doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.014

基于最优空间的猕猴桃双臂并行采摘平台设计与试验

崔永杰[1,2]　马　利[1]　何　智[1,2]　朱玉桃[1]　王寅初[1]　李　凯[1,3]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为使多关节双臂并行采摘空间与猕猴桃棚架空间相适应,以保证双臂间采摘区域连续无漏果且采摘面积最大化,采用理论与试验相结合的方法对双臂并行采摘平台进行设计。首先,结合机械手工作空间和棚架空间等效模型,分析确定了双臂空间布局方案;然后,通过对双臂并行采摘效率进行理论分析确定优化设计变量,以采摘面积最大和公共区域占比最小为指标建立目标优化函数,利用粒子群算法求解得最优双臂相对安装位置 870 mm、最优双臂安装高度 1 020 mm 和移动平台最大间歇式前进步距 450 mm;在此基础上,建立了双臂开链运动模型及其位置层约束关系;最后,为验证采摘空间适应性及整机作业性能,搭建双臂并行采摘平台样机并进行了果实定位误差试验和双臂并行采摘试验。结果表明:果实平均水平和深度定位误差分别为 5.0 mm 和 8.3 mm,基本满足猕猴桃采摘要求,平均果实位置遍历成功率为 92.09%,双臂能够遍历除奇异点外所要求的目标果实点,平均果实采摘成功率为 82.10%,平均单果采摘时间为 5.86 s,通过位姿调整双臂在共享空间可以改善运动冲突问题,验证了猕猴桃双臂并行采摘平台的作业可行性。

关键词: 猕猴桃; 双机械臂; 开链模型; 采摘平台; 粒子群算法

中图分类号: S232.3; TP24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0132-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Dual Manipulators Parallel Harvesting Platform for Kiwifruit Based on Optimal Space

CUI Yongjie[1,2]　MA Li[1]　HE Zhi[1,2]　ZHU Yutao[1]　WANG Yinchu[1]　LI Kai[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Internet of Things*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Perception and Intelligent Service*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: In order to adapt the parallel harvesting space of the multi-joint dual robotic arms to the kiwifruit scaffolding space, so that ensuring the maximum continuous harvesting area without fruit leakage, the method of theory and experiment was used to design the parallel harvesting platform of the dual robotic arms. Firstly, the spatial layout of the dual robotic arms was determined by combining the equivalent models of the manipulator workspace and the scaffolding space. Then, the design variables were determined by theoretical analysis of the parallel harvesting efficiency with the dual robotic arms, and the objective optimization function was established with the indicators of "maximum harvesting area" and "minimum common area". A particle swarm algorithm was used to solve for an optimum relative mounting position of 870 mm, an optimum mounting height of 1 020 mm for the dual robotic arms, and a maximum intermittent forward step distance of 450 mm for the mobile platform. On this basis, the open-chain motion model of the arms and their position layer constraints was established. Finally, to verify the adaptability of the parallel harvesting space and the performance of the whole machine, a prototype of the dual manipulators parallel harvesting platform was built and the fruit positioning error test and the parallel harvesting test with dual robotic arms were carried out. The results showed that the average horizontal and depth positioning errors of the fruit were 5.0 mm and 8.3 mm respectively, which met the kiwifruit

收稿日期: 2022-03-30　修回日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971805)

作者简介: 崔永杰(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事果蔬生产自动化研究,E-mail: agriculturalrobot@nwafu.edu.cn

picking requirements, the average fruit position traversal success rate was 92.09%, the arms can traverse the required target fruit points except singular points, the average fruit harvesting success rate was 82.10% and the average single fruit harvesting time was 5.86 s, the problem of motion conflict can be improved by adjusting the pose of the arms in the shared space, which verified the operational feasibility of the parallel harvesting platform with dual robotic arms for kiwifruit.

Key words: kiwifruit; dual manipulators; open chain model; harvesting platform; particle swarm algorithm

0　引言

中国猕猴桃种植面积及产量均位居世界第一，远超猕猴桃出口国新西兰和意大利，同时陕西省作为中国猕猴桃的核心产区之一，猕猴桃产业规模持续增加[1-2]。在猕猴桃果园全年精细化管理作业的过程中，尤其是秋季果实采收，主要是人工采摘，作业强度大、劳动力成本高[3-4]。国内外研究人员针对主流消费果蔬广泛研发采摘机器人[5-9]，但目前果蔬采摘机器人在生产效率和投入产出比方面仍不如人工作业，单臂采摘机器人的作业能力存在局限性，不能满足农业生产需求[10-11]。多臂并行采摘是解决生产效率低的一种有效方法。因此，需要设计一种用于猕猴桃采摘的多臂并行采摘平台，该平台能够在棚架式栽培的猕猴桃环境下实现多臂并行采摘。

近些年，面向劳动密集型的果蔬采摘任务，国内外研发多机械臂并行采摘机器人。文献[12]设计了猕猴桃三自由度四臂并行采摘机器人，4 个机械臂根据平行四连杆机构的物理尺寸间隔布置，同时对机械臂关节转角范围进行了限制。文献[13]对比分析了机械臂的工作空间特性对猕猴桃采摘效率的影响，并结合试验说明在多臂并行采摘时，直角机械臂比关节型机械臂更有效率，但末端执行器在竖直向上抓取呈自然向下生长的猕猴桃果实的过程中，直角机械臂 Z 轴对平台的平整度有较高要求。文献[14]研发了多臂并行收获苹果方案，布置 12 个机械臂在两侧同时对两行苹果进行采摘。文献[15]研制了双臂苹果采摘机器人，两个机械臂分别由一个多关节采摘机械臂和另一个负责收集的管道机械臂组成。文献[16]阐述了一种在非结构化果园环境中使用双臂协同采摘苹果的方法，其中第 1 个机械臂作为搜索臂用于识别苹果，第 2 个机械臂作为采摘臂进行收获。文献[17]阐述了一种双臂茄子收获机器人，该机器人布置两个多关节机械臂，可以实现同时收获两个茄子。文献[18]开发了一种双臂番茄收获机器人，该机器人可实现双臂协作采摘番茄。然而，国内外目前关于猕猴桃采摘应用多关节双臂并行作业的研究较少。同时，球体状的多关节机械臂工作空间难以与长方体状的棚架空间相适应，特别是在双臂并行采摘作业时，双臂间存在较大面积的果实漏采区域，底座固定的机械臂需要借助移动底盘反复切换位置才可以覆盖漏采区域，该过程会造成整机作业效率大幅损失。国内外研究人员通过研究多臂任务规划方法来提升采摘机器人的作业效率[19-20]，本文从优化设计多臂并行采摘空间的角度来降低作业效率的损失。

为解决双臂间因采摘区域不连续造成的果实漏采问题，本文采用理论与试验相结合的方法对双臂并行采摘平台进行设计。以采摘面积最大和公共区域占比最小为指标建立目标优化函数，并利用粒子群算法求解出最优采摘空间，在此基础上，建立双臂开链模型的位置层约束关系，最后设计双臂并行采摘平台样机并试验验证采摘空间的适应性及整机作业性能，以期为后续研究猕猴桃双臂并行采摘任务规划方法提供平台支撑。

1　总体结构与工作原理

1.1　棚架模型

以位于陕西省宝鸡市眉县猕猴桃实验站棚架式栽培的猕猴桃果园作为研究对象，猕猴桃果园场景特征如下：①果园棚架平均行宽 4 m，平均株间距 3 m，棚架平均高度 1.8 m。②树干间设有支撑钢管，钢管顶部用钢丝固定伸展枝条，使果实呈自然下垂状态生长。③果实分布在距离地面高度为 1.5 ~ 1.8 m 的空间范围内。④果园行间地面坚实平整可视作平面。

基于以上猕猴桃果园环境特征，建立棚架空间等效模型，如图 1 所示，该模型将作为双臂并行采摘

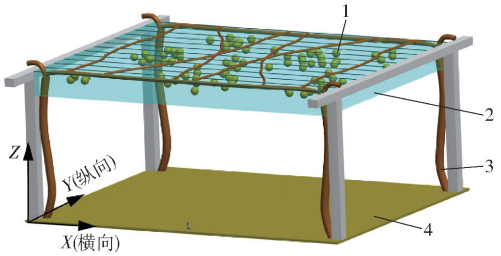


图 1　棚架空间等效模型

Fig. 1　Equivalent model of scaffolding space

1. 猕猴桃　2. 棚架空间　3. 果树　4. 果园地面

空间设计的依据。

1.2 整机结构

基于多关节机械臂搭建双臂并行采摘平台,如图 2 所示。该机器人平台由视觉系统、2 个采摘机械臂、末端执行器和移动平台组成。视觉系统采用 Intel RealSense D435i 型双目深度相机作为视觉传感器,通过眼在手上的布置方式以自下而上的方向进行猕猴桃果实目标识别与定位[21]。采摘机械臂为 UR5 多关节机械臂,该机械臂以高灵活性、安全性及轻便性的特点可以有效进行双臂并行作业。末端执行器由两个 3D 打印的仿形夹爪、光电传感器和气动部件组成,夹爪内侧曲面设计适应猕猴桃果实形状,以此方式减少采摘过程中的果实损伤。末端和相机总质量为 3.5 kg,果柄与果实分离力为 3 ~ 10 N[6],确定采摘机械臂最大工作负载为 4.5 kg,满足 UR5 机械臂对于有效载荷低于 5 kg 的要求。移动平台由履带式导航平台牵引运动至采摘区域,两个机械臂搭建在移动平台上执行果实采摘任务。

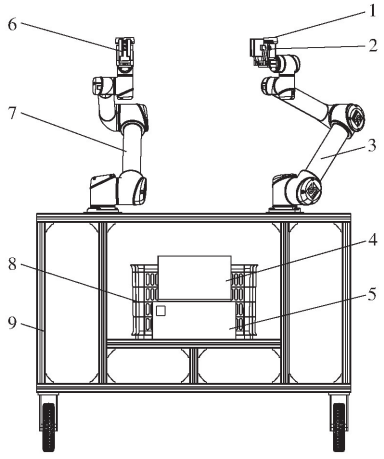


图 2 机器人总体结构图

Fig. 2 General structure diagram of robot

1. 深度相机 2. 光电传感器 3. 右机械臂 4. 计算机 5. 控制单元 6. 末端执行器 7. 左机械臂 8. 果实筐 9. 移动平台

1.3 工作原理

平台工作原理如图 3 所示。①间歇式移动平台经导航平台牵引运动至采摘区域。②2 个深度相机进行果实图像采集,实时将图像信息传输给机器人控制单元。③控制单元基于深度学习模型开展果实目标检测,通过检测彩色图像果实区域并提取对应的深度信息,结合相机内参矩阵求取果实目标相对于相机坐标系的空间坐标。④控制单元结合已标定的相机外参矩阵完成果实位置信息的外参转换,得到果实目标相对于各自机械臂基座坐标系的空间位置。⑤计算机以空间距离最短为原则制定果实采摘序列。⑥计算机控制双臂进行避障运动规划,机械臂接收指令运动至棚架空间底面对应的待采摘目标果实下方位置。⑦末端执行器竖直向上运动至目标位置,通过光电传感器信号控制末端手指抓取果实。⑧机械臂法兰关节旋转完成果实与果柄分离操作。⑨视觉系统更新反馈果实位置信息,双臂进行连续采摘作业,完成当前区域果实采摘任务。⑩移动平台以固定步距前进至下一个采摘区域。

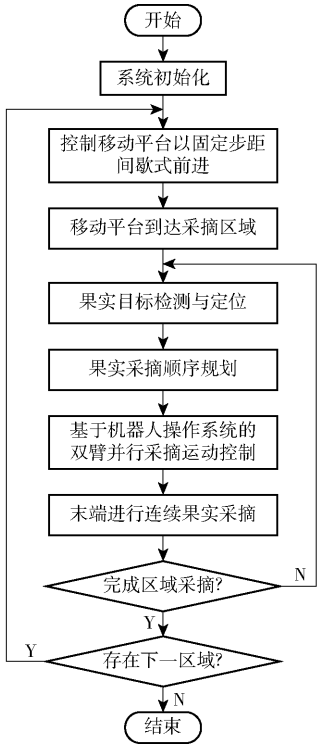


图 3 平台工作原理图

Fig. 3 Working principle chart of platform

2 最优采摘空间设计与运动学分析

2.1 机械手工作空间等效模型

采摘机械手工作空间反映机械手对棚架空间的覆盖能力,建立机械手工作空间等效模型,为下文双臂并行采摘空间设计提供模型依据。本文所述的猕猴桃采摘机械手工具中心点(Tool central point, TCP)具体参数为(0,70 mm,110 mm,0,0,0)。结合 UR5 机械臂连杆坐标系,采用标准 D-H 参数法对 UR5 机械臂进行正向运动学建模[22],如表 1 所示,各关节转角范围均为 -180° ~180°。依据表 1 参数计算得到机械臂正向运动学转换矩阵${}_6^0\boldsymbol{T}$为

$$ {}_6^0\boldsymbol{T} = {}_1^0\boldsymbol{T}_2^1\boldsymbol{T}_3^2\boldsymbol{T}_4^3\boldsymbol{T}_5^4\boldsymbol{T}_6^5\boldsymbol{T} \tag{1} $$

根据 TCP 参数,计算得到末端执行器与机械臂法兰关节之间的转换矩阵${}_t^6\boldsymbol{T}$。结合式(1)计算得到机械手正向运动学转换矩阵${}_t^0\boldsymbol{T}$为

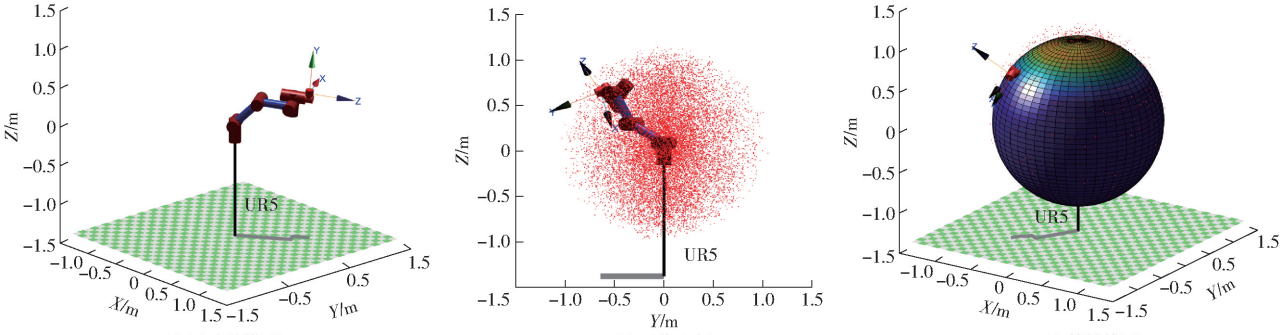
$$ {}_t^0\boldsymbol{T} = {}_6^0\boldsymbol{T}_t^6\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2} $$

表 1　UR5 机械臂 D－H 参数

Tab. 1　D－H parameters of UR5 robot arm

关节 i	连杆扭转角 α_{i-1}/(°)	连杆长度 a_i/mm	连杆偏移距离 d_i/mm	关节转角 θ_i
1	90	0	89.20	θ_1
2	0	－425	0	θ_2
3	0	－392	0	θ_3
4	90	0	109.30	θ_4
5	－90	0	94.75	θ_5
6	0	0	82.50	θ_6

通过利用 Matlab 机器人工具箱 Robotics Toolbox 建立采摘机械手运动学模型，如图 4a 所示。采用蒙特卡洛法进行机械手工作空间分析[23]，随机选取 30 000 组关节空间向量，在每个轴的运动范围内进行大量随机采样，通过正向运动学函数得到末端执行器工具中心点在空间中可到达位置，如图 4b 所示。结合机械手可达空间分布情况，将机械手工作空间等效为球心位于机械臂基座坐标系原点，半径 R_0 =0.90 m 的空间球体，机械手工作空间等效模型如图 4c 所示。



(a) 运动学模型　(b) 工作空间　(c) 等效模型

图 4　机械手工作空间等效模型

Fig. 4　Equivalent model of manipulator workspace

2.2　设计方案

双臂在移动平台上的安装方式主要包括平行安装、侧向安装和倾斜安装。倾斜和侧向安装方式中机械臂基座固定螺栓存在较大的弯曲应力，双臂运动过程中平台承载能力和作业稳定性受到影响，且双臂公共空间会随着安装角的增加逐渐缩减，直至侧向安装方式在棚架空间范围内没有公共空间[24]，造成大面积的果实漏采问题。相比之下，双臂平行安装具有宽裕的公共空间和作业稳定性，适合当前机器人作业场景。

面向猕猴桃果园整行果实采摘任务，本文采用多臂并行采摘方案，如图 5 所示，该方案在理想情况下可以确保机械手对棚架空间范围内分布的猕猴桃实现采摘全覆盖，进而避免因移动平台在棚架空间横向切换采摘位置导致作业效率大幅损失的问题[25]。但任意双臂横向静态采摘区域存在不连续现象，导致果实漏采问题，如图中白色圆圈标记的果实。同时，移动平台沿棚架空间纵向间歇式前进采摘时，漏采问题在双臂纵向动态采摘区域中表现更为严重。因此，双臂之间的空间布局和间歇式前进步距 Y_{step} 对于果实漏采问题和整机作业效率存在重要影响。为确保双臂并行采摘空间在横向和纵向的连续性，本文采用理论与试验相结合的方法对双臂并行采摘平台进行设计。

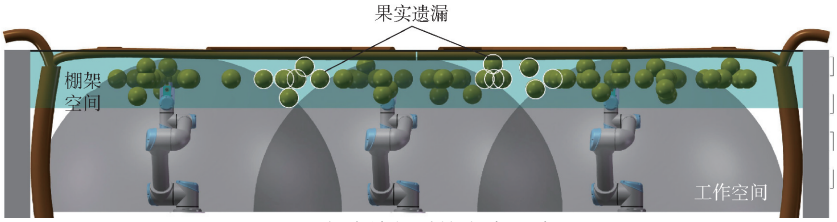


图 5　多臂并行采摘方案示意图

Fig. 5　Schematic of parallel harvesting with multiple robotic arms

2.3　设计变量

图 6 为猕猴桃棚架空间下方双臂并行采摘示意图。结合前文已建立的棚架空间和机械手工作空间等效模型，可得多关节双臂并行采摘效率为

$$E=\frac{N_{\text{fruits}}}{t_{\text{total}}}=\frac{\rho V_a}{\sum_{i=1}^{k} t_{\text{locate}}^{i}+t_{\text{plan}}+t_{\text{execute}}} \tag{3}$$

式中　E——采摘效率

N_{fruits}——区域果实总数量

t_{total}——区域果实收获总时间，s

ρ——每立方米果实数量

V_a——双臂静态采摘空间体积，m^3

k——目标识别定位次数

t_{locate}^{i}——单次果实识别定位时间，s

t_{plan}——双臂运动规划时间,s

$t_{execute}$——双臂运动执行时间,s

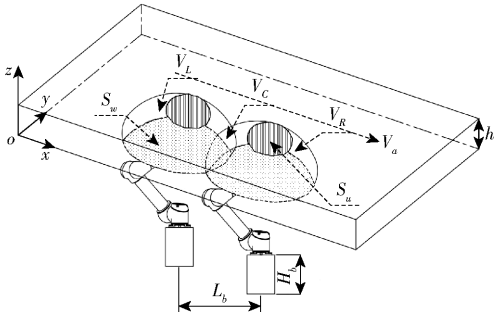


图 6 双臂并行采摘示意图

Fig. 6 Schematic of parallel harvesting with dual robotic arms

由于果实分布高度存在差异,采摘机器人需要多次识别定位完成区域果实采摘任务。双臂静态采摘空间体积 V_a 为

$$V_a = V_L + V_R - V_C \tag{4}$$

式中 V_L——左球台体积,m^3

V_R——右球台体积,m^3

V_C——相交体积,m^3

由于 $V_C \subset V_L$,$V_L = V_R$,定义相交体积 V_C 与左球台体积 V_L 之比为

$$K_V = \frac{V_C}{V_L} \tag{5}$$

联立式(4)、(5)可得

$$V_a = V_L(2 - K_V) \tag{6}$$

由球台体积公式计算得

$$V_L = \frac{1}{6}\pi h^3 + \frac{h}{2}(S_w + S_u) \tag{7}$$

式中 S_w——棚架空间底面与机械手工作空间等效模型相截面,m^2

S_u——棚架空间顶面与机械手工作空间等效模型相截面,m^2

h——棚架厚度,mm

联立式(3)、(6)、(7)可以得到

$$E = \frac{N_{fruits}}{t_{total}} = \frac{\rho\left[\frac{\pi h^3}{6} + \frac{h}{2}(S_w + S_u)\right](2 - K_V)}{\sum_{i=1}^{k} t_{locate}^{i} + t_{plan} + t_{execute}} \tag{8}$$

根据式(8)分析得到,影响双臂并行采摘效率的结构因素主要是 h、S_u、S_w 和 K_V。其中,棚架厚度 h 受果实自然分布高度影响,变量 S_u 和 S_w 受图中双臂安装高度 H_b 影响,变量 K_V 受图中双臂安装相对位置 L_b 影响,若变量 $K_V = 0$,则双臂采摘效率最大,但为避免区域内果实漏采问题,需要双臂采摘空间有公共区域,即 $K_V \neq 0$。

本文将双臂安装高度 H_b、双臂安装相对位置 L_b 和截面 S_u 的半径长度 R_u(间歇式前进步距 Y_{step})作为设计变量。

2.4 基于 MOPSO 多目标优化设计

2.4.1 目标函数建立

本文将双臂并行采摘空间参数设计的目标体系设置为 2 个子目标:采摘面积最大和公共区域占比最小,最大化的采摘面积可以保障双臂作业效率,最小化的公共区域可以保障双臂作业安全性。猕猴桃双臂并行采摘空间参数设计模型如图 7 所示。如图 7a 所示,为保证双臂作业效率,需要在机械臂工作空间中寻求最大范围适应棚架空间的矩形区域,同时为避免果实漏采,矩形区域定义为过两圆交点 p_1 和 p_2 的矩形 $CDFE$。定义矩形面积最大作为第 1 个目标函数,即

$$\max f_s(X) = 4L_b\sqrt{R_w^2 - \left(\frac{L_b}{2}\right)^2} \tag{9}$$

其中 $$R_w = \sqrt{R_0^2 - (1.5 - H_b)^2} \tag{10}$$

式中 R_w——最低工作截面半径,mm

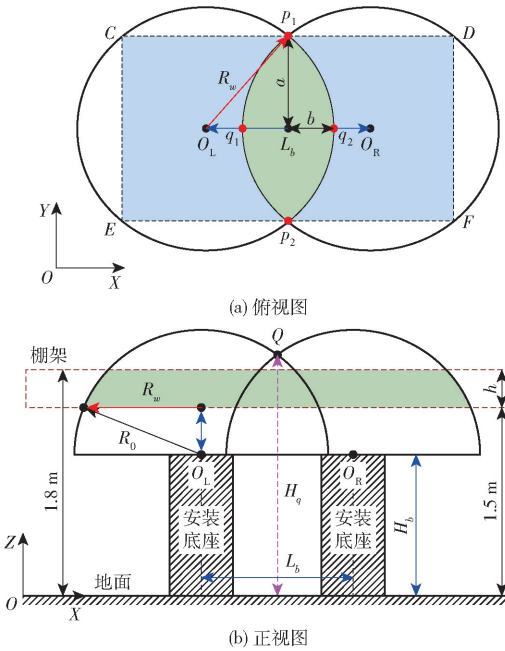


图 7 采摘空间参数设计模型

Fig. 7 Parametric model design of harvesting space

为保证双臂作业安全性,需要设计最优的公共区域,本文定义公共区域为过点 p_1、q_1、p_2、q_2,两半轴长度为 a 和 b 的椭圆区域。定义公共区域占比最小为第 2 个目标函数,即

$$\min f_v(X) = \frac{f_s\left(R_w - \frac{L_b}{2}\right)}{4L_bR_w^2} \tag{11}$$

2.4.2 约束条件

结合猕猴桃棚架空间和机械手工作空间等效模

型，确定参数设计范围为

$$\begin{cases} 0 < L_b < 2R_0 \\ 0 < H_b < 1.5\ \text{m} \\ 0 < R_w < R_0 \end{cases} \tag{12}$$

为保证图 7b 中双臂工作空间球体相交点 Q 高于棚架空间顶面高度，进而确保在任意果实分布高度下不存在果实漏采的情况，需要约束

$$g(X) = \sqrt{R_0^2 - \left(\frac{L_b}{2}\right)^2} + H_b \geqslant 1.8\ \text{m} \tag{13}$$

2.4.3　MOPSO 算法求解

采用自适应网格搜索的多目标粒子群优化算法（Multi-objective particle swarm optimization，MOPSO）求解该模型[26]，算法部署在 Matlab R2020b 环境，主要参数设置如下：种群数目 100，最大迭代次数 500，外部档案规模 100，加速常数 $c_1 = c_2 = 2$，惯性权重 $w = 0.4$，自适应网格法每一维目标函数网格数 20。MOPSO 算法具有一定的随机性，每次运行结果不尽相同，算法运行若干次，选取 Pareto 解集中参数 L_b 最大的非支配解作为双臂并行采摘平台空间布局的最优向量 $\boldsymbol{X}$，通过对最优向量进行圆整化处理，得到最终结果为 $\boldsymbol{X}$ = (870 mm，1 020 mm，450 mm)。

结合最优向量计算得到双臂并行采摘空间具体参数如表 2 所示。其中，双臂静态采摘空间体积 V_a 为 0.681 m^3，公共区域占比 K_V 为 0.217，移动平台纵向间歇式前进步距 Y_{step} 为 450 mm，双臂最大覆盖棚架空间底面横向长度 2 390 mm，最大覆盖棚架空间顶面横向长度 1 770 mm，该方案可以有效解决双臂间采摘区域不连续问题。

表 2　双臂并行采摘空间参数

Tab. 2　Harvesting space parameters of dual robotic arms in parallel

参数	V_a/m^3	V_L/m^3	V_C/m^3	S_w/m^2	S_u/m^2	K_V	R_w/mm	R_u/mm
数值	0.681	0.382	0.083	1.821	0.633	0.217	760	450

2.5　双臂运动学分析

猕猴桃双臂并行采摘机器人的协调运动属于松协调范畴，左臂和右臂分别针对不同目标果实进行采摘，形成一个开链结构[22]。本文结合双臂空间布局特点和猕猴桃分布位姿，建立了开链运动模型和基于位置约束的避障运动策略。通过建立位置层约束关系，使双臂完成并行采摘猕猴桃任务。

2.5.1　开链运动模型

如图 8 所示，以双臂各自独立采摘两个目标果实为例，推导双臂开链结构的运动学关系。设定平台全局坐标系为 $\{W\}$，左臂和右臂的基座坐标系分别为 $\{B_{\text{L}}\}$ 和 $\{B_{\text{R}}\}$，左臂和右臂的末端执行器坐标系分别为 $\{E_{\text{L}}\}$ 和 $\{E_{\text{R}}\}$。由于猕猴桃的果轴近似处于竖直方向，果实底部形状为圆形，因此双臂末端执行器保持初始位姿进行果实抓取，初始位姿为

$$\boldsymbol{E}_0 = (x_k, y_k, z_k, R_x, R_y, R_z) \tag{14}$$

其中　$R_x = \dfrac{\pi}{2}$　$R_y = 0$　$R_z = \pm\dfrac{\pi}{2}$

式中　(x_k, y_k, z_k)——果实定位坐标，mm

(R_x, R_y, R_z)——欧拉姿态角，rad

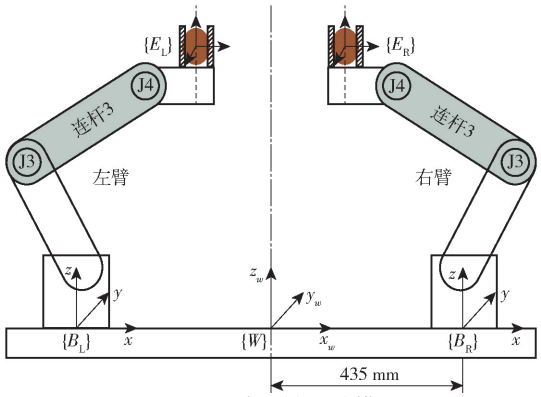


图 8　双臂开链运动模型

Fig. 8　Open chain motion model with dual robotic arms

双臂的末端执行器坐标系相对于平台全局坐标系的齐次变换矩阵 $\boldsymbol{T}_{E_L}^{W}$ 和 $\boldsymbol{T}_{E_R}^{W}$ 计算式为

$$\boldsymbol{T}_{E_L}^{W} = \boldsymbol{T}_{B_L}^{W}\boldsymbol{T}_{E_L}^{B_L} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{T}_{K_R}^{W} = \boldsymbol{T}_{B_R}^{W}\boldsymbol{T}_{E_R}^{B_R} \tag{16}$$

式中　$\boldsymbol{T}_{B_L}^{W}$——左臂的基座坐标系相对于平台全局坐标系的齐次变换矩阵

$\boldsymbol{T}_{B_R}^{W}$——右臂的基座坐标系相对于平台全局坐标系的齐次变换矩阵

$\boldsymbol{T}_{E_L}^{B_L}$——左臂的末端执行器坐标系相对于基座坐标系的齐次变换矩阵

$\boldsymbol{T}_{E_R}^{B_R}$——右臂的末端执行器坐标系相对于基座坐标系的齐次变换矩阵

齐次变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 中包含位置向量 $\boldsymbol{P}$ 和姿态矩阵 $\boldsymbol{R}$，其展开形式可表示为

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & \boldsymbol{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

将式(17)中的展开形式代入式(15)、(16)中可以得到

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{K_L}^{W} & \boldsymbol{P}_{K_L}^{W} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{B_L}^{W} & \boldsymbol{P}_{B_L}^{W} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{E_L}^{B_L} & \boldsymbol{P}_{E_L}^{B_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{K_R}^{W} & \boldsymbol{P}_{K_R}^{W} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{B_R}^{W} & \boldsymbol{P}_{B_R}^{W} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{E_R}^{B_R} & \boldsymbol{P}_{E_R}^{B_R} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{19}$$

将式(18)、(19)展开并化简，可以计算得到双臂末端执行器坐标系相对于平台全局坐标系的位置

向量和姿态矩阵为

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{E_L}^{W} = \boldsymbol{P}_{B_L}^{W} + \boldsymbol{R}_{B_L}^{W}\boldsymbol{P}_{E_L}^{B_L} \\ \boldsymbol{P}_{E_R}^{W} = \boldsymbol{P}_{B_R}^{W} + \boldsymbol{R}_{B_R}^{W}\boldsymbol{P}_{E_R}^{B_R} \\ \boldsymbol{R}_{E_L}^{W} = \boldsymbol{R}_{B_L}^{W}\boldsymbol{R}_{E_L}^{B_L} \\ \boldsymbol{R}_{E_R}^{W} = \boldsymbol{R}_{B_R}^{W}\boldsymbol{R}_{E_R}^{B_R} \end{cases} \tag{20}$$

式中，$\boldsymbol{P}_{B_L}^{W}$、$\boldsymbol{P}_{B_R}^{W}$、$\boldsymbol{R}_{B_L}^{W}$和$\boldsymbol{R}_{B_L}^{W}$均为常值向量和常值矩阵，具体参数可参考双臂空间布局最优向量计算得到。同时，$\boldsymbol{P}_{E_L}^{B_L}$、$\boldsymbol{P}_{E_R}^{B_R}$、$\boldsymbol{R}_{E_L}^{B_L}$和$\boldsymbol{R}_{E_R}^{B_R}$可将式(14)所示的目标位姿转换为齐次变换矩阵后计算得到。

2.5.2 位置约束关系

基于最优向量 $\boldsymbol{X}$ 布局的双臂开链结构，存在特殊的位置关系，即机械臂前两个连杆的活动范围半径(机械臂连杆 2 的长度)小于双臂安装相对位置的一半，具体表示为

$$\frac{L_b}{2} = 435\ \text{mm} > a_2 = 425\ \text{mm} \tag{21}$$

因此，双臂在前两个连杆之间不存在干扰问题。由于机械臂位置由前 3 个连杆所包含的关节确定，因此，双臂间存在碰撞风险的连杆和关节为连杆 3 及其所属的关节 3 和关节 4。

为保证双臂在中间区域作业的安全性，本文限制双臂关节 3 和关节 4 的横向位置越过平台全局坐标系中间分界面($x_w = 0$)。设定双臂关节 3 和关节 4 的横向位置坐标为$(x_l^{(3)}, x_l^{(4)}, x_r^{(3)}, x_r^{(4)})$，连杆半径 $R_L = 100$ mm，则位置约束关系具体表现为

$$(x_l^{(3)}, x_l^{(4)}) + R_L < 0 < (x_r^{(3)}, x_r^{(4)}) - R_L \tag{22}$$

由于猕猴桃果实底部形状为圆形，末端执行器夹爪为两指对置类型，因此，抓取角 R_z 属于可调节参数，且该参数取值范围对应左臂和右臂分别为$[0, \pi]$和$[-\pi, 0]$。同时，由于该机械臂构型满足 Piper 准则，逆运动学具有封闭形式解[27]。因此，通过调整抓取角，利用位置约束关系完成逆解筛选任务，从而选择出满足位置约束关系的安全位姿 E_a。

为验证该方法的执行效果，利用机器人工具箱 Robotics Toolbox 建立双臂运动学仿真模型，在中间分界面位置设定多组随机坐标点和抓取角形成目标位姿，结合逆解函数和位置变换函数求解出双臂关节 3 和关节 4 的位置坐标，利用位置约束关系选择出合适的抓取角形成安全位姿。由表 3 得到，双臂分别保持初始抓取角 $R_z = \pm\frac{\pi}{2}$能够满足中间区域多数果实的安全采摘任务，存在其他位置通过调整抓取角能够满足位置约束关系。

表 3 基于位置约束的抓取角仿真结果

Tab. 3 Simulation results of grasp angle based on position constraints

坐标	点坐标/mm	关节位置/mm	抓取角/rad
$(x_l^{(3)}, x_l^{(4)})$	(0,100,500)	(-51,-172)	π/2
	(0,200,520)	(-425,-56)	π/2
	(0,300,540)	(-350,-30)	π/2
	(0,-100,560)	(-375,-156)	2π/3
	(0,-200,580)	(-338,-187)	π/2
	(0,-300,600)	(-337,-193)	π/2
$(x_r^{(3)}, x_r^{(4)})$	(0,100,500)	(439,172)	-π/2
	(0,200,520)	(384,187)	-π/2
	(0,300,540)	(342,193)	-π/2
	(0,-100,560)	(477,96)	-π/2
	(0,-200,580)	(415,56)	-π/2
	(0,-300,600)	(340,-30)	-π/2

3 试验与结果分析

为验证基于最优向量布置的双臂能否全覆盖采摘棚架空间中的果实点，考量采摘空间的适应性及整机作业性能，本文设计了猕猴桃多关节双臂并行采摘平台，搭建了与最优采摘空间尺寸相对应的室内棚架环境，基于该平台进行了果实定位误差试验和双臂并行采摘试验。

3.1 双臂并行采摘平台软硬件系统集成

本研究后期试验阶段，受猕猴桃果实收获季节的影响，基于实验室猕猴桃棚架环境开展试验。图 9 为双臂并行采摘硬件平台，主要包括：①实验室棚架模型，长 × 宽 × 高为 2 000 mm × 1 500 mm × 1 800 mm。②多关节采摘机械臂，由 6 个旋转关节组

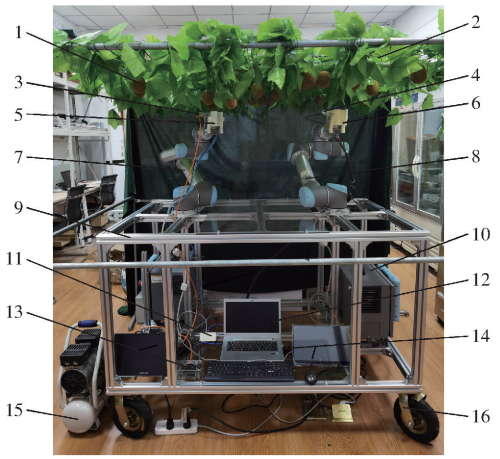


图 9 双臂并行采摘硬件平台

Fig. 9 Hardware platform of parallel harvesting with dual manipulators

1. 猕猴桃 2. 棚架模型 3、4. RealSense D435i 型深度相机 5、6. 末端执行器 7. 左机械臂 8. 右机械臂 9. 移动平台 10. 控制箱 11. 交换机 12. 便携式计算机 13、14. 图像计算单元 15. 压缩气泵 16. 万向轮

成，重复精度 ±0.1 mm，有效载荷为 5 kg。③移动平台长 × 宽 × 高为 1 500 mm × 1 000 mm × 1 020 mm。④深度相机为英特尔 RealSense D435i 型，最高分辨率为 1 280 像素 ×720 像素，深度测量范围为 0.4 ~6 m，数据接口为 USB3.0 Type - C。⑤两个嵌入式计算机为 NVIDIA Jetson Nano，图像计算单元为 NVIDIA MaxwellTM 架构，具有 128 个 NVIDIA CUDAR 核心，中央处理器单元为四核 ARM Cortex - A57 MPCore 处理器，操作系统为 Ubuntu 18.04。

基于机器人操作系统（Robot operation system，ROS）完成双臂并行采摘平台控制系统开发[28]。双臂运动控制模型如图 10 所示，多关节 UR5 机械臂模型采用统一描述格式（Unified robot description format，URDF）构建，左右机械臂基座坐标系基于同一世界坐标系建立，机械手工具中心点建立在末端执行器夹爪中心，利用 ROS - MoveIt！工具[29]完成对两个采摘机械手运动学模型配置，将机器人碰撞矩阵加载到集成工具包中。

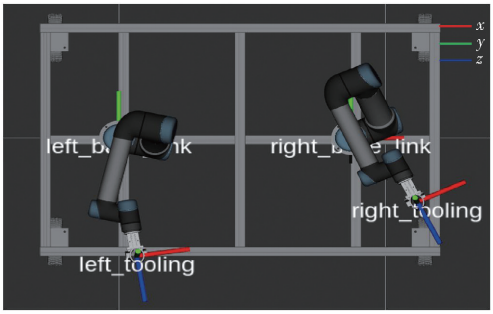


图 10　双臂运动控制模型

Fig. 10　Motion control model of dual manipulators

图 11 为基于 ROS - MoveIt！的双臂并行采摘控制系统示意图。通过部署多机分布式通讯系统完成两个采摘机械臂集成控制，图像处理单元将果实三维坐标信息以话题形式发布，两个采摘机械臂控制节点分别订阅目标果实空间位置话题，机械臂结合当前位姿和目标位姿利用开源运动规划库（Open motion planning library，OMPL）中随机扩展树算法和碰撞检测库（Flexible collision library，FCL）进行无碰撞路径规划。通过调用 ROS - MoveIt！运动规划组逆解器 IKFast 求解运动学逆解，形成采摘机械臂运动学组的动态轨迹，驱动双臂抵达各自目标果实位置，机械臂执行运动的最大加速度和最大速度系数均设置为 0.2，机械手完成当前目标果实采摘任务后，图像处理节点更新果实位置信息，直至完成所有果实采摘。

3.2　双臂手眼标定

为使采摘机械臂获取到相机坐标系中的果实定位信息（x_C，y_C，z_C）在自身基座坐标系中的空间位置（X_B，Y_B，Z_B），需要借助相机坐标系与机械臂基座坐标系之间的转换矩阵${}^B_C\boldsymbol{T}$完成坐标变换，计算式为

$$\begin{bmatrix} x_C & y_C & z_C & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = {}^B_C\boldsymbol{T} \begin{bmatrix} X_B & Y_B & Z_B & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{23}$$

由于相机采用眼在手上的布置方式，转换矩阵${}^B_C\boldsymbol{T}$存在关系式

$${}^B_C\boldsymbol{T} = {}^B_E\boldsymbol{T}\,{}^E_C\boldsymbol{T} \tag{24}$$

其中

$${}^E_C\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_{3\times3} & \boldsymbol{T}_{3\times1} \\ \boldsymbol{O}_{1\times3} & 1 \end{bmatrix}$$

式中　${}^B_E\boldsymbol{T}$——末端执行器坐标系与机械臂基座坐标系之间的转换矩阵

${}^E_C\boldsymbol{T}$——相机坐标系与末端执行器之间的转换矩阵

$\boldsymbol{R}_{3\times3}$——旋转变换矩阵

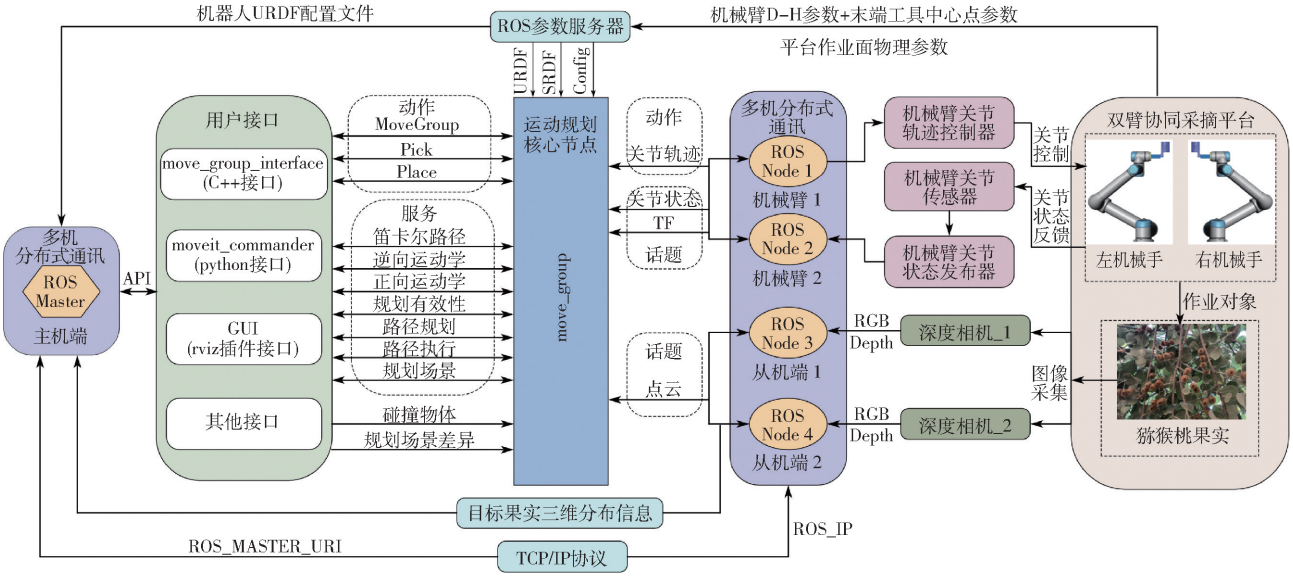


图 11　双臂并行采摘控制系统示意图

Fig. 11　Schematic of control system for parallel harvesting with dual manipulators

$\boldsymbol{T}_{3\times1}$——平移变换矩阵

$\boldsymbol{O}_{1\times3}$——零矩阵

由于${}_{E}^{B}\boldsymbol{T}$作为已知量等于式(2)中${}_{t}^{0}\boldsymbol{T}$,因此手眼标定是获取相机外参矩阵${}_{C}^{E}\boldsymbol{T}$。对于标定过程中机械臂任意两个位姿,存在等式关系

$$ {}_{E1}^{B}\boldsymbol{T}\,{}_{C1}^{E1}\boldsymbol{T}\,{}_{O}^{C1}\boldsymbol{T}={}_{E2}^{B}\boldsymbol{T}\,{}_{C2}^{E2}\boldsymbol{T}\,{}_{O}^{C2}\boldsymbol{T} \tag{25}$$

式中 ${}_{O}^{C}\boldsymbol{T}$——标定板坐标系与相机坐标系之间的转换矩阵

式(25)经过变换可得

$$ {}_{E2}^{B}\boldsymbol{T}\,{}_{E1}^{B}\boldsymbol{T}\,{}_{C1}^{E1}\boldsymbol{T}={}_{C2}^{E2}\boldsymbol{T}\,{}_{O}^{C2}\boldsymbol{T}\,{}_{O}^{C1}\boldsymbol{T} \tag{26}$$

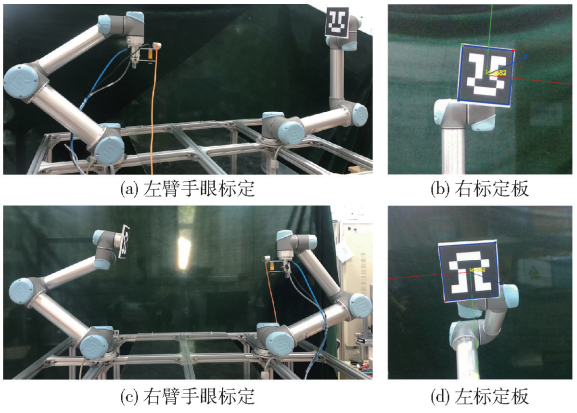
由式(26)计算得到相机外参转换矩阵${}_{C}^{E}\boldsymbol{T}$为

$$ \boldsymbol{A}\,{}_{C}^{E}\boldsymbol{T}={}_{C}^{E}\boldsymbol{T}\boldsymbol{B} \tag{27}$$

其中

$$ \begin{cases}\boldsymbol{A}={}_{E2}^{B}\boldsymbol{T}\,{}_{E1}^{B}\boldsymbol{T}\\ \boldsymbol{B}={}_{O}^{C2}\boldsymbol{T}\,{}_{O}^{C1}\boldsymbol{T}\\ {}_{C}^{E}\boldsymbol{T}={}_{C1}^{E1}\boldsymbol{T}={}_{C2}^{E2}\boldsymbol{T}\end{cases} \tag{28}$$

图 12a、12b 为左臂相机手眼标定过程,右臂固定标定板并保持当前位形,左臂移动采集标定板不同位姿,联立方程计算左相机外参矩阵。图 12c、12d 为右臂相机手眼标定过程,左臂固定标定板并保持当前位形,右臂移动采集标定板不同位姿,联立方程计算右相机外参矩阵。



(a) 左臂手眼标定 (b) 右标定板

(c) 右臂手眼标定 (d) 左标定板

图 12 手眼标定过程

Fig. 12 Hand-eye calibration process

3.3 试验方法

3.3.1 果实定位误差试验

基于 YOLO v4 深度学习模型开展猕猴桃果实目标识别任务[21,30],猕猴桃模型的果萼特征采用直径为 1 cm 的黑色贴纸等效,识别结果如图 13 所示。由于实验室环境下照明灯的光照强度较室外自然光照低,棚架无明显曝光区域,果实目标识别成功率高。

为保证末端执行器有效抓取果实,本试验对实验室环境下果实定位误差进行分析。猕猴桃果实坐标测量方法如图 14 所示,GLM40 型激光测距仪(博世,精度 ±2 mm)安装在机械臂基座平面,安装平面

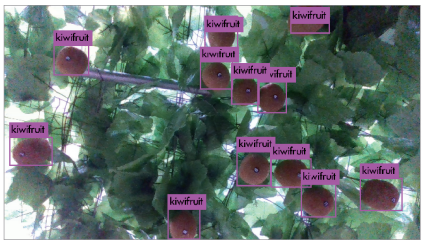


图 13 猕猴桃果实目标识别试验

Fig. 13 Experiment of kiwifruit target detection

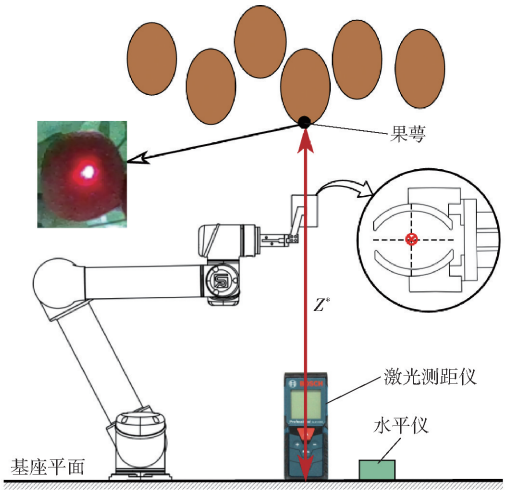


图 14 猕猴桃果实坐标测量方法示意图

Fig. 14 Schematic of method for measuring kiwifruit coordinates

放置水平仪,确保激光测距仪水平安装,具体坐标测量方法如下:首先移动激光测距仪使激光光束照射到目标果实果萼位置,然后控制机械臂末端执行器保持如式(14)所示的目标姿态一定,然后拖动机械臂使激光光束穿过夹爪中心,最后在机械臂控制箱读取果实水平坐标(X^*,Y^*),在激光测距仪界面读取果实深度坐标 Z^*。猕猴桃果实识别坐标获取方法:首先以 ROS 话题形式订阅果实识别标记框中心点的像素坐标并完成对应深度的映射,然后结合相机内参和外参转换矩阵计算得到果实目标相对于机械臂基座坐标系的识别坐标(X', Y', Z')。

3.3.2 双臂并行采摘试验

本试验采用双臂分区分层作业方式。如图 15 所示,结合双臂空间布局特点,将采摘空间横向划分为左臂空间 L、右臂空间 R 和共享空间 M。结合棚架厚度特点,将棚架厚度间隔 100 mm 划分为一层,分别为底层Ⅰ、中间层Ⅱ、顶层Ⅲ。结合移动平台最大间歇式前进步距特点,将棚架空间纵向划分为区域 1 和区域 2。本试验进行 2 次 3 组采摘试验,第 1 次 3 组采摘试验面向区域 1 中的果实,第 2 次 3 组采摘试验面向区域 2 中的果实:移动平台保持固定,棚架模型纵向前进 450 mm,区域 1 变为已完成作业的区域 F1,区域 2 变为当前采摘任务区域。具体 3

组试验设定如下：试验 1 果实分布在棚架空间底层，区域 $L_{Ⅰ}$、$R_{Ⅰ}$、$M_{Ⅰ}$ 果实数量分别为 10、10、15 个；试验 2 果实分布在棚架空间中间层，区域 $L_{Ⅱ}$、$R_{Ⅱ}$、$M_{Ⅱ}$ 果实数量分别为 7、7、10 个；试验 3 果实分布在棚架空间顶层，区域 $L_{Ⅲ}$、$R_{Ⅲ}$、$M_{Ⅲ}$ 果实数量分别为 5、5、7 个。统计试验过程中未成功遍历果实数量和未成功采摘果实数量以及双臂冲突次数，利用秒表计时统计采摘时间。本试验以果实位置遍历成功率、果实采摘成功率和平均单果采摘时间作为评价指标，这 3 项评价指标分别定义为采摘空间中成功遍历果实数量、成功采摘果实数量以及果实采摘总时间与区域果实总数量的比值。

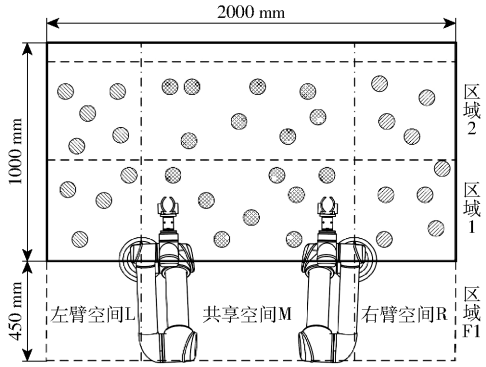


图 15　双臂并行采摘试验方法示意图

Fig. 15　Schematic of experiment method for parallel harvesting with dual manipulators

3.4　结果与分析

3.4.1　果实定位误差试验

试验针对左臂进行了 10 组果实定位误差测量，结果如表 4 所示。其中，果实平均水平定位误差为 5.0 mm，果实平均深度定位误差为 8.3 mm。末端执行器两个夹爪间隔 65 mm，猕猴桃果实大径平均值为 52.16 mm[31]，末端执行器夹爪两侧有效行程余量 6.42 mm。果实水平定位误差可通过末端执行器有效行程余量容错解决，深度定位误差通过对末端执行器工具中心点坐标进行深度补偿解决。果实定位误差满足采摘机械手定位精度的要求，末端执行器能够有效抓取目标果实。

3.4.2　双臂并行采摘试验

双臂在共享空间采摘过程如图16所示。首先

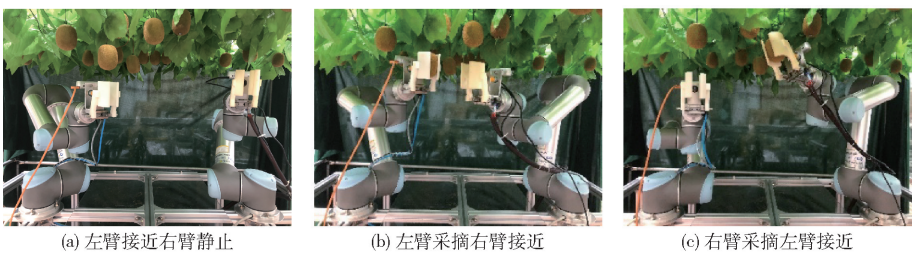
表 4　果实定位误差结果

Tab. 4　Fruits positioning error results

识别坐标 (X', Y', Z')/mm	测量坐标 (X^*, Y^*, Z^*)/mm	定位误差 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$/mm
(255, -331, 549)	(248, -323, 560)	(7, 8, 11)
(341, 255, 620)	(344, 259, 627)	(3, 4, 7)
(219, 424, 605)	(220, 430, 611)	(1, 6, 6)
(-450, 269, 615)	(-455, 277, 624)	(5, 8, 9)
(-97, -224, 612)	(-106, -219, 602)	(9, 5, 10)
(510, 159, 618)	(512, 160, 623)	(2, 1, 5)
(79, 465, 620)	(84, 458, 629)	(5, 7, 9)
(562, -176, 626)	(556, -170, 638)	(6, 6, 12)
(580, -495, 560)	(583, -500, 566)	(3, 5, 6)
(-392, 567, 591)	(-400, 565, 599)	(8, 2, 8)

左臂进入采摘空间并到达目标果实下方位置，右臂位于初始位姿（图 16a）；随后右机械臂运动规划进入采摘空间接近待采摘目标果实，左臂竖直向上抓取并旋转采摘果实（图 16b）；接下来左臂运动规划接近下一目标果实，右臂竖直向上抓取并旋转采摘果实（图 16c）。该采摘过程考虑在其中一个机械臂大范围运动接近目标果实的作业过程中，另一个机械臂处于局部小范围运动作业状态，以此方式保证双臂在共享空间作业时运动规划的高效性和安全性。

双臂并行采摘试验结果如表 5 所示。双臂在两侧独立采摘空间果实位置遍历成功率分别为 90.91% 和 93.18%，果实采摘成功率分别为 86.36% 和 81.82%，平均单果采摘时间分别为 4.80、4.61 s。双臂在共享采摘空间果实位置遍历成功率 92.19%，果实采摘成功率为 78.13%，平均单果采摘时间为 8.17 s。综合计算得到，双臂并行采摘平均果实位置遍历成功率为 92.09%，平均果实采摘成功率为 82.10%，平均单果采摘时间为 5.86 s。其中，双臂在两侧独立采摘空间作业时不存在运动冲突问题，双臂在共享空间中作业时共存在 8 次运动冲突的情况，通过位姿调整使机械臂继续选择满足位置约束关系的安全位姿重新完成运动规划。未成功遍历的果实主要是位于机械臂基座坐标系原点附近的果实，由于机械臂目标构型奇异造



(a) 左臂接近右臂静止　(b) 左臂采摘右臂接近　(c) 右臂采摘左臂接近

图 16　双臂共享空间采摘过程

Fig. 16　Harvesting process with dual manipulators in public areas

表 5 双臂并行采摘试验结果

Tab. 5 Experiment results of parallel harvesting with dual manipulators

采摘空间	果实数量/个	未成功遍历果实数量/个	未成功采摘果实数量/个	采摘时间/s	双臂冲突次数/次	位置遍历成功率/%	采摘成功率/%	平均单果采摘时间/s
左臂空间	10($L_{1-Ⅰ}$)	2	2	48		90.91	86.36	4.80
	7($L_{1-Ⅱ}$)	0	0	34	0			
	5($L_{1-Ⅲ}$)	0	1	23				
	10($L_{2-Ⅰ}$)	1	1	50				
	7($L_{2-Ⅱ}$)	0	1	36	0			
	5($L_{2-Ⅲ}$)	1	1	20				
右臂空间	10($R_{1-Ⅰ}$)	2	3	44		93.18	81.82	4.61
	7($R_{1-Ⅱ}$)	1	2	30	0			
	5($R_{1-Ⅲ}$)	0	1	23				
	10($R_{2-Ⅰ}$)	0	1	47				
	7($R_{2-Ⅱ}$)	0	0	34	0			
	5($R_{2-Ⅲ}$)	0	1	25				
共享空间	15($M_{1-Ⅰ}$)	1	2	123		92.19	78.13	8.17
	10($M_{1-Ⅱ}$)	0	2	78	3			
	7($M_{1-Ⅲ}$)	0	0	52				
	15($M_{2-Ⅰ}$)	2	4	130				
	10($M_{2-Ⅱ}$)	2	4	85	5			
	7($M_{2-Ⅲ}$)	0	2	55				

成运动规划失败。果实采摘失败的主要原因有:果实被树叶遮挡未成功检测;果实定位误差造成末端未能抓取果实;果实分布在机械臂奇异点位置;特别在共享空间内,双臂交叉采摘造成难以产生无碰撞运动路径;采摘过程中棚架振动造成双臂间相互干扰果实抓取。试验结果验证了双臂能够全覆盖遍历除奇异点外的所要求的目标果实点,解决了因作业区域不连续造成的果实漏采问题。

4 结论

(1)以采摘面积最大和公共区域占比最小为指标建立目标函数,利用粒子群算法求解出最优双臂安装相对位置 870 mm、最优双臂安装高度 1 020 mm 和移动平台最大间歇式前进步距 450 mm,解决了双臂间采摘区域不连续的问题。

(2)双臂在共享空间中作业时通过局部调整抓取角使双臂满足位置层约束关系,保证中间区域多数果实的安全采摘任务。

(3)果实定位误差试验结果表明,果实平均水平定位误差为 5.0 mm,平均深度定位误差为 8.3 mm,基本满足猕猴桃采摘作业要求。

(4)双臂并行采摘试验结果表明,平均果实位置遍历成功率 92.09%,验证了采摘空间的覆盖能力,平均果实采摘成功率 82.10%,平均单果采摘时间 5.86 s,双臂仅在共享空间存在较低的碰撞风险,验证了双臂并行采摘平台的作业可行性。

参 考 文 献

[1] 吴麒宇,祁春节,程运江,等. COVID-19 新冠疫情对全球猕猴桃商贸影响剖析[J]. 果树学报,2021,38(10):1790-1801.
WU Qiyu, QI Chunjie, CHENG Yunjiang, et al. Impact of the COVID-19 on global trade of kiwifruit[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(10): 1790-1801. (in Chinese)

[2] GUROO I, WANI S A, WANI S M, et al. A review of production and processing of kiwifruit[J]. J. Food Process Technol., 2017, 8(10): 699.

[3] MU Longtao, LIU Haozhou, CUI Yongjie, et al. Mechanized technologies for scaffolding cultivation in the kiwifruit industry: a review[J]. Information Processing in Agriculture, 2018, 5(4): 401-410.

[4] OLIVEIRA L, MOREIRA A P, SILVA M F. Advances in agriculture robotics: a state-of-the-art review and challenges ahead [J]. Robotics, 2021, 10(2): 52.

[5] SILWAL A, DAVIDSON J R, KARKEE M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1140-1159.

[6] MU L, CUI G, LIU Y, et al. Design and simulation of an integrated end-effector for picking kiwifruit by robot[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(1): 58-71.

[7] 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 of tomato picking robot in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 41-49. (in Chinese)

[8] ARAD B, BALENDONCK J, BARTH R, et al. Development of a sweet pepper harvesting robot[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 1027-1039.

[9] 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.

[10] 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)

[11] 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)

[12] WILLIAMS H, JONES M H, NEJATI M, et al. Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms[J]. Biosystems Engineering, 2019, 181: 140 - 156.

[13] AU C K, BARNETT J, LIM S H, et al. Workspace analysis of Cartesian robot system for kiwifruit harvesting[J]. Industrial Robot, 2020, 47(4): 503 - 510.

[14] AVIGAD G, SALOMON S, KAHANI A, et al. Robotic fruit harvesting machine with fruit-pair picking and hybrid motorized-pneumatic robot arms: US16665013[P]. 2020 - 04 - 30.

[15] DAVIDSON J R, HOHIMER C J, MO C, et al. Dual robot coordination for apple harvesting[C]// ASABE International Meeting, 2017.

[16] SARABU H, AHLIN K, HU A P. Leveraging deep learning and RGB - D cameras for cooperative apple-picking robot arms [C]// ASABE Annual International Meeting, Boston, 2019.

[17] SEPULVEDA D, FERNANDEZ R, NAVAS E, et al. Robotic aubergine harvesting using dual-arm manipulation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 121889 - 121904.

[18] LING X, ZHAO Y, GONG L, et al. Dual-arm cooperation and implementing for robotic harvesting tomato using binocular vision[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 114: 134 - 143.

[19] 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 CSAE, 2021, 37(2): 1 - 10. (in Chinese)

[20] ZION B, MANN M, LEVIN D, et al. Harvest-order planning for a multi-arm robotic harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 103: 75 - 81.

[21] 穆龙涛,高宗斌,崔永杰,等. 基于改进 AlexNet 的广域复杂环境下遮挡猕猴桃目标识别[J]. 农业机械学报,2019,50(10):24 - 34.
MU Longtao, GAO Zongbin, CUI Yongjie, et al. Kiwifruit detection of far-view and occluded fruit based on improved AlexNet [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 24 - 34. (in Chinese)

[22] 张莎莎. 猕猴桃双臂协调采摘方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
ZHANG Shasha. Control method of dual arm picking robot for kiwifruit[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[23] 刘志忠,柳洪义,罗忠,等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进[J]. 农业机械学报,2013,44(1):230 - 235.
LIU Zhizhong, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Improvement on Monte Carlo method for robot workspace determination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1): 230 - 235. (in Chinese)

[24] KHAN H, ABBASI S J, LEE M C. Optimal torso design selection for dual 7 - DOF robot arm using von Mises stress and workspace analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(9):4149 - 4159.

[25] BARNETT J, DUKE M, CHI K A, et al. Work distribution of multiple cartesian robot arms for kiwifruit harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105202.

[26] 杨俊杰,周建中,方仍存,等. 基于自适应网格的多目标粒子群优化算法[J]. 系统仿真学报,2008,20(21):5843 - 5847.
YANG Junjie, ZHOU Jianzhong, FANG Rengcun, et al. Multi-objective particle swarm optimization based on adaptive grid algorithms[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(21): 5843 - 5847. (in Chinese)

[27] 陈禹含,韩宝玲,王善达,等. 结合旋量理论和代数方法的六自由度机械臂逆运动学求解算法[J]. 科学技术与工程,2021,21(25): 10762 - 10767.
CHEN Yuhan, HAN Baoling, WANG Shanda, et al. Inverse kinematic solution algorithm of 6 - DOF robot arm with combination of screw theory and algebraic methods[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25) : 10762 - 10767. (in Chinese)

[28] 胡春旭. ROS 机器人开发实践[M]. 北京:机械工业出版社,2018.

[29] HERNANDEZ-MENDEZ S, MALDONADO-MENDEZ C, MARIN-HERNANDEZ A, et al. Design and implementation of a robotic arm using ROS and MoveIt! [C]// International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), IEEE, 2017.

[30] FU Longsheng, FENG Yali, WU Jingzhu, et al. Fast and accurate detection of kiwifruit in orchard using improved YOLOv3-tiny model[J]. Precision Agriculture, 2020, 22(3): 1 - 23.

[31] 穆龙涛. 全视场猕猴桃果实信息感知与连贯采摘机器人关键技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
MU Longtao. Full field of view information perception and integrated picking method for kiwifruit harvesting robot[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)