

康乃馨扦插机器人设计与试验

苏微¹, 阙煜¹, 赖庆辉^{2*}, 杨湛威¹, 闫闯¹, 周生武¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650500)

摘要: 针对康乃馨自动化标准扦插作业需求, 解决现有人工扦插模式劳动强度大的问题, 该研究设计了一种抓取-扦插一体化作业的扦插机器人系统。以康乃馨生根用插穗为对象, 根据插穗物料特性参数和高产栽培农艺要求, 提出辅助栽植式末端执行器作业方式和抓插协同运动规划模型, 基于 YOLOv5s 深度学习网络构建多目标插穗检测模型, 建立扦插机器人运动学模型, 提出基于 MD-H (modified denavit-hartenberg) 规则的逆运动学建模方法和时间最优轨迹规划算法。仿真结果表明, 改进后的逆解算法和轨迹规划算法的运行时间与常规算法相比分别降低了 38.3% 和 72.5%。搭建扦插机器人试验台, 进行定位误差及整机性能试验。试验结果表明, 抓取作业时 X、Y 方向的平均定位误差分别为 2.33 和 2.38 mm; 扦插作业时 X、Y、Z 方向的平均定位误差分别为 2.21、2.25 和 2.05 mm; 机器人单株平均作业总时间为 14.787 s, 其中识别抓取平均工作周期为 6.803 s, 占作业总时间的 46.01%, 扦插作业的平均工作时间为 5.104 s, 占作业总时间的 34.52%; 插深合格率为 88%, 扦插直立度为 92%, 漏插率和根部损伤率分别为 5% 和 2%, 基本满足自动化标准扦插作业要求。研究结果可为温室标准化扦插设备的研发与应用提供参考。

关键词: 机器人; 扦插; 康乃馨; YOLOv5s; 改进粒子群算法; 轨迹规划; 识别定位

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404074

中图分类号: S24; TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0001-12

苏微, 阙煜, 赖庆辉, 等. 康乃馨扦插机器人设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 1-12. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404074 <http://www.tcsae.org>

SU Wei, QUE Yu, LAI Qinghui, et al. Design and test of a carnation cuttage robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 1-12. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404074 <http://www.tcsae.org>

0 引言

扦插是生产用种苗的主要生根繁殖方法, 扦插成本占总劳动力成本的 70%^[1]。扦插育苗是鲜花种植过程中的关键环节, 也是促进农业增收的重要农艺措施^[2]。

针对自动化扦插设备, 国内外已有一些有意义的研究。美国 IRON OX 公司^[3]设计了一种基于五自由度机械臂的水培叶菜移栽机器人, 可基于视觉系统检测并筛选满足移栽要求的种苗; 美国 ISO 公司^[4]开发了一种取苗扦插机器人, 末端执行器通过直接夹取幼苗基质的方式进行取苗, 同时保证插深一致性, 扦插效率可达到 2500 株/h; 荷兰 TTA 公司^[5]基于六自由度机械臂开发出一种扦插机器人系统, 可对种苗进行优质评估从而保证扦插合格率, 移栽效率可达 2800 株/h; 丹麦 BEKIDAN 公司^[6]基于四自由度机器人开发了一种全自动移栽机, 工作效率可达 8800 株/h。温室中的人工扦插是劳动密集型作业, 成本高, 温室自动扦插机的商业价值和优势引起了研究人员的关注^[7]。国内在温室自动化种植领域的

研究也颇有成果^[8]。陶玉龙等^[9-10]研制出一种基于视觉系统的三平移并联机器人, 配备其自主研发的两指四针钳夹式取苗末端执行器。杨艳丽等^[11]开发了叶菜种苗移植机器人, 实现了叶菜种苗从穴盘移植到栽培槽的自动化作业, 工作效率约为人工移植作业的 2 倍以上。然而, 目前的多数研究主要侧重于穴盘到穴盘间基质的移植, 不适用于康乃馨生根苗的扦插应用。此外, 扦插作业的标准化也是许多研究中忽视的关键点。结合机器人扦插的可用性与经济性评估^[12], 开发扦插机器人可以充分弥补目前扦插作业中存在的人工扦插费时费力和缺乏自动化扦插设备等问题。

本文以康乃馨生根用插穗为对象, 设计一种抓取-扦插一体化作业的康乃馨插穗扦插机器人, 对其辅助栽植式末端执行器、插穗目标检测算法、抓插协调运动规划以及运动学算法等核心部件过程进行设计, 通过运动学仿真验证和性能试验对机器人的关键性能进行验证和分析, 以期能为温室标准化扦插设备的研发与应用提供参考。

1 康乃馨插穗特性参数测定

特性参数既是康乃馨插穗质量的重要评价指标, 也是末端执行器参数设计的重要依据。本文选用康乃馨母本枝条作为插穗样本 (图 1a), 其枝条叶片为 4~5 对, 根部茎秆径向截面近似呈椭圆状 (图 1b)。

为了获得康乃馨插穗的表观特性参数, 随机选取 50

收稿日期: 2024-04-16 修订日期: 2024-06-13

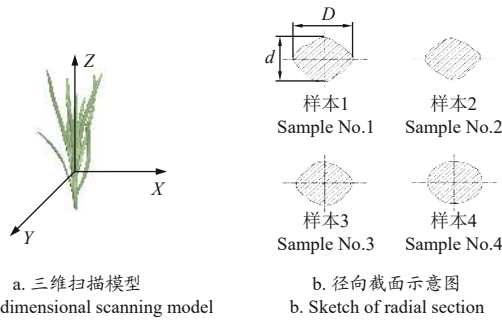
基金项目: 国家自然科学基金项目 (52165031)

作者简介: 苏微, 博士, 副教授, 研究方向为农业机械化生产和管理。

Email: laisubo@163.com

*通信作者: 赖庆辉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业机械装备与计算机测控。Email: laiqinghui007@163.com

株插穗样本, 使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺和电子天平分别对其几何尺寸和质量进行测量, 同时采用排水法测定体积。康乃馨插穗的表现特性参数见表 1。



注: D 为径向截面长轴, mm; d 为径向截面短轴, mm。
Note: D is the long axis in radial section, mm; d is the short axis in radial section, mm.

图 1 康乃馨插穗样本
Fig.1 Sample of carnation cuttings

表 1 康乃馨插穗表现特性参数

参数 Parameters	平均值 Average
株高 Plant height/mm	16.123
径向截面长轴 Long axis in radial section/mm	6.425
径向截面短轴 Short axis in radial section/mm	4.799
质量 Mass/g	2.456
密度 Density/(g·cm ⁻³)	0.797

利用质构仪 (TA Type-XTplus) 进行插穗茎秆的剪切试验^[13], 测定康乃馨插穗的剪切强度。考虑到样本位置相对于根部存在的屈服应力差异, 将试样按根部向上 45、55 和 65 mm 位置分为 3 组各 10 株进行试验, 以插穗茎秆沿标定线切断为准, 结果取平均值。茎秆剪切强

度计算式为

$$\tau = \frac{4p_{\max}}{\pi Dd} \quad (1)$$

式中 τ 为剪切强度, MPa; p_{\max} 为破坏载荷, N。

对载荷-位移原始数据进行处理, 力学特性参数测量结果见表 2, 得到康乃馨插穗的平均剪切极限载荷为 60.419 N, 因此机器人扦插执行器采用夹持力 30~36 N 的气爪, 对插穗茎秆的损伤较小, 可以降低损伤率。

表 2 康乃馨插穗力学特性参数

参数 Parameters	值 Value
剪切极限载荷 Shear limit load/N	60.419
剪切强度 Shear strength/MPa	24.949
剪切模量 Shear modulus/MPa	14.351
杨氏模量 Young's modulus/MPa	38.247
泊松比 Poisson's ratio	0.333

2 扦插机器人关键部件设计

2.1 扦插机器人硬件系统设计

康乃馨插穗扦插机器人主要由上位机、电气系统、机器人控制系统和视觉系统组成, 其硬件架构如图 2 所示。上位机通过以太网光纤与 ROS (robot operating system) 运动控制器连接, 深度相机通过 USB 口与上位机连接。系统工作时, 首先采用边缘设备对采集的彩色图像进行特征识别和三维坐标定位, 再利用上位机进行逆运动学计算和运动规划, 将位姿数据和运动参数发布到 ROS 运动控制器, 在控制机械臂伺服电机运动的同时进行信号反馈。电气系统通过改变系统压力连续调节输出力^[14], 并通过控制器的 I/O 口控制电磁阀。

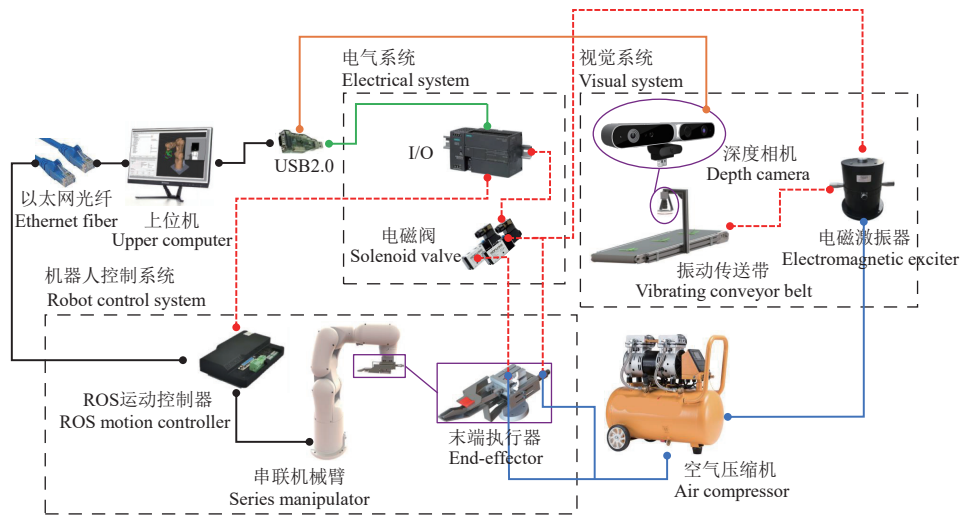


图 2 扦插机器人系统硬件架构
Fig.2 Hardware architecture of cuttage robot system

2.2 末端执行器结构与工作原理

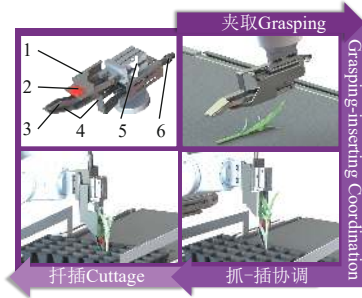
扦插末端执行器主要由滑动助推机构、插深辅助机构、外伸夹头、MHZ2-16 气爪和 CDJ2B10 气缸组成。扦插作业时, 末端执行器从原点出发, 通过机械臂的多轴协调运动, 从传送带上抓取插穗并将其栽植到目标穴

位^[15-17], 作业完成后返回出发点。末端执行器结构及工作流程如图 3 所示。

为了保证夹持的稳固性和低损性, 末端执行器的外伸夹头夹持插穗的叶柄位置。插穗茎秆支撑于滑动助推机构前端的柔性挡块上。通过机械臂调姿后, 末端执行

器到达穴盘对应的扦插点位，此时夹持水平面与育苗穴盘平面构成倾角 α 。插穗根部在插深辅助机构末端斜铲的支撑保护作用下伸入育苗基质内，滑动助推机构在气缸作用下沿夹持水平线以线速度 v 向下运动，柔性挡块在外伸斜面的导向作用下随之推出，同时产生切向速度 v' ，与 v 的夹角为 β ，且：

$$v' = v \cdot \cos\beta \quad (2)$$



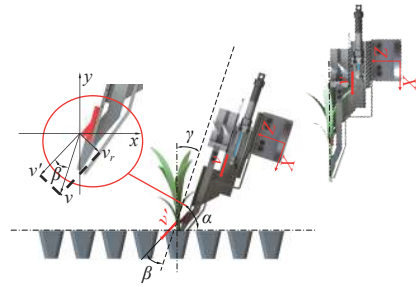
1.滑动助推机构 2.柔性挡块 3.外伸夹头 4.插深辅助机构 5.MH2-16 气爪 6.CDJ2B10 气缸
1.Sliding boost mechanism 2.Flexible block 3.External chuck 4.Auxiliary mechanism of cuttage depth 5.MH2-16 air claw 6.CDJ2B10 air cylinder

图 3 末端执行器结构与工作流程

Fig.3 End-effector structure and workflow

如图 4 所示，在切向速度 v' 的作用下，插穗会翻转角度 γ ，并以最佳倾斜角度插入育苗基质中。

为了保证扦插作业质量，机器人在扦插过程中需要满足以下条件：（1）保证插深合格率，最佳扦插深度为 25~30 mm^[18]；（2）保证扦插直立度，插穗与基质的最佳倾斜角为 60°~90°^[19]。（3）降低损伤率，夹取和扦插过程中应尽量减少插穗的根部损伤。



注： v 为滑动助推机构运动时的线速度， $m \cdot s^{-1}$ ； v' 为柔性挡块推出时的切向速度， $m \cdot s^{-1}$ ； v_r 为柔性挡块推出时的法向速度， $m \cdot s^{-1}$ ； α 为夹持水平面与穴盘平面夹角， $(^\circ)$ ； β 为 v 与 v' 的夹角， $(^\circ)$ ； γ 为插穗翻转角度， $(^\circ)$ ；

Note: v is the linear velocity of the sliding boost mechanism, $m \cdot s^{-1}$; v' is the tangential velocity when the flexible block is pushed out, $m \cdot s^{-1}$; v_r is the normal velocity when the flexible block is pushed out, $m \cdot s^{-1}$; α is the angle between the holding plane and the plug tray plane, $(^\circ)$; β is the angle between v and v' , $(^\circ)$; γ is the turning angle of cuttings, $(^\circ)$;

图 4 扦插末端执行器工作原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of working principle of cuttage end-effector

2.3 康乃馨插穗目标检测算法

康乃馨插穗最佳抓取位置的精准识别与定位是多目标插穗检测的主要任务。当前多数目标检测模型在处理高帧率视频流时，存在推理速度慢以及对小目标的检测性能不佳等问题^[20-22]，为满足实时检测场景对模型快速响应和高检测精度的需求，本文提出基于 YOLOv5s 深度学习网络的插穗多目标检测模型，为机器人提供准确的抓取位置坐标。YOLOv5s 目标检测网络结构如图 5 所示，主要由输入端（Input）、骨干网络（Backbone）、颈部网络（Neck）、预测头（Head）和输出端（Prediction）组成。

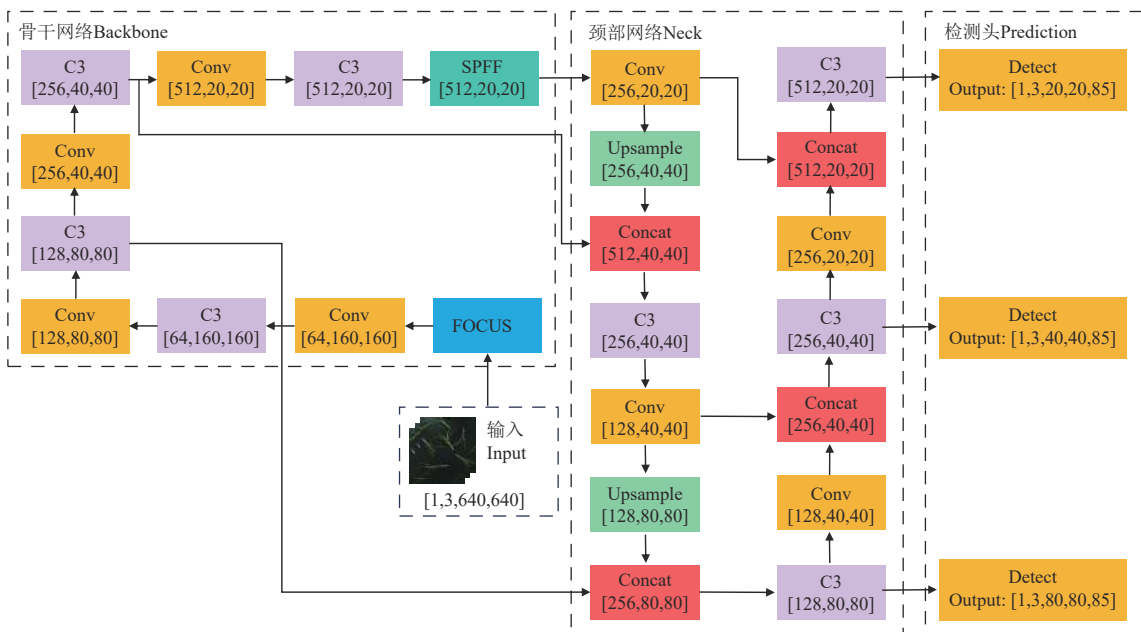


图 5 YOLOv5s 网络结构示意图

Fig.5 Network structure diagram of YOLOv5s

图像输入后，首先在输入层进行预处理，等比缩放到预定义尺寸后，进入由卷积层和残差块组成的骨干网

络中进行图像特征提取，残差块的应用可以有效解决深层网络训练中的梯度消失问题，从而提高特征提取的准

确性。YOLOv5s的颈部网络结构通过路径聚合网络(PANet)实现了不同尺度特征的有效融合,增强了模型对小目标的检测能力。图像在通过颈部网络获取不同尺度的特征后,进入预测头的卷积层和全连接层中进行目标边界框的位置和类别预测,预测结果在输出端中完成后处理,获得最终的目标检测结果。YOLOv5s模型的参数量(params)和浮点运算量(FLOPs)分别为7.2 M和16.5 G,与同系列模型相比轻量化程度更高、推理速度更快,适于作为实时目标检测算法^[23]。

在部署边缘设备时,采用“眼在手外(eye to hand)”的模式,即深度相机采用固定机位安装在机械臂的正前方。定义相机视觉深度方向为Z轴方向,沿传送带水平和垂直方向分别为X轴、Y轴方向^[24-26]。将目标点的像素坐标与深度值代入坐标转换关系式计算相机三维坐标,转换关系式为

$$\begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} = Z_d \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 X_d 、 Y_d 、 Z_d 为目标点在相机坐标系的三维坐标,mm; \mathbf{K}^{-1} 为相机内参逆矩阵; u 、 v 为目标点在像素坐标系的像素坐标,像素。

相机坐标系与世界坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{H}_d^w \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 X_w 、 Y_w 、 Z_w 为目标点在世界坐标系的三维坐标,mm; \mathbf{H}_d^w 为外参变换矩阵。

2.4 抓-插协调运动规划

2.4.1 插穗有序抓取及扦插方案

采用末端执行器抓取-扦插一体的设计方案(图3),避免在复杂工况下由于机械臂冗余运动规划任务导致的作业效率大幅降低的问题。通过手眼标定建立插穗坐标系与末端执行器坐标系之间的映射关系(图6)。为了实现康乃馨插穗的高效抓取,采取有序抓取方案,即插穗沿传送带运行方向竖直放置,仅依靠叶柄位置坐标进行定位和抓取,末端执行器的抓取位姿 P_0 为

$$P_0 = (x_k, y_k, z_k, R_x, R_y, R_z) \quad (5)$$

式中 (x_k, y_k, z_k) 为目标抓取点坐标,mm; (R_x, R_y, R_z) 为欧拉姿态角,rad。其中 $R_x=\pi/2$, $R_y=0$, $R_z=\pi/2$ 。

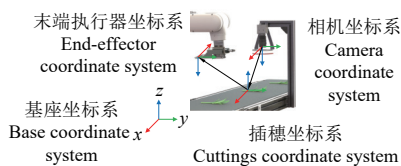


图6 手眼标定中的坐标系映射关系

Fig.6 Coordinate system mapping in hand-eye calibration

建立扦插机器人末端相对位姿映射关系(图7),通过欧拉角变换式(6)求解机器人末端执行器位姿。

$${}^0\mathbf{T} \begin{matrix} \text{End-effector} \\ \text{coordinate system} \end{matrix} = {}^0\mathbf{T} \begin{matrix} \text{Terminal link} \\ \text{coordinate system} \end{matrix} \begin{matrix} \text{End-effector} \\ \text{coordinate system} \end{matrix} \quad (6)$$

式中 ${}^0\mathbf{T}$ 为机械臂末端连杆坐标系相对于机械臂基座坐标系的位姿矩阵; ${}^{\text{End-effector}}\mathbf{T}$ 为机器人工具坐标系相对于机械臂末端连杆坐标系的位姿矩阵; ${}^{\text{Terminal link}}\mathbf{T}$ 为机器人工具坐标系相对于机械臂基座坐标系的位姿矩阵。设定末端执行器坐标系相对于末端连杆坐标系的扦插位姿角保持为 $R_x=\pi$, $R_y=-\pi/2$, $R_z=0$ 。

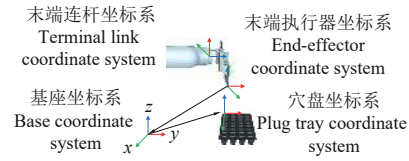


图7 末端相对位姿映射关系

Fig.7 Terminal relative pose mapping

2.4.2 扦插机器人运动规划

机器人高效标准化扦插作业是抓-插协调运动规划的主要目标。本文通过机械臂运动规划和末端执行器姿态调整,可以高效精准地实现插穗的抓取和扦插任务,同时保证插深合格率与扦插直立度。采用六自由度串联机械臂具有以下优点:(1)自由度高:六轴冗余自由度可以避免出现关节限制和奇异点^[27];(2)重复定位精度高:适用于需要精确定位和装配的任务^[28];(3)自动化程度高:适用于自动化生产线的应用场景^[16,29]。

为了防止机器人在运动过程中发生碰撞,采用多段运动规划流程(图8)进行抓-插协调作业。即在每个循环作业中加入回零位和预备扦插位,机器人完成抓取任务后先回到零位,再过渡到扦插任务中;末端执行器完成调姿后到达预备扦插位,随后再过渡到扦插位,通过助推机构将插穗插入基质中。

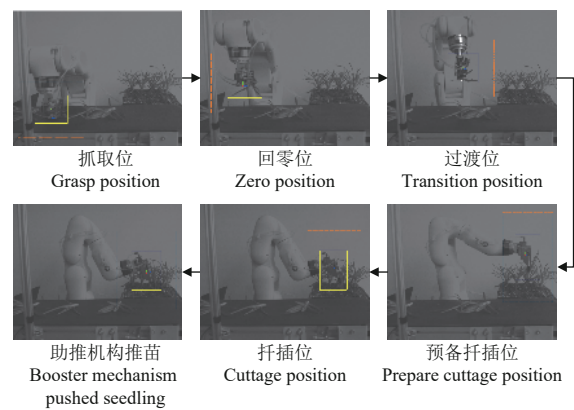


图8 扦插机器人运动规划流程

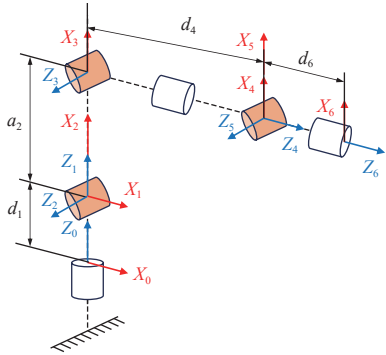
Fig.8 Cuttage robot motion planning process

2.5 扦插机器人逆运动学建模与轨迹规划

运动学的计算时间是影响机器人响应速度和动作执行效率的关键因素。为了提高整机作业效率,本研究提出基于MD-H(modified denavit-hartenberg)规则的逆运动学建模方法和时间最优轨迹规划算法,通过提高逆解和轨迹插值的运行速度,优化机器人工作周期的分配和利用。

2.5.1 基于 MD-H 规则的逆运动学建模方法

为了解决机器人在复杂工况下, SD-H (standard denavit-hartenberg) 规则存在的表达式冗长以及关节突变等问题, 本研究基于 MD-H 规则^[26]构建机械臂串联运动链模型 (图 9), 并建立正运动学连杆坐标系以映射各关节之间的关系。



注: d_i 为沿 Z_i 轴由 X_{i-1} 平移到 X_i 的连杆长度, mm; a_{i-1} 为沿 X_{i-1} 轴由 Z_{i-1} 平移到 Z_i 的关节偏移, mm; $i=1, 2, \dots, 6$ 。
Note: d_i is the length of the connecting rod which is translated from X_{i-1} to X_i along the Z_i axis, mm; a_{i-1} is the joint offset which is translated from Z_{i-1} to Z_i along the X_{i-1} axis, mm; $i=1, 2, \dots, 6$.

图 9 六自由度机械臂 MD-H 模型

Fig.9 MD-H(modified denavit-hartenberg) model of 6-DOF (degree of freedom) robotic arm

根据 Craig 法则^[30]得到六自由度串联机械臂的末端坐标在基础坐标系中的正运动学模型 (式 (7)), 同时根据表 3 的 MD-H 参数结合式 (6) 计算得到正序坐标系中六自由度串联机械臂的齐次变换矩阵 (式 (8))。

$${}^0_6\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}_1 {}^1_2\mathbf{T}_2 {}^2_3\mathbf{T}_3 {}^3_4\mathbf{T}_4 {}^4_5\mathbf{T}_5 {}^5_6\mathbf{T}_6 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^0_6\mathbf{R} & {}^0_6\mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^{i-1}_i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 ${}^0_6\mathbf{R}$ 为机械臂末端的旋转矩阵; ${}^0_6\mathbf{P}$ 为机械臂末端的位置向量; ${}^{i-1}_i\mathbf{T}$ 为第 i 个连杆的齐次变换矩阵, $i=1, 2, \dots, 6$ 。

表 3 六自由度串联机械臂 MD-H 参数

Table 3 MD-H parameters of 6-DOF series robotic arm

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	d_i/mm	$\theta_i(^{\circ})$
1	0	0	336.5	-170~170
2	-90	0	0	-130~100
3	0	272	0	-70~180
4	-90	0	280	-175~175
5	90	0	0	-120~120
6	-90	0	99	-360~360

基于 MD-H 规则的逆运动学建模后, 采用解析法求六自由度机械臂简化机构的逆运动学封闭解。机械臂后 3 个连续关节的转轴相交于同一点, 满足 Pieper 准则, 故该机械臂存在封闭形式的逆运动学解析解。

2.5.2 时间最优轨迹规划算法

鉴于常规多项式轨迹规划算法计算量大和插值精度低等缺点, 为了提高机器人的运动响应速度和执行效率,

本文提出基于改进粒子群算法对常规 3-5-3 多项式分段插值法进行优化^[31-33]的时间最优轨迹规划算法。在运动轨迹起点和终点之间选取 2 个可达路径点, 进而将机械臂末端的运动轨迹划分为 3 段, 分别使用 3 次、5 次和 3 次多项式进行插值, 通过逆运动学解析解得到各插值点对应的关节角度, 轨迹插值表达式为

$$\begin{cases} L_1(t) = a_{i13}t^3 + a_{i12}t^2 + a_{i11}t + a_{i10} \\ L_2(t) = a_{i25}t^5 + a_{i24}t^4 + a_{i23}t^3 + a_{i22}t^2 + a_{i21}t + a_{i20} \\ L_3(t) = a_{i33}t^3 + a_{i32}t^2 + a_{i31}t + a_{i30} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $L_1(t)$ 、 $L_2(t)$ 、 $L_3(t)$ 分别为第 1、2、3 段轨迹对应的多项式角位移函数; a_{imn} 为第 i 个关节第 m ($m=1, 2, 3$) 段插值的第 n ($n=0, 1, \dots, 5$) 个系数; t 为插值时间, s。

以插值时间作为寻优量对机械臂每个关节的运动轨迹进行优化, 构建目标函数与各关节的速度、加速度约束条件为

$$\begin{cases} f(t) = \min \sum_{j=1}^3 t_{ij} \\ \max |v_{ij}| \leq v_{\max} \\ \max |a_{ij}| \leq a_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $f(t)$ 为适应度函数; j 为插值点序号, $j=1, 2, 3$; t_{ij} 为第 i 个关节第 j 个插值点的插值时间, s; v_{\max} 为各关节的最大运动角速度, rad/s; a_{\max} 是各关节的最大运动角加速度, rad/s²。

基于动态学习因子和自适应惯性权重的改进粒子群算法, 迭代式为

$$\begin{cases} x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \\ v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (P_{ij} - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (P_{gj} - x_{ij}^k) \end{cases} \quad (11)$$

式中 k 为单个粒子当前的迭代次数; P_{ij} 为单个粒子当前位置的最优解; x_{ij} 为单个粒子的当前位置; P_{gj} 为当前粒子群位置的最优解; r_1 、 r_2 为 (0~1) 之间的随机数。 ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 分别为局部和全局学习因子。

为了改进基本粒子群算法存在的适应性不足和收敛速度慢等问题, 本研究将基本粒子群算法中的固定或线性学习因子改为非线性变化的动态函数, 具体为

$$\begin{cases} c_1 = 2 \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right] \\ c_2 = 2 \sin^2 \left(\frac{\pi k}{2N} \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中 N 为粒子的最大迭代次数。

为了避免基本粒子群算法过早收敛而陷入局部最优, 提升算法的全局搜索能力, 本文引入线性递减惯性权重, 即:

$$\omega = \omega_{\max} - k \left(\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{N} \right) \quad (13)$$

式中 ω_{\max} 为惯性权重最大值, $\omega_{\max}=0.9$; ω_{\min} 为惯性权重最小值, $\omega_{\min}=0.4$ 。

3 运动学仿真分析

3.1 多目标扦插点遍历仿真

关节角度的精确高效计算是扦插机器人逆运动学求

解的主要目标。本文基于 MD-H 规则的逆运动学解析算法共得到 8 组满足目标位姿的逆解组合。为了验证实际扦插过程中逆解的可行性, 提出基于多目标扦插点遍历仿真的最优逆解选取方法。如图 10 所示, 依次调用每组逆解进行仿真, 每次遍历 10 个目标扦插点, 并以关节角度的边界约束和突变率 (mutation, M) 作为评价指标对关节角度进行评估。当关节角度超过边界约束即被视为突变, 可能导致碰撞发生, 突变率的计算如式 (14) 所示。

$$M = \frac{T_M}{T_M + F_M} \times 100\% \quad (14)$$

式中 T_M 为逆解所求关节角度的突变次数; F_M 为逆解所求关节角度的未突变次数。

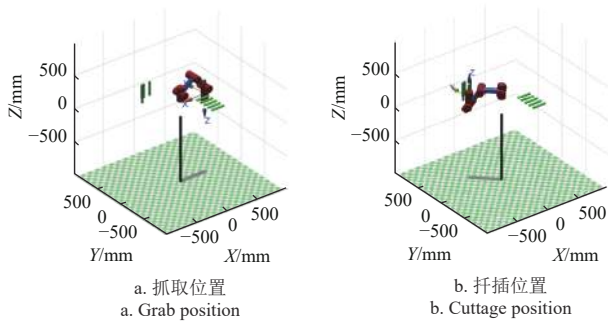


图 10 多目标扦插点遍历仿真

Fig.10 Multi-objective cuttage points traversal simulation

在目标扦插点满足机械臂工作空间约束的基础上, 突变率最小时对应最优逆解组合。

仿真结果如表 4 所示, SD-H 规则的逆运动学解析算法突变率为 12.5%, 基于 MD-H 规则的逆运动学解析算法突变率降低为 5.0%, 平均单次运算时间由 0.407 s 降低为 0.251 s, 比常规算法降低了 38.3%。有效减少了逆运动学的关节突变率和求解时间。

表 4 逆解算法性能对比

Table 4 Performance comparison of inverse kinematics analytic algorithms

算法 Algorithm	突变率 Mutation rate/%	平均单次运算时间 Average single operation time/s
SD-H	12.5	0.407
MD-H	5.0	0.251

3.2 改进粒子群算法仿真

基于动态学习因子和自适应惯性权重对基本粒子群算法进行优化, 并与基本粒子群算法进行比较以验证其有效性。模型算法部署在 MATLAB 环境中, 主要迭代参数设置如下: 时间间隔区间为 [0.000 001, 1], 种群规模为 50, 最大迭代次数为 200 次, 寻优粒子维数为 3; 基本粒子群参数设置如下: 学习因子 $c_1=c_2=0.55$, 惯性权重 $\omega=0.55$; 改进粒子群参数设置如下: 学习因子 $c_{\min}=1.5$, $c_{\max}=2.0$, 使 c_1 、 c_2 在 [1.5, 2.0] 范围内变化, 惯性权重 $\omega_{\max}=0.95$, $\omega_{\min}=0.4$, 惯性权重阻尼比为 0.99。迭代收敛结果如图 11 所示。可以看出, 改进粒子群算法

的迭代速度和收敛精度均高于基本粒子群算法, 非线性动态学习因子和线性递减惯性权重可以有效提高算法的全局搜索能力, 验证了改进算法的有效性。

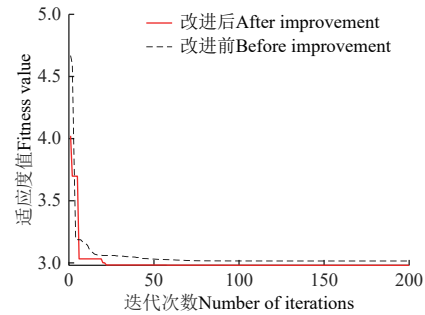


图 11 收敛效果对比

Fig.11 Comparison of convergence effects

3.3 时间最优轨迹规划仿真

实时反馈控制和安全操作是可视化轨迹规划仿真的主要任务。本研究利用 MoveIt-Gazebo 开展时间最优轨迹规划联合仿真。在 Ubuntu18.04+ROS-melodic 环境中, 通过软件开发工具包 (software development kit, SDK) 提供的通用接口搭建通讯架构。利用 MoveIt 进行运动规划组设置, 选用 OpenRAVE 运动规划软件提供的 IKFast 解析运动学插件求解逆运动学方程, 并在运动规划库 (open motion planning library, OMPL) 中使用最优时间轨迹规划算法, 生成配置文件并导入 MoveIt.rviz 可视化模拟器。上位机向伺服控制器发布信息以驱动关节伺服电机同步运动, 同时向 Moveit 节点反馈电机的状态数据, 形成闭环控制, 从而实现扦插机器人的可视化实时仿真控制 (图 12)。

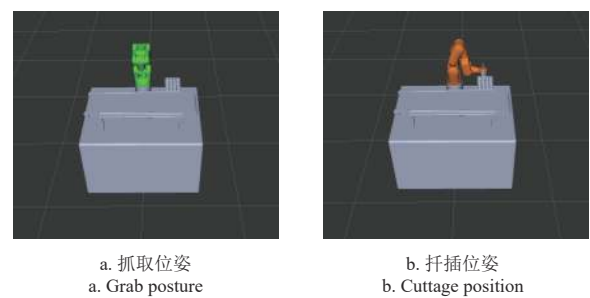


图 12 扦插机器人可视化实时仿真控制

Fig.12 Visual real-time simulation control of cuttage robot

扦插机器人的软件架构如图 13 所示。轨迹规划仿真过程中, 通过 Joint_states 节点反馈关节运动参数, 将基于改进粒子群算法优化的分段插值法与常规 3-5-3 多项式分段插值法的关节角度、角速度和角加速度曲线进行对比, 如图 14 所示。仿真结果表明, 采用时间最优轨迹规划算法得到的各关节角度轨迹平滑且连续, 角速度和角加速度未发生突变, 保证了实时控制下的稳定性要求; 相较于常规多项式分段插值法, 优化后算法的单次运行时间由 12 s 降低为 3.3 s, 减少了近 72.5%; 各关节的角

速度和角加速度曲线的峰值提高，增强了机器人的运动有效性和高效性。响应速度和执行效率，验证了时间最优轨迹规划算法的

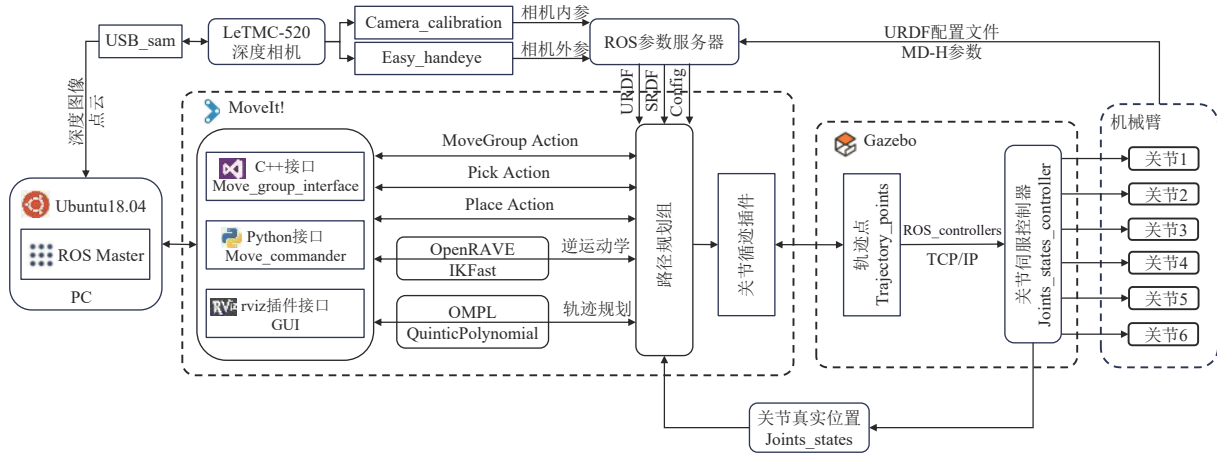


图 13 扦插机器人系统软件架构
Fig.13 Software architecture of cuttage robot system

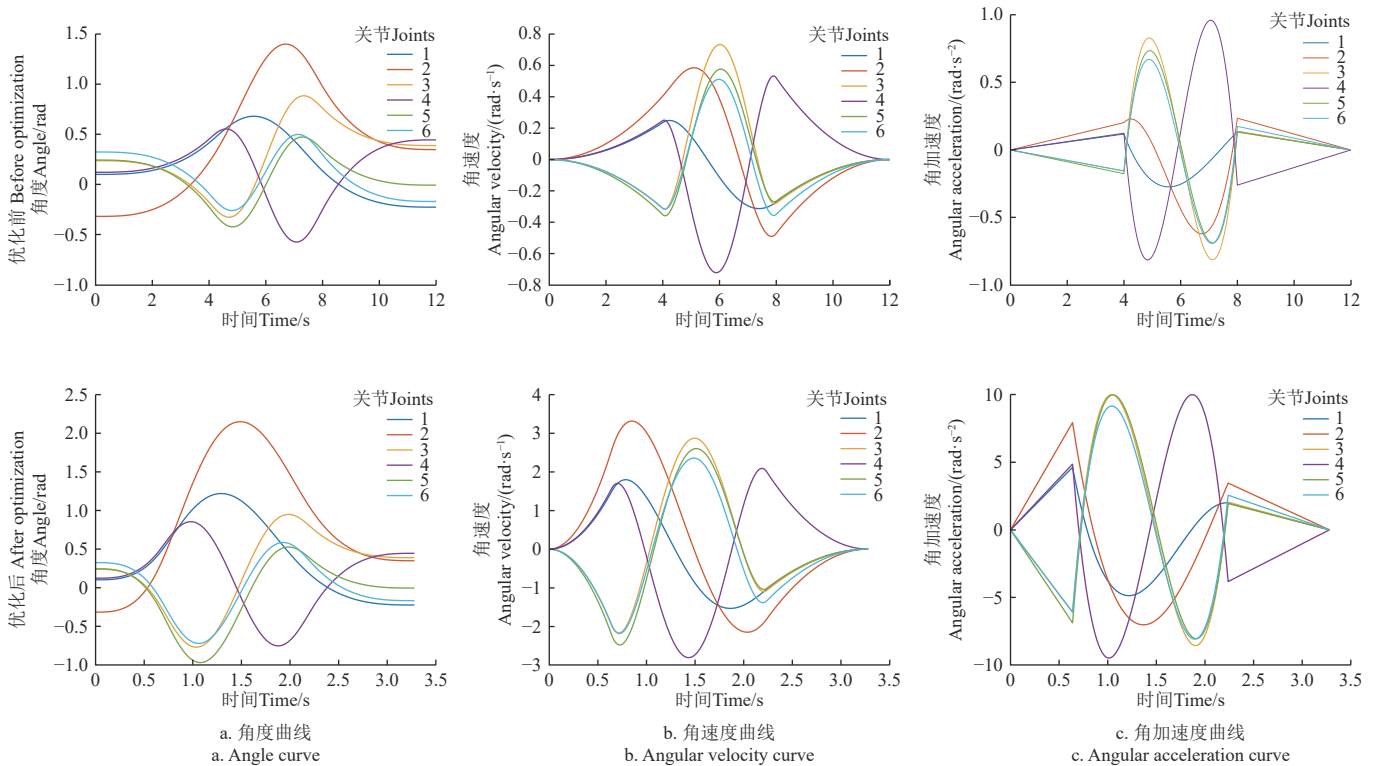


图 14 优化前后关节角度、角速度与角加速度对比
Fig.14 Comparison of optimized anterior and posterior joint angle, angular velocity and angular acceleration

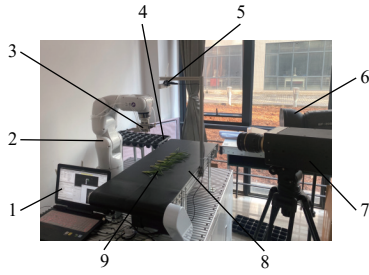
4 扦插试验

4.1 试验设备与材料

根据理论计算及仿真分析结果搭建扦插机器人试验台(图 15)，主要技术参数如表 5 所示。

选用 Jetson Orin Nano 模块搭建训练与测试平台，用于训练和测试基于 YOLOv5s 的多目标检测深度学习模型[34-36]。硬件 GPU 为 102 核 NVIDIA Ampere Architecture, 8 GB 显存；CPU 为 6 核 Arm Cortex-A78AE v8.2 64 位处理器，32 GB 内存。

采用康乃馨母本苗枝条插穗作为试验对象，苗钵选用 32 孔 540 mm×280 mm×55 mm 规格穴盘，育苗基质为“椰糠+珍珠岩”，配比为 3 : 1^[1]。使用激光测距仪(型号 GLM250 VF, 精度±1 mm)测量目标参考点的实际坐标值，参考坐标系由 2 块 750 mm×1 050 mm 标定板组成；使用组合式角尺测量插穗茎秆与育苗基质水平面的倾斜角；为了更准确地测量机器人运行的起始和持续时间，使用合肥富煌君达高科信息技术有限公司生产的高速摄像机(型号千眼狼 5F01 型, 精度 2000 FPS)^[37]，对机器人的工作过程进行逐帧计算分析。



1.上位机 2.SJ603-A 机械臂 3.扦插末端执行器 4.扦插穴盘 5.LeTMC-520 深度相机 6.高速摄像补光灯 7.高速摄像机 8.振动传送带 9.康乃馨插穗
1.Upper computer 2.SJ603-A robotic arm 3.Cuttage end-effector 4.Cuttage plug tray 5.LeTMC-520 depth camera 6.High-speed camera flash 7.High speed camera 8.Vibrating conveyor belt 9.Carnation cuttings

图 15 扦插机器人综合试验台

Fig.15 Comprehensive test bench for cuttage robot

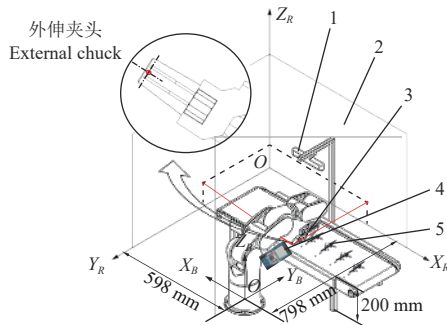
表 5 机器人试验台参数
Table 5 Robot test bench parameters

参数 Parameters	值 Value
机械臂型号 Type of manipulator	SJ603-A
额定功率 Rated power/W	360
运动半径 Radius of motion/mm	540
额定负载 Rated load/kg	3
最大末端速度 Maximum terminal speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.5
重复定位精度 Repeat positioning accuracy/mm	-0.05~0.05
工作台尺寸(长×宽×高) Table size(length×width×height)/mm	1 200×1 000×720
相机型号 Camera model	LeTMC-520
相机分辨率 Camera resolution/pixel	1 280×1 024

4.2 定位误差试验

4.2.1 抓取定位误差

为了确保末端执行器能够精确抓取康乃馨插穗，本试验对室内光环境下的抓取定位误差进行分析，测量方法如图 16 所示。



1.LeTMC-520 深度相机 2.参考坐标系 3.扦插末端执行器 4.GLM250 VF 激光测距仪 5.康乃馨插穗

1.LeTMC-520 depth camera 2.Coordinate reference system 3.Cuttage end-effector 4.GLM250 VF laser rangefinder 5.Carnation cuttings

注: $O_{X_B Y_B Z_B}$ 为机械臂基座坐标系; $O_{X_R Y_R Z_R}$ 为参考坐标系。
Note: $O_{X_B Y_B Z_B}$ is the base coordinate system of the manipulator; $O_{X_R Y_R Z_R}$ is the reference coordinate system.

图 16 插穗坐标测量方法示意图

Fig.16 Schematic of method for cuttings coordinate measuring

将参考坐标系水平安装(经水平仪检测)在机械臂基座平面上,并将传送带的运行方向定义为 X_R 轴方向,垂直于传送带的方向定义为 Y_R 轴方向,LeTMC-520 相机的深度方向作为 Z_R 轴,图像采集距离为 600 mm。机械臂基座坐标系相对于参考坐标系的 X_R 、 Y_R 轴距离 D_x 、

D_y 分别为 798 mm、598 mm。具体试验方法如下:

1) 预先采集 600 张康乃馨插穗图像,样本示例如图 17a 所示。为了识别出插穗的最佳抓取位置,使用 labelImg 软件对插穗的叶柄位置(叶和茎的连接部位)进行标注,如图 17b 和图 17c 所示。将数据集按照 8:2 划分为训练集和测试集^[38],并将其输入 YOLOv5s 多目标插穗检测网络进行模型训练,随后部署在 Jetson Orin Nano 边缘设备中。首先通过标定确定相机内参,再通过对 RGB 图像进行目标检测识别,计算出茎秆抓取点所在矩形框,结合相机的内参矩阵计算出矩形框中心点像素坐标^[39]。识别效果如图 17d 所示。

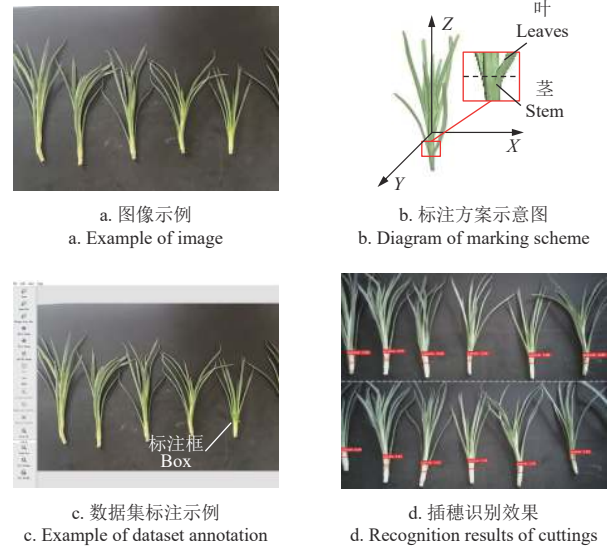


图 17 插穗标注方案与识别效果

Fig.17 Marking scheme and recognition results of cuttings

2) 结合相机内参和外参转换矩阵,推导像素坐标到深度坐标的映射关系,计算出插穗目标抓取点相对于机械臂基座坐标系的三维坐标 (X'_g, Y'_g, Z'_g) ,并将其以话题形式发布到机械臂的控制节点。待末端执行器移动到目标插穗位置后保持不动,使用激光测距仪测量外伸夹头中心到 X_R 、 Y_R 轴的距离 d_y 、 d_x 。测量时,确保激光测距仪平行于机械臂基座平面,并将激光点垂直打在标定板上。由于传送带高度固定,且 $Z'_g = Z''_g = 200$ mm,因此仅需考虑 X_B - Y_B 平面内的定位误差。按式(15)计算目标插穗的真实坐标 (X''_g, Y''_g) 。

$$\begin{cases} X''_g = D_x - d_x \\ Y''_g = D_y - d_y \end{cases} \quad (15)$$

将康乃馨插穗沿传送带运行方向竖直放置,进行 10 组抓取定位误差试验,每组依次对 10 株康乃馨插穗进行识别定位,依次记录 $X_B Y_B$ 平面内的位置坐标,结果取平均值。试验结果如表 6 所示。

试验结果表明,抓取作业时 $X_B Y_B$ 平面内的平均定位误差为 (2.33, 2.38) mm。机器人识别抓取单株插穗的平均工作周期为 6.803 s。经测量,末端执行器外伸夹头最大开度为 12.50 mm,康乃馨插穗样本截面长轴平均值为 6.43 mm,末端执行器夹爪两侧行程余量为 3.04 mm。

因此定位误差可通过夹爪两侧行程余量进行补偿。末端执行器基本满足抓取定位精度要求。

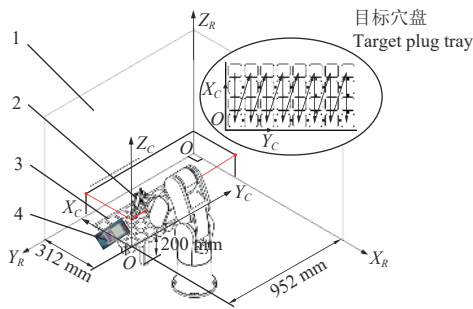
表 6 抓取定位误差

Table 6 Positioning error of grasping test

试验号 Test No.	平均定位误差 Average positioning error ($ \Delta X , \Delta Y $) /mm	平均耗时 Average time consumption/s
1	(2.1, 2.5)	6.238
2	(2.3, 2.8)	6.163
3	(2.7, 2.5)	6.113
4	(2.2, 2.2)	7.560
5	(2.4, 2.1)	6.355
6	(2.5, 2.4)	7.248
7	(2.4, 2.2)	7.054
8	(2.3, 2.6)	6.738
9	(2.1, 2.5)	7.406
10	(2.3, 2.0)	7.152

4.2.2 扦插定位误差

本试验主要在工具台坐标系 $O X_C Y_C Z_C$ 下评估末端执行器的扦插定位误差, 以验证末端执行器在扦插过程中的作业精度, 测量方法如图 18 所示。



1.参考坐标系 2.扦插末端执行器 3.扦插苗钵 4.GLM250 VF 激光测距仪
1.Coordinate reference system 2.Cuttage end-effector 3.Carnation cuttings
4.GLM250 VF laser rangefinder

注: $O X_C Y_C Z_C$ 为工具台坐标系。

Note: $O X_C Y_C Z_C$ is the tool bench coordinate system.

图 18 末端执行器坐标测量方法示意图

Fig.18 Schematic of method for end-effector coordinates measuring

参考坐标系保持不变, 首先对工具台坐标系的原点进行标定。标定方法与抓取定位误差试验相同, 坐标系原点到 X_R 、 Y_R 轴的距离 D_y' 、 D_x' 分别为 952 mm、312 mm, Z_C 轴方向垂直于穴盘水平面, 穴盘水平面距离机械臂基座水平面 200 mm。具体试验方法如下:

1) 目标穴盘固定不动, 将空穴中心点作为目标扦插点, 根据空穴中心距 $a=60$ mm 计算目标扦插点相对于工具台坐标系的三维坐标 (X_c', Y_c', Z_c') 。

2) 驱动机器人空载遍历每个空穴, 待扦插末端执行器移动到目标扦插点后保持不动, 使用激光测距仪测量外伸夹头顶点到参考坐标系 X_R 、 Y_R 轴的距离 d_x' 、 d_y' 。按式 (16) 计算实际扦插点的真实坐标 (X_c'', Y_c'') , Z_c'' 坐标值通过游标卡尺测得。

$$\begin{cases} X_c'' = D_x' - d_x' \\ Y_c'' = D_y' - d_y' \end{cases} \quad (16)$$

进行 10 组扦插定位误差试验, 每组依次遍历 32 个穴位, 试验结果取平均值, 结果如表 7 所示。

表 7 扦插定位误差

Table 7 Positioning error of cuttage test

试验号 Test No.	平均定位误差 Average positioning error ($ \Delta X , \Delta Y , \Delta Z $) /mm	平均耗时 Average time consumption/s
1	(2.2, 1.8, 1.96)	4.944
2	(2.3, 2.0, 1.85)	4.893
3	(2.8, 2.7, 1.99)	5.155
4	(2.1, 2.4, 2.05)	5.523
5	(1.9, 2.3, 2.44)	5.166
6	(2.0, 2.2, 2.17)	4.768
7	(2.2, 2.5, 1.87)	5.332
8	(2.4, 2.1, 2.18)	4.998
9	(2.3, 2.3, 2.03)	4.932
10	(1.9, 2.2, 1.92)	5.327

试验结果表明, 机器人扦插作业时的平均定位误差为 (2.21, 2.25, 2.05) mm, 单株扦插的平均工作周期为 5.104 s。末端执行器外伸夹头顶点与目标扦插点的误差在 10 mm 以内, 该误差主要与机械臂本身的重复定位精度有关, 可通过示教调试进行规避。末端执行器基本满足扦插作业定位精度要求。

4.3 整机性能试验

本试验主要评估室内光环境下扦插机器人的综合性能。以插深合格率、扦插直立度和单株平均作业时间为试验指标, 分别定义为插穗扦插深度合格株数 (25~30 mm 为合格)、插穗茎秆与育苗基质水平面倾斜角合格株数 (60°~90°为合格) 以及插穗扦插作业总时间与插穗总数的比值。在扦插作业过程中, 插穗根部在末端执行器的压力以及基质颗粒的摩擦等作用下可能会受到不同程度的损伤。本研究以插穗根部的损伤程度作为指标对损伤率进行评估, 分为以下几类: 无损伤、表皮轻微划伤、部分根部组织受损以及根部严重弯折变形, 损伤率为损伤插穗株数与插穗总数的比值。同时统计漏插情况, 漏插率为漏插插穗株数与插穗总数的比值。

在机器人稳定工作状态下, 进行 10 组整机性能试验, 每组扦插 10 株插穗, 共扦插 100 株。机器人扦插效果如图 19 所示。

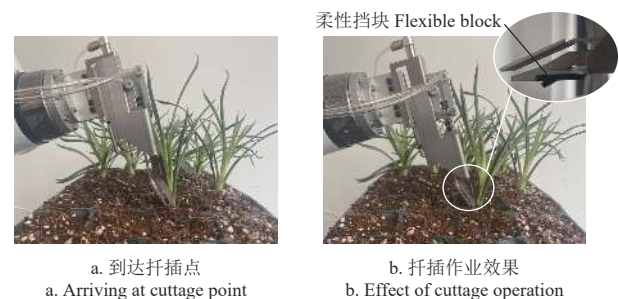


图 19 末端执行器扦插效果

Fig.19 Cuttage effect of end-effector

每组试验完成后统计合格株数, 并记录漏插率和根部损伤率, 结果取平均值。试验结果如表 8 所示。

试验结果表明, 康乃馨插穗扦插机器人的插深合格率平均为 88%, 扦插直立度平均为 92%, 单株平均作业

总时间为 14.787 s, 其中识别抓取时间为 6.803 s 占总时间的 46.01%, 扦插时间为 5.104 s 占总时间的 34.52%,

中间运算与回零的平均耗时占总时间的 19.47%, 平均漏插率和根部损伤率分别为 5% 和 2%。

表 8 整机性能试验结果

Table 8 Performance test results of machine

试验号 Test No.	扦插数 Number of cuttage/株	插深合格数 Qualified number of cuttage depth/株	倾斜角合格数 Qualified number of inclined angle/株	扦插作业时间 Cuttage operation time/s	漏插数 Number of missing cuttage/株	根部损伤数 Number of root damage/株	插深合格率 Qualified rate of cuttage depth/%	扦插直立度 Vertical degree of cuttage/%	单株平均作 业时间 Average working time per plant/s	漏插率 Rate of missing cuttage/%	根部损伤率 Rate of root damage/%
1	10	9	9	149.789	0	0	90	90	14.979	0	0
2	10	8	10	149.452	0	0	80	100	14.945	0	0
3	10	8	8	143.130	2	0	80	80	14.313	20	0
4	10	9	10	150.568	0	1	90	100	15.057	0	10
5	10	10	10	147.383	0	0	100	100	14.738	0	0
6	10	8	9	147.681	1	0	80	90	14.768	10	0
7	10	9	9	147.237	1	0	90	90	14.724	10	0
8	10	9	9	146.396	0	1	90	90	14.640	0	10
9	10	8	8	146.166	1	0	80	80	14.617	10	0
10	10	10	10	150.846	0	0	100	100	15.085	0	0
合计 Total	100	88	92	147.865	5	2	88	92	14.787	5	2

限制机器人扦插效率的主要因素包括: (1) 传送带上的插穗形态差异越大, 检测运算时间就会增加, 从而制约了抓取作业效率; (2) 机器人在确保安全性和准确性的前提下需要完成抓取和扦插两段复杂动作, 需要花费较多时间完成运算, 从而影响扦插的综合效率。因此, 进一步对扦插末端执行器进行结构优化, 可以提高设备的适用性和容错率; 优化多目标插穗检测模型和运动规划算法, 实现抓插协调运动、减少运算和回零过渡耗时, 将有利于进一步提升扦插机器人的综合效率和作业质量。

5 结 论

1) 本文针对康乃馨插穗自动化标准扦插作业需求, 设计了一种抓取—扦插一体化康乃馨插穗扦插机器人系统, 实现了穴盘苗的自主扦插作业;

2) 为满足实时目标检测需求, 基于 YOLOv5s 深度学习网络构建多目标插穗检测模型, 建立扦插机器人运动学模型, 提出了基于 MD-H 规则的逆运动学建模方法和时间最优轨迹规划算法。仿真结果表明, 改进后的逆解算法和轨迹规划算法的运行时间与常规算法相比分别降低了 38.3% 和 72.5%;

3) 搭建了扦插机器人试验台, 进行定位误差试验及整机性能试验。试验结果表明, 抓取作业时水平面内平均定位误差为 (2.33, 2.38) mm; 扦插作业时的平均定位误差为 (2.21, 2.25, 2.05) mm; 其中平均作业总时间为 14.787 s, 单株识别抓取时间为 6.803 s, 占总时间的 46.01%; 扦插时间为 5.104 s, 占总时间的 34.52%; 平均插深合格率为 88%, 平均扦插直立度为 92%, 平均漏插率和根部损伤率分别为 5% 和 2%, 基本满足自动化标准扦插作业的要求。

康乃馨插穗不规则形状、不稳定姿态以及茎叶遮挡是影响视觉检测成功率并导致漏插的主要原因。后续将针对无序插穗开展姿态估计算法研究, 实现多目标、多姿态插穗的无序抓取, 并针对其他扦插类作物进行试验和结构优化, 进一步提升机器人的作业性能和适用性,

从而为扦插机器人的高效标准化作业提供更加全面的理论支持。

[参 考 文 献]

- [1] ADEGBOLA Y U, FISHER P R, HODGES A W. Benchmarking the efficiency of transplanting plant cuttings at large young plant greenhouse operations[J]. *HortScience*, 2018, 53(8): 1133-1138.
- [2] 何正其, 胡海峰, 卜顺发, 等. 康乃馨种苗连栋大棚扦插育苗技术[J]. *上海农业科技*, 2014(5): 104-105.
- [3] Matt S. The hydroponic, robotic future of farming in greenhouses[EB/OL]. [2024-08-17]. <https://www.wired.com/story/the-hydroponic-robotic-future-of-farming-in-greenhouses-at-iron-ox/>.
- [4] ISO. Cutting Planter 2500[EB/OL]. [2024-08-17]. <https://www.iso.org/obp/ui/en/iso-cutting-planter-2500/>
- [5] TTA.CuttingEdge[EB/OL]. [2024-08-17]. <https://www.tta.eu/cn/equipment/transplanting-cuttings/cuttingedge>.
- [6] BEKIDAN. Planterobot[EB/OL]. [2024-08-17]. <https://www.bekidan.dk/bekidan-planterobot>.
- [7] FISHER P R, ADEGBOLA Y U, HODGES A W. Economic evaluation of manual and robotic transplanting of plant cuttings[J]. *Acta Horticulturae*, 2020, 1271: 221-226.
- [8] 张雷. 农业生产中蔬菜嫁接机技术研究与发展现状分析[J]. *农业经济*, 2022(9): 26-28.
- [9] 陶玉龙, 潘婷, 潘昱, 等. 穴盘苗高速移栽机器人研发[J]. *农业装备技术*, 2022, 48(1): 13-14, 17.
- [10] 韩绿化, 毛罕平, 严蕾, 等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 23-30. HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨艳丽, 江海宇, 杨丹彤, 等. 叶菜种苗移植机器人开发[J]. *现代农业装备*, 2016(3): 20-23. YANG Yanli, JIANG Haiyu, YANG Dantong, et al. Development of leaf vegetables transplant robot[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2016(3): 20-23. (in Chinese with English abstract)
- [12] ADEGBOLA Y U, FISHER P R, HODGES A W. Economic evaluation of transplant robots for plant cuttings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 237-243.

- [13] 舒彩霞, 杨佳, 万星宇, 等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 34-43. SHU Caixia, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(9): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈子文, 杨明金, 李云伍, 等. 基于气动无损夹持控制的番茄采摘末端执行器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 27-35. CHEN Ziwen, YANG Mingjin, LI Yunwu. Design and experiment of tomato picking end-effector based on non-destructive pneumatic clamping control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(2): 27-35. (in Chinese with English abstract)
- [15] 童俊华, 蒋焕煜, 周鸣川. 基于遗传算法的穴盘苗自动移钵路径优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 45-49, 26. TONG Junhua, JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan. Optimization of seedling transplanting path based on genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 45-49, 26. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐守江. 基于蚁群算法的穴盘苗自动移钵路径优化[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(12): 475-477.
- [17] ZHENG S, LIU C M, El-Aty Ali Abd, et al. Design and implementation of a 6-DOF robot flexible bending system[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 84.
- [18] 屈广琪. 康乃馨穴盘扦插育苗技术规范[J]. *农村实用工程技术*, 2000(10): 10-11.
- [19] 郑邵秋, 张彩虹, 王国强. 巨菌草扦插机扦插机构优化设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(6): 32-41. ZHENG Shaoqiu, ZHANG Caihong, WANG Guoqiang. Optimization design and test of cuttings mechanism of pennisetum giganteum transplanter[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(6): 32-41. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 with English abstract)
- [21] 李俊菽, 王甲一, 孔德肖, 等. 结合 YOLOv5 与双目视觉定位的摘果机械臂控制研究[J]. *农机化研究*, 2024, 46(7): 38-43. LI Junqiu, WANG Jiayi, KONG Dexiao, et al. Research on the control of fruit picking manipulator based on the fusion of YOLOv5s and binocular vision[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(7): 38-43. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈青, 殷程凯, 郭自良, 等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2023, 38(4): 1-15. CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 38(4): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩俊, 袁小平, 王准, 等. 基于 YOLOv5s 的无人机密集小目标检测算法[J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2023, 57(6): 1224-1233. HAN Jun, YUAN Xiaoping, WANG Zhun, et al. UAV dense small target detection algorithm based on YOLOv5s[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2023, 57(6): 1224-1233. (in Chinese with English abstract)
- [24] 叶敏, 邹湘军, 罗陆锋, 等. 荔枝采摘机器人双目视觉的动态定位误差分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 50-56. YE Min, ZOU Xiangjun, LUO Lufeng, et al. Error analysis of dynamic localization tests based on binocular stereo vision on litchi harvesting manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(5): 50-56. (in Chinese with English abstract)
- [25] 崔永杰, 马利, 何智, 等. 基于最优空间的猕猴桃双臂并行采摘平台设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8): 132-143. CUI Yongjie, MA Li, HE Zhi, et al. Design and experiment of dual manipulators parallel harvesting platform for kiwifruit based on optimal space[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(8): 132-143. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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 harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 18-25, 42. (in Chinese with English abstract)
- [27] TIAN X Y, XU Q H, ZHAN Q. An analytical inverse kinematics solution with joint limits avoidance of 7-DOF anthropomorphic manipulators without offset[J]. *Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics*, 2020, 358(2).
- [28] 王大超. 6 自由度机械手臂的研究与仿真[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 21-22. WANG Dachao. Research and Simulation with 6 Degree of Freedom Robot[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 21-22.
- [29] 刘春梅, 郑硕, 郭文凤, 等. 基于工业机器人的数字化弯管成形技术研究[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(13): 63-69. LIU Chunmei, ZHENG Shuo, GUO Wenfeng, et al. Research on digital tube bending technology based on industrial robot[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(13): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [30] GHOSH A, SINGH O, RAY A K. Inverse kinematic solution of a 7 DOF robotic manipulator using boundary restricted particle swarm optimization[J]. *IFAC PapersOnLine*, 2022, 55(1): 101-105.
- [31] ZHANG T, ZHANG M H, ZOU Y B. Time-optimal and smooth trajectory planning for robot manipulators[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 19: 1-11.
- [32] DU Y X, CHEN Y H. Time optimal trajectory planning algorithm for robotic manipulator based on locally chaotic particle swarm optimization[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2022, 31(5): 906-914.
- [33] CAO X M, YAN H S, HUANG Z Y, et al. A multi-objective particle swarm optimization for trajectory planning of fruit picking manipulator[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2286-2286.
- [34] 陈燕, 王佳盛, 曾泽钦, 等. 大视场下荔枝采摘机器人的视觉预定位方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 48-54. CHEN Yan, WANG Jiasheng, ZENG Zeqin, et al. Research on vision pre-positioning for litchi picking robot under large field of view[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(23): 48-54. (in Chinese with English abstract)

- [35] 冯青春, 赵春江, 李涛, 等. 苹果四臂采摘机器人系统设计及试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(13): 25-33.
FENG Qingchun, ZHAO Chunjiang, LI Tao, et al. Design and test of a four-arm apple harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(13): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- [36] 周桂红, 马帅, 梁芳芳. 基于改进 YOLOv4 模型的全景图像苹果识别[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 159-168
ZHOU Guihong, MA Shuai, LIANG Fangfang. Recognition of the apple in panoramic images based on improved YOLOv4 model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(21): 159-168. (in Chinese with English abstract)
- [37] 苏微, 赵庆辉, 赖庆辉, 等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(7): 144-155.
SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 144-155. (in Chinese with English abstract)
- [38] 周馨墨, 吴烽云, 邹湘军, 等. 基于多目标识别的葡萄果串采摘点定位方法[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(22): 166-177.
ZHOU Xinzhaohao, WU Fengyun, ZOU Xiangjun, et al. Method for locating picking points of grape clusters using multi-object recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(22): 166-177. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李涛, 邱权, 赵春江, 等. 矮化密植果园多臂采摘机器人任务规划[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 1-10.
LI Tao, QIU Quan, ZHAO Chunjiang, et al. Task planning of multi-arm harvesting robots for high-density dwarf orchards[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(2): 1-10. (in Chinese with English abstract)

Design and test of a carnation cuttage robot

SU Wei¹, QUE Yu¹, LAI Qinghui^{2*}, YANG Zhanwei¹, YAN Chuang¹, ZHOU Shengwu¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. School of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: In the process of high-yield cultivation of greenhouse cut flower, high labour consuming and lacking of operational standardization stand out as significant issues. As an important agronomic technique for seedlings rooting, cuttage is a key link in the planting process and an important measure to increase agricultural income, accounting for 70% of the total labor cost. A carnation cuttage robot system was designed to integrate with the grasping-cuttage multifunction for the carnations' automatic cuttage. Taking carnation cuttings as the research object, according to the agronomic requirements under high-yield cultivation models and the materials characteristics of carnation cuttings, an auxiliary cuttage end-effector operation mode and a grasping-cuttage coordinated motion planning model are proposed. It realized high-efficient cuttage operation by the combination of cuttings gripping and auxiliary cuttage. A multi-objective identification and localization model was constructed based on the YOLOv5s deep learning network and the hand-eye coordinate system mapping relationship to meet the needs of target detection. Additionally, a kinematic model was built for the cuttage robot, and MD-H (modified denavit-hartenberg) rule based inverse kinematics modeling method and time optimal trajectory planning algorithm are proposed. A multi-objective cuttage points traversal simulation method was proposed to verify that the inverse kinematics modeling method based on MD-H rule can effectively reduce the joint mutation rate and solution time of inverse kinematics. In the framework of Ubuntu 18.04 and ROS-melodic, Moveit-gazebo is used to carry out the joint simulation of time optimal trajectory planning, and the validity and efficiency of time optimal trajectory planning algorithm are verified. Finally, the key technologies of the cuttage robot were integrated to develop the standardized and automated cuttage workflow. We constructed a comprehensive test bench for the cuttage robot to evaluate the localization error and machine performance. The localization average error in X and Y directions during the grasping operation were 2.33 and 2.38 mm, the cuttage operation had an average localization error in X, Y and Z directions were 2.21, 2.25 and 2.05 mm, respectively. On average, it took 14.787 s in total to operation per plant. The time of recognizing and grasping, cuttage were 6.803 and 5.104 s, accounting for 46.01% and 34.52% of the total working time respectively. During the test of the performance of cuttage robot, the average qualified rate of cuttage depth and the vertical degree of cuttage were 88% and 92% respectively. The average rate of missing cuttage and root damage were 5% and 2% respectively. The cuttage robot met the basic requirements of standardized cuttage operations. Thus, the study fills gaps in the literature on mechanized cuttage of carnation in China and provides a theoretical basis for standardized seedlings cuttage. The main factors limiting the cuttage efficiency of the robot include: 1) The greater the difference in the shape of the cuttings on the conveyor belt, the longer the detection operation time will be, thus restricting the efficiency of the grasping operation; 2) In order to ensure the safety and accuracy of the robot, it needs to complete two complex actions of grasping and cuttage, so it takes more time to complete the calculation, which affects the overall efficiency of cuttage. The irregular shape of carnation cuttings, the unstable posture and the occlusion of stems and leaves are the main reasons that affected the success rate of visual detection and led to missing cuttage. Future research should be carried out on the attitude estimation algorithm for disordered cuttings to achieve the disordered grasping of multi-objective and multi-pose cuttings. The researches on other crops are needed to further improve the performance and applicability of the robot. Therefore, it can provide more comprehensive theoretical support for the high-efficient and standardized operation of cuttage robot.

Keywords: robot; cuttage; carnation; YOLOv5s; improved particle swarm algorithm; trajectory planning; recognition and location