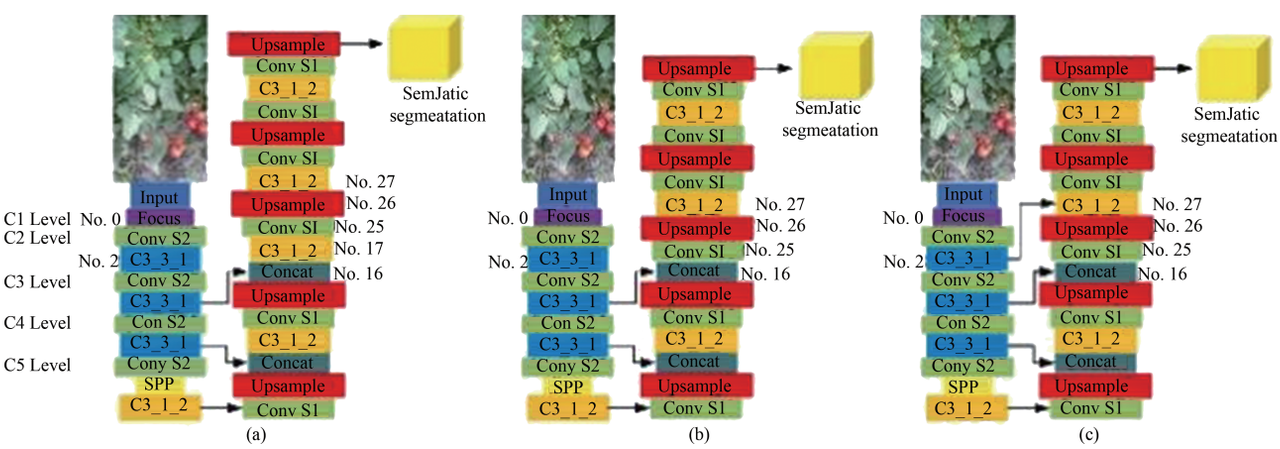


图14 不同的语义分割分支策略

Fig. 14 Different branching strategies for semantic segmentation



图15 簇生番茄多任务卷积神经网络可视化

Fig. 15 Multi-task convolutional neural network visualization of cluster tomatoes

实点云获取质心具有一定不利影响。番茄果实和花萼在颜色上有较大差距。通过颜色欧氏聚类可以将花萼与番茄果实分开。番茄果实点云去除花萼部分后更加类似球形,有利于获取更加准确的扁球体果实质心。深度模型提供的关键点为二维点,需要在点云图像中进行点云配准,但相机本身获取的点云容易缺失,所以需要进行关键点索引。索引到的关键点三维位置和RANSAC球拟合得到的番茄果实质心三维位置进行连接,最终获取到番茄果实位姿。点云处理过程的可视化结果如图16所示。

2.2 控制系统设计

2.2.1 机械臂控制与仿真

为了充分发挥机器人的综合性能,实现高效的采摘作业,采摘机器人的机械本体结构及其控制系统的匹配

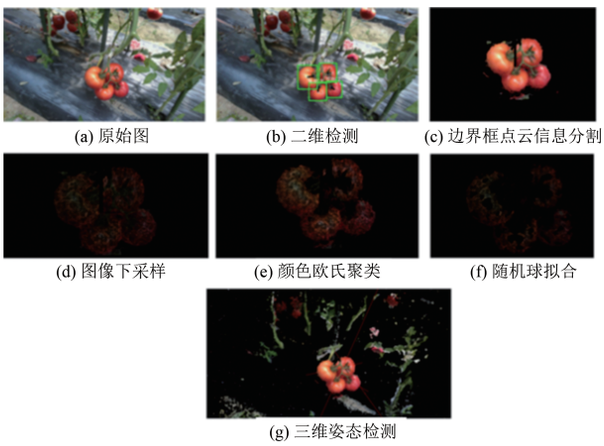


图 16　三维姿态检测可视化过程

Fig. 16　Visualisation of 3D pose detection

设计显得尤为关键。目前，机械臂控制系统主要依赖于4种核心技术方案：基于PC的控制解决方案、嵌入式系统方案、结合工控机与数据采集卡及运动控制器的高级方案，以及可靠的PLC控制系统。现有的几种机械臂控制系统大都只能根据给定的姿态进行重复的操作，难以实现自主规划的功能。而且，采摘机械臂的构型也多种多样，各个机械臂的系统也各不相同，很难通用，即使是同一种类型的机械臂控制系统，也会因为软件的迭代更新而产生冲突。传统的机械臂控制器难以进行二次开发。ROS在机械臂控制的可移植性与通用性上具有很大优势，内部具有机械臂运动规划功能，能够快速的进行软件的开发，同时还具有多个中调试与仿真工具，对于复杂的采摘运动规划具有非常大的优势。因此，机械臂控制系统由基于PC端上位机软件(ROS)集成。

上位机需要处理复杂算法、采集并长期存储数据，还需要提供图形化界面供用户操作。本文采用的上位机硬件是基于Ubuntu系统的个人计算机，配备有高性能的CPU、较大的内存和存储空间。作为控制系统中的核心部分，上位机与下位机之间可以通过各种通信接口进行数据交换。本文采用RS485串行端口的Modbus工业通信协议以实现与下位机的互联互通。上位机配有Windows 10和Ubuntu 20.04两个系统。首先在Windows系统下对控制机械臂和夹爪的电机及舵机进行调试安装，确定机械臂和夹爪的初始位置，保证Windows下机械臂与上位机之间的通讯顺畅。机械臂的自动运动控制主要是在上位机的Ubuntu系统下进行，借助MoveIt!在Rviz仿真环境下进行仿真测试(图17)，并实现真实机械臂运动控制。

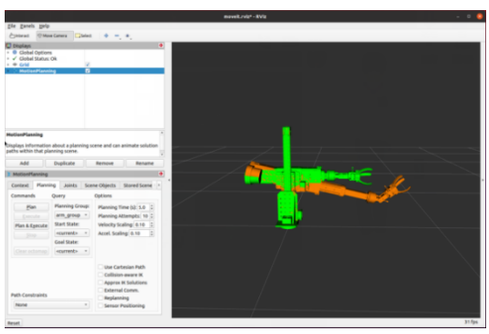


图 17　Rviz仿真环境

Fig. 17　Rviz simulation environment

将机械臂和夹爪的Solidworks模型导出配置成URDF模型，使用MoveIt!中的Setup Assistant工具生成配置文件并建立机器人ROS驱动，最终控制机器人进行自动采摘。相机获取到的图像经过视觉识别定位后得到采摘目标位置信息，在MoveIt!中完成运动规划并将关节轨迹发送到控制器中，电机驱动机械臂到达采摘位置，在这个过程中控制器将机械臂的实时状态反馈到MoveIt!中，Rviz动态显示当前状态。机械臂的采摘控制系统集成在ROS系统中，节点之间的通讯如图18所示。

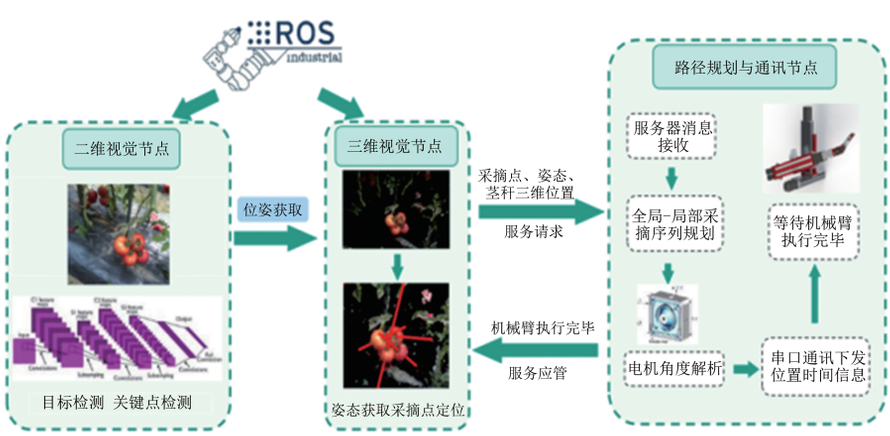


图 18　ROS系统节点架构

Fig. 18　ROS system node architecture

2.2.2　底盘控制系统

设计的四转四驱底盘通过Modbus控制8个电机实现底盘的运动，8个电机均可单独进行运动控制，其中4个转向电机采用位置控制，保证其转向时，电机驱动整体轮组转动角度的精确性。4个驱动电机采用速度控制，跟踪其速度变化设计模糊PID控制器，减小机器人速度误差。图19为底盘软件功能逻辑主要架构。

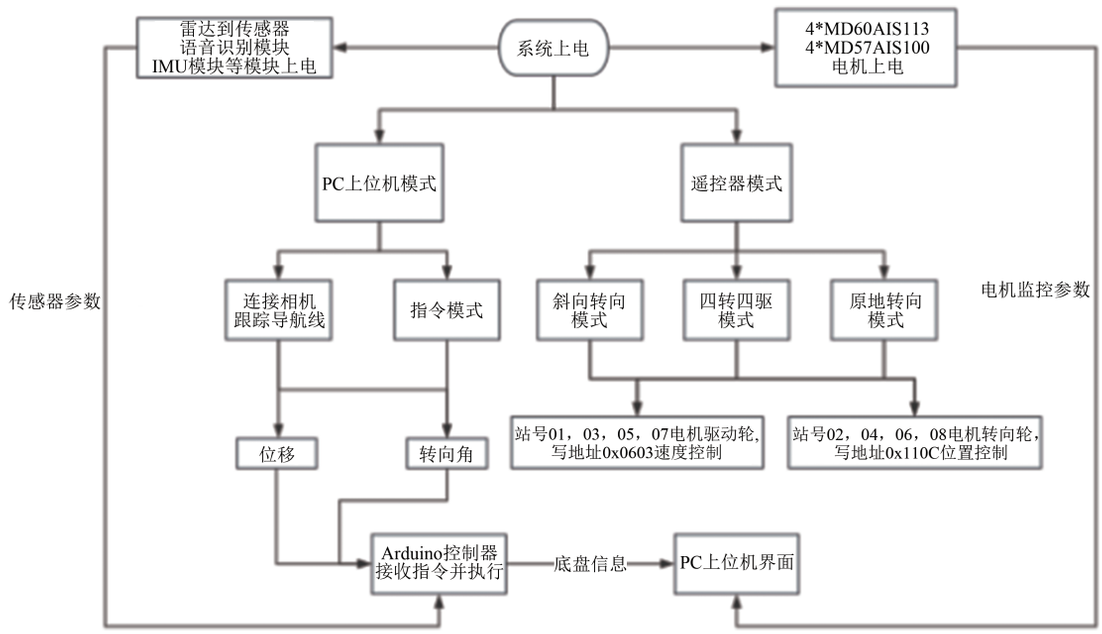


图19 底盘软件功能主要架构

Fig. 19 Main structure of chassis software functions

底盘控制的方式包括遥控模式和上位机模式。遥控模式下通过高低电平转换模块将接收到的不同遥控器信号转换为核心板所能识别的电平信号，执行运动控制指令。上位机控制模式下采用TCP通讯，执行控制指令的人机交互界面如图20所示，底盘各轮组独立控制并会将该模块的负载信息传递至上位机，实现操作人员对底盘状态的实时监控。

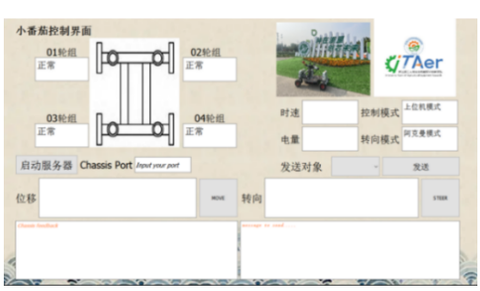


图20 上位机控制界面

Fig. 20 Upper computer control interface

本文设计的底盘采用4个独立的轮组经由4个独立的转向电机带动转向，其几何中心运动速度方向与前轮组转动角度相同。基于模糊PID控制将底盘横向速度、纵向速度、转动角度误差量和误差变化率作为输入量，由制定的模糊规则经过模糊化、模糊推理和解模糊输出相应的PID 3个比例修正参数，对整体控制增益进行实时调参，解决了传统PID不能实时调整的缺点。

3 番茄采摘试验

3.1 试验平台

搭建了果园环境下机器人样机试验平台，如图21所示，并进行了番茄采摘的试验。果实采摘测试的目的是评估机械臂在采摘水果时的表现，除了对成功或失败的收获进行评分外，该测试还应测量完成采摘任务所花费的时间。在进行试验测试时，环境适应性、识别精度、采摘效率、机械臂工作空间、导航系统和用户交互便利性是测试时的关键。



图21 番茄采摘机器人样机

Fig. 21 Tomato picking robot prototype

本文使用采摘成功率P_1、采摘时间t作为主要指标来评估采摘机器人的性能，分别表征采摘精度、速度。采摘成功率是指机械手在一定的次数内果实成功采收的概率。采摘时间是指从相机视觉定位开始到成功采集果实放置到采集筐并开始下一次视觉定位时的总时间。

如图22所示，采摘过程中有4个状态，Home为初始状态，在识别到果实后机械臂切换状态，进入靠近果实状态，机械臂运动至目标点。再次识别定位果实位置，进入采摘状态，机械臂抓取果实。抓取成功后进入返回状态，机械臂运行至放置点，完成放置任务后机械臂回到初始状态。完成一次循环。多个果实采摘进行多次循环。遇到特殊情况时由状态机切换机械臂运行状态，将复杂的问题进行分解，方便调试与控制。

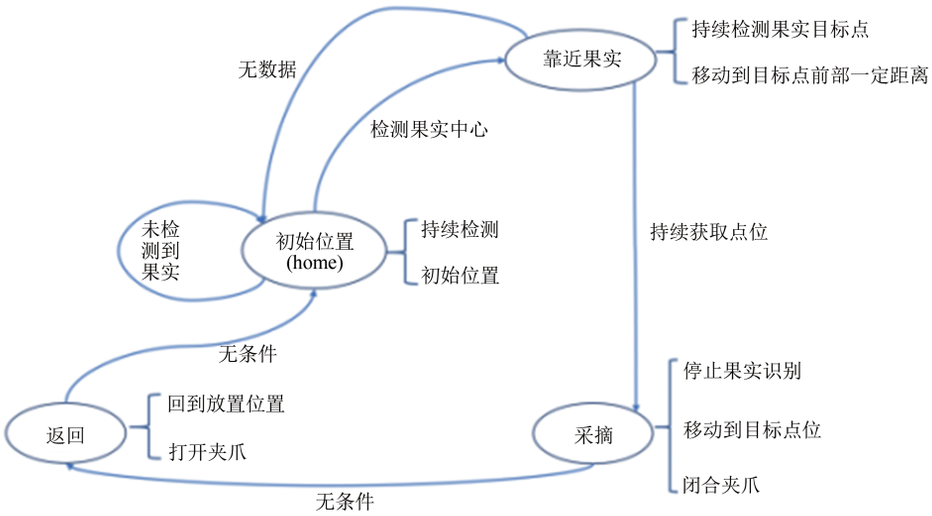


图 22　采摘流程图

Fig. 22　Picking flowchart

3.2　采摘试验结果与分析

机械臂运动流程包括接近目标、抓取果实、扭转采摘、移至收集点、打开夹爪、移至等待点等流程。以采摘第 1 个番茄目标为例，机械臂需要进行初始化位置来规范机械臂的后续控制；当机械臂接近目标时，根据识别到的果实位姿来调整末端手抓取的最佳位姿，并让机械臂移动到该目标点的预采摘位置；在预采摘位置的基础上以一个较慢的速度抓取番茄，以便最后的扭转采摘。最后一步的目的是为了减少其他障碍物（非当前采摘目标果实和枝干）的干扰。夹爪闭合之后的扭转以及拉拽两个动作同时进行来提高番茄的采摘成功率。伸缩式的绳驱机械臂保证了机械臂能够快速到达预采摘点，降低了采摘周期时间，从而提高整体采摘的作业效率。

在实际果园环境中进行了采摘试验，因为试验期间为番茄生长晚期，番茄植株上挂果少且果实体积过小，因此试验中在相机视觉视场中挂了 4~5 个的真实番茄并进行采摘试验，记录每次试验时果实的采摘成功率与采摘时间。视觉识别系统能够在 0.2 s 内完成果实姿态的识别与定位，番茄采摘机器人采摘试验的采摘成功率和平均采摘时间，番茄的采摘成功率达到了 85% 以上，果实采摘的平均采摘时间为 13.4 s/个，能够较好地满足宽沟窄畦栽培模式下番茄的采摘要求。为了验证设计底盘的通过性，本文在温室进行了行走试验。经测试，设计的底盘尺寸能够满足在垄沟内的稳定行驶，不会对种植的番茄植株造成损伤。

综合分析实际采摘环境下番茄采摘机器人的试验结果，本文研制的基于伸缩式机械臂的番茄采摘机器人可以满足宽沟窄畦栽培模式下温室番茄采摘要求。

4　结论

（1）针对果园可移动空间范围的特点，研制了一种适用于宽沟窄畦栽培模式的多自由度番茄采摘机器人，该系统由四转四驱移动底盘、四自由度采摘机械臂和三自由度的多位姿腕关节以及视觉检测识别系统组成，实现了在大棚中番茄的果实位姿识别与定位以及扭转采摘功能。

（2）为了提高番茄采摘作业效率，设计了一种四自由度采摘机械臂。该机械臂采用绳索驱动、同步带传输的方式实现机械臂工作范围扩大，并针对伸缩臂完全伸出时的悬臂梁结构进行分析，确定伸缩臂关节尺寸。

（3）为了提高番茄采摘成功率，设计了一种仿生多自由度腕关节的末端执行器，利用舵机串联的方式实现三自由度腕关节的多方位旋转和采摘末端手的多位姿多方位的扭转采摘，使得机器人可以适应更多的采摘姿态变化。

（4）根据实地农艺条件设计了一种轻巧灵活的移动底盘，转弯半径小，斜行换垄灵活，采用电动驱动方式独立驱动 4 个轮子进行移动。

（5）在番茄温室内进行了田间采摘试验，采摘周期时间为 13.4 s/个，采摘成功率达到 88.7%，可以满足采摘番茄要求。

参　考　文　献

[1]　熊征，李惠玲，侯露，等. 面向机器人采摘的樱桃番茄力学特性研究[J]. 现代农业装备，2020，41(3)：24－28.
XIONG Zheng, LI Huiling, HOU Lu, et al. Mechanical properties of cherry tomato for harvesting robot [J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(3): 24－28. (in Chinese)

[2]　王勇，刘群铭，史颖刚. 一种四自由度串联采摘机械臂系统设计[J]. 河南科技，2019(19)：27－29.

[3]　杨乐平，王加泽，朱宣任，等. 番茄采摘机器人模块化设计与分析 [J]. 中国科技论文，2023，18 (2)：215－223.
YANG Leping, WANG Jiaze, ZHU Xuanren, et al. Modular design and analysis of tomato harvesting robot [J]. China Sciencepaper,

2023, 18 (2): 215 - 223. (in Chinese)
[4] 邓秀新.中国水果产业供给侧改革与发展趋势[J].现代农业装备,2018(4):13 - 16.
[5] DAVIDON J R, SILWAL A, HOHIMER C J, et al. Proof-of-concept of a robotic apple harvester[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2016.
[6] CHEN X, CHAUDHARY K, TANAKA Y, et al. Reasoning - based vision recognition for agricultural humanoid robot toward tomato harvesting[C]//2015IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).IEEE,2015.
[7] 鲍秀兰,马志涛,马萧杰,等. 丘陵果园自然环境下柑橘采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55 (4): 124 - 135.
BAO Xiulan, MA Zhitao, MA Xiaojie, et al. Design and experiment of citrus picking robot in hilly orchard natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55 (4): 124 - 135. (in Chinese)
[8] 王傲雪. 番茄采摘机械手技术优化研究[D]. 长春: 吉林大学,2023.
WANG Aoxue. Optimizing study of tomato picking manipulator[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (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 test of tomatoes harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(4):94 - 98. (in Chinese)
[10] 梁喜凤,金超杞,倪梅娣,等. 番茄果实串采摘点位置信息获取与试验[J].农业工程学报,2018,34(16):163 - 169.
[11] 梁喜凤,章鑫宇,王永维.基于改进Mask R-CNN的番茄侧枝修剪点识别方法[J].农业工程学报,2022,38(23):112 - 121.
[12] 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)
[13] 徐灿,熊征,蒋先平,等. 串收番茄采摘机器人的设计与研究[J]. 现代农业装备, 2021, 42 (6): 15 - 23.
XU Can, XIONG Zheng, JIANG Xianping, et al. Design and research of the cluster tomato picking robot[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42 (6): 15 - 23. (in Chinese)
[14] 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)
[15] 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)
[16] 于丰华,周传琦,杨鑫,等. 日光温室番茄采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53 (1): 41 - 49.
YU Fenghua, ZHOU Chuanqi, YANG Xin, et al. Design and experiment of tomato picking robot in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (1): 41 - 49. (in Chinese)
[17] 李兴旭,陈雯柏,王一群,等. 基于级联视觉检测的樱桃番茄自动采收系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39 (1): 136 - 145.
[18] SU L, LIU R, LIU K, et al. Greenhouse tomato picking robot chassis[J]. Agriculture, 2023, 13(3): 532.
[19] ZHENG X, RONG J, ZHANG Z, et al. Fruit growing direction recognition and nesting grasping strategies for tomato harvesting robots[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(2): 300 - 313.
[20] HU C, LIU X, PAN Z, et al. Automatic detection of single ripe tomato on plant combining faster R-CNN and intuitionistic fuzzy set[J]. IEEE Access, 2019, 7: 154683 - 154696.
[21] MU Y, CHEN T S, NINOMIYA S, et al. Intact detection of highly occluded immature tomatoes on plants using deep learning techniques[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2984.
[22] 张勤,庞月生,李彬. 基于实例分割的番茄串视觉定位与采摘姿态估算方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54 (10): 205 - 215.
ZHANG Qin, PANG Yuesheng, LI Bin. Visual positioning and picking pose estimation of tomato clusters based on instance segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (10): 205 - 215. (in Chinese)
[23] 陈先知,苏世闻,雷大锋,等. 基于农机农艺融合的浙南设施番茄宽沟窄畦栽培模式研究[J]. 中国蔬菜, 2022(8): 73 - 77.
[24] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (9): 1 - 17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (9): 1 - 17. (in Chinese)
[25] SASIADEK J Z. Space robotics and manipulators—The past and the future[J]. Control Engineering Practice, 1994, 2(3): 491 - 497.
[26] ARIKAPUDI R, VOUGIOUKAS S G. Robotic tree-fruit harvesting with telescoping arms: a study of linear fruit reachability under geometric constraints[J]. IEEE Access, 2021, 9: 17114 - 17126.
[27] HOHIMER C J, WANG H, BHUSAL S, et al. Design and field evaluation of a robotic apple harvesting system with a 3D-printed soft-robotic end-effector[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 405 - 414.
[28] LU R, DICKINSON N, LAMMERS K, et al. Design and evaluation of end effectors for a vacuum-based robotic apple harvester[J]. Journal of the ASABE, 2022, 65(5): 963 - 974.
[29] LI M, LIU P. A bionic adaptive end-effector with rope-driven fingers for pear fruit harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107952.
[30] XIAO X, WANG Y, JIANG Y. End-effectors developed for citrus and other spherical crops[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7945.