

基于工作空间的果园作业平台结构参数优化与试验

樊桂菊^{1,2} 李 钊^{1,3} 毛文华⁴ 娄 伟^{1,3} 梁 昭¹ 姜红花⁵

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018; 4. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;
5. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271018)

摘要: 为提高果园作业平台的适用性和操作灵活性,根据乔砧密植的纺锤形苹果种植模式确定其目标工作空间,以工作空间尺寸偏差、工作空间体积和平均可操作度描述其可达工作空间性能,分析了平台主要结构参数杆长和关节变量(关节角、连杆偏移)对工作空间性能的影响。建立了以可达工作空间性能和结构紧凑为指标的优化模型,利用遗传算法求解得出最优参数为:杆2和杆4的长度分别为988、879 mm,关节1、3的关节角范围分别为 $[107^{\circ}, 256^{\circ}]$ 、 $[-118^{\circ}, -76^{\circ}]$,关节5、6的连杆偏移最大值分别为720、340 mm。优化后其可达工作空间尺寸偏差分别减小96.09%、95.60%,体积减小4.69%,平均可操作度增加1.43%。对优化后的果园作业平台进行了实地果园工作空间试验,结果表明:承载质量为65 kg、横坡坡度为 15° 、纵坡坡度为 15° 时,工作空间尺寸偏差最大,分别为16.2、16.7 mm,比原型分别减小93.89%、93.76%。

关键词: 果园作业平台; 工作空间; 遗传算法; 层次分析法; D-H法

中图分类号: S225.93; TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0034-09 OSID: 

Structure Parameter Optimization and Experiment of Orchard Platform Based on Workspace

FAN Guiju^{1,2} LI Zhao^{1,3} MAO Wenhua⁴ LOU Wei^{1,3} LIANG Zhao¹ JIANG Honghua⁵

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
4. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
5. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to improve the applicability of the orchard operation platform, the target workspace according to the planting mode was determined. The kinematics model established based on D-H method was derived on the basis of prototype development. The dimension deviation, volume and average operability of the platform were calculated as the indexes to evaluate the performance of the reachable workspace simulated by Monte Carlo method. The influence of the platform structure parameter rod length and joint variables (joint angle and link offset) on these three indexes were analyzed. The optimization function established by taking the performance of reachable workspace and compact structure as the optimization index was transformed into a single objective optimization function by analytic hierarchy process. The optimal parameters obtained by genetic algorithm were as follows: the length of rod 2 was 988 mm, the length of rod 4 was 879 mm, the range of joint angle 1 was $[107^{\circ}, 256^{\circ}]$, the range of joint angle 3 was $[-118^{\circ}, -76^{\circ}]$, and the maximum value of link offset 5 and 6 was 720 mm and 340 mm, respectively. Compared with the prototype, the dimension deviation of reachable workspace was decreased by 96.09% and 95.60%, volume was decreased by 4.69%, average operability was increased by 1.43%, sum of rod length was increased by 4.85%, and sum of joint variables was decreased by 3.11%. A three-factor three-level test with the platform load, cross slope angle and

收稿日期: 2020-07-28 修回日期: 2020-09-27

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018MC017)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ001)、国家重点研发计划项目(2018YFD0700604)和山东省园艺机械与装备重点实验室项目(YYJX-2019-07)

作者简介: 樊桂菊(1979—),女,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: fanguiju2002@163.com

通信作者: 姜红花(1971—),女,教授,主要从事物联网与自动控制研究,E-mail: j_honghua@sda.u.edu.cn

longitudinal slope angle as factors was designed. After the field test of the prototype workspace at orchard, the test results showed that when the load was 65 kg, the cross slope was 15° and the longitudinal slope was 15°, the deviation between the actual reachable workspace and the target workspace was 16.2 mm and 16.7 mm, which were reduced by 93.89% and 93.76% , respectively. The research result can provide a reference for the structural parameter optimization of similar agricultural machinery.

Key words: orchard platform; workspace; genetic algorithm; analytic hierarchy process; D－H method

0 引言

水果种植属于劳动密集型产业。为降低剪枝、疏花疏果、采摘等作业环节的劳动强度,提高工作效率,学者们研制了多种类型辅助人工操作的果园作业平台^[1-4],根据升降机构的不同,作业平台可分为剪叉式和臂式。水果种类繁多,各地种植模式不同^[5],果园作业平台的工作空间直接影响其适用性。因此,开展基于工作空间的果园作业平台结构参数优化研究对其推广应用具有重要意义。

针对考虑工作空间的结构参数优化问题,吴超宇等^[6]以提出的全局混合性能指标为目标函数,利用粒子群算法优化得到直线驱动型并联机器人的最优尺寸参数。权龙哲等^[7]以包容目标工作空间及杆长因素为目标,采用遗传算法优化立体苗盘管理机器人的结构参数。丁渊明等^[8]提出以工作空间和能量消耗综合指标为目标函数,使用遗传算法优化机械臂结构参数。孙小勇等^[9]通过分析并联机构结构尺寸对工作空间的影响确定了结构参数的优化范围,利用 fminimax 函数求解得到优化后的结构参数。

基于工作空间的结构参数优化主要集中在机器人或机械臂等方面,针对果园机械的相关研究较少。本文基于已研制的果园作业平台,以乔砧密植的纺锤形苹果种植模式确定其目标工作空间,采用网格迭代算法计算可达工作空间体积,分析平台结构参数对其空间性能的影响规律,建立以空间性能和结构紧凑为指标的多目标优化函数,利用遗传算法求解最优参数,并通过仿真与试验进行验证,以期提高果园作业平台的适用性和可操作性。

1 果园作业平台工作空间分析

1.1 运动学模型

前期研制的果园作业平台主要由动力装置、行走机构、回转机构、升降机构、调平机构、工作台和控制系统等组成,实现工作台升降、旋转和坡地调平等功能。其结构、工作原理和运动学方程见文献[10],但未考虑操作人员在工作台的左右和前后移动。为更好地描述平台可操作性和各机构运动,将原参考点在竖直方向上移动至成人肩高^[11]位置作为平台执

行末端参考点,建立 D－H 坐标系^[12-13],如图 1 所示。其中, $l_1 \sim l_5$ 为各杆长度,分别为 964、812、210、900、680 mm。各参数如表 1 所示,表中 α_i 、 a_i 、 d_i 、 θ_i (i 为关节编号, $i=1,2,\cdots,6$)分别表示连杆转角、连杆长度、连杆偏移和关节角。 d_{5min} 为工作台铰接点安装距离,为 70 mm; d_{6max} 与 d_{6min} 互为相反数,使工作台关于横梁对称以保持平衡。其运动学方程为

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} R_0^6 & P_0^6 \\ O & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$P = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T$$
$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

式中 R ——姿态矩阵 P ——位置矩阵
 $n、o、a、p$ ——关于 θ_i 与 d_i 的函数
 O ——零矩阵

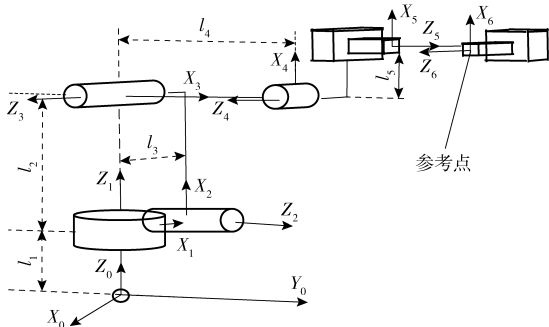


图 1 果园作业平台坐标系
Fig. 1 Coordinate system of orchard platform

表 1 果园作业平台 D－H 参数

Tab. 1 D－H parameter of orchard platform

关节	$\alpha_i/(^\circ)$	a_i	d_i	θ_i	$\theta_i(d_i)$ 范围
1	0	0	l_1	θ_1	$[90^\circ, 270^\circ]$
2	90	l_3	0	θ_2	$[85^\circ, 105^\circ]$
3	-90	l_2	l_3	θ_3	$[-115^\circ, -75^\circ]$
4	0	l_4	0	θ_4	$[60^\circ, 110^\circ] \cap [-10^\circ - \theta_3, 10^\circ - \theta_3]$
5	90	l_5	d_5	0	$[70 \text{ mm}, 710 \text{ mm}]$
6	-90	0	d_6	0	$[-320 \text{ mm}, 320 \text{ mm}]$

1.2 目标工作空间

果园作业平台的目标工作空间是其结构参数设

计和优化的重要依据,与果园地形、果树种类和种植模式密切相关。而我国果树种类繁多,种植模式各异,为使作业平台能够灵活、高效地在复杂环境中进行升降、旋转和调平等动作,实现辅助人工完成剪枝、疏花疏果、套袋及果实采摘等作业环节,结合作业平台的通用性,本文以种植面积位居前列的苹果为研究对象,目前其种植模式仍以乔砧密植为主,树形多为纺锤形^[14-15],株距为 3 ~ 4 m,行距 4 ~ 5 m,株高为 2.8 ~ 3.5 m,主干高度为 0.6 ~ 1.0 m,冠径为 1.4 ~ 3.0 m。以 O_0 为坐标原点, X 轴为行距方向, Y 轴为平台前进方向, Z 轴为株高方向,平台参考点的目标工作空间如图 2 所示。其中,阴影部分为平台参考点的目标工作空间; D_{tx} 、 D_{ty} 、 D_{tz} 分别表示目标工作空间在 X 、 Y 、 Z 方向范围,分别为 $[-((L_0-L_d)/2-L_r),(L_0-L_d)/2-L_r]$ 、 $(0,D_0/2-L_r]$ 、 $[H_r+L_r,H_s-L_r]$,其中 L_0 为行距, L_d 为冠径, D_0 为株距, H_r 为成人肩高, H_s 为株高, L_r 为成人掌心与肩膀距离。

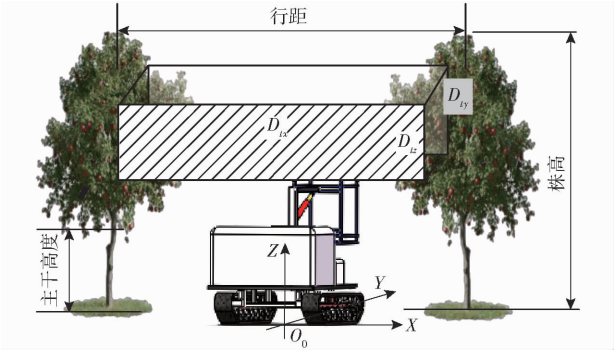


图 2 参考点目标工作空间示意图

Fig. 2 Schematic of reference point target workspace

为使平台最大限度地满足作业需求,各参数取值为: L_0 、 D_0 、 H_s 分别取最大值,冠径取最小值,由文献[11]可知,成人掌心与肩膀距离取 0.5 m,肩高取 1.4 m。得目标工作空间在 X 、 Y 、 Z 方向范围分别为: D_{tx} 为 $[-1\ 300\text{ mm},1\ 300\text{ mm}]$ 、 D_{ty} 为 $(0,1\ 500\text{ mm}]$ 、 D_{tz} 为 $[1\ 900\text{ mm},3\ 000\text{ mm}]$ 。

1.3 可达工作空间

平台参考点的可达工作空间指在各关节约束下参考点运动学方程所有解的集合。本文采用改进的蒙特卡洛法^[10]得到其工作空间点云图,如图 3 所示。由图 3 可知,参考点可达工作空间在 X 、 Y 、 Z 方向范围分别为: D_{rx} 为 $[-1\ 781\text{ mm},1\ 802\text{ mm}]$ 、 D_{ry} 为 $[-730\text{ mm},1\ 819\text{ mm}]$ 、 D_{rz} 为 $[1\ 190\text{ mm},2\ 917\text{ mm}]$ 。

2 可达工作空间性能指标

2.1 工作空间尺寸偏差

由上文可知,作业平台参考点的可达工作空间

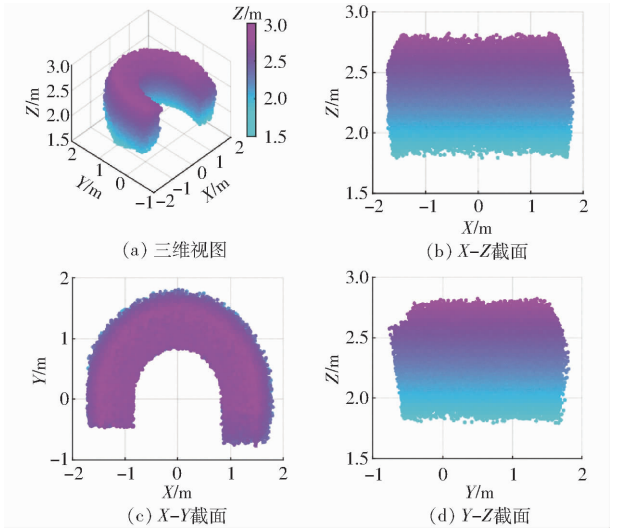


图 3 参考点可达工作空间点云图

Fig. 3 Reference point reachable workspace point cloud

与目标工作空间存在偏差, X 方向和 Y 方向偏差可以通过调整平台底盘位置消除,因此本文仅研究 Z 方向偏差。

对比图 2 和图 3,为保证操作人员对两行果树有效作业,以 μ_{z1} 和 μ_{z2} 描述平台工作空间尺寸偏差,计算式为

$$\begin{cases} \mu_{z1} = |Z_{tmax} - Z_{r1max}| + |Z_{tmin} - Z_{r1min}| \\ \mu_{z2} = |Z_{tmax} - Z_{r2max}| + |Z_{tmin} - Z_{r2min}| \end{cases} \quad (2)$$

式中 Z_{r1max} 、 Z_{r1min} —— X 为 $-1\ 300\text{ mm}$ 时可达工作空间中 Z 的最大值、最小值,mm

Z_{r2max} 、 Z_{r2min} —— X 为 $1\ 300\text{ mm}$ 时可达工作空间中 Z 的最大值、最小值,mm

Z_{tmax} 、 Z_{tmin} ——目标工作空间在 Z 方向的最大值、最小值,mm

2.2 工作空间体积

工作空间体积^[16]是表述作业平台工作能力的重要参数。为得到较高精度的空间体积,本文采用网格迭代算法^[17]。设某子网格编号为 N_{umi} ,其相邻网格编号如图 4 所示,算法流程如图 5 所示。

通过多次迭代计算平台参考点的工作空间体

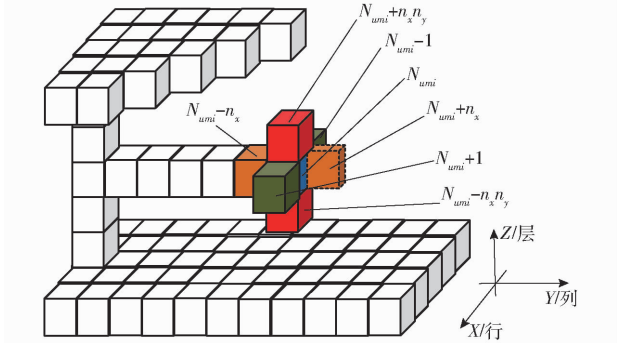


图 4 网格编号示意图

Fig. 4 Schematic of grid numbering

积, 体积迭代差计算式为

$$\varepsilon = \frac{V_j - V_{j-1}}{V_{j-1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 V_j, V_{j-1} ——第 $j, j-1$ 次迭代工作空间体积, m^3

以体积迭代差 $\varepsilon \leq 0.1\%$ 为体积收敛标准。图 6 为工作空间体积迭代变化曲线, 第 16 次迭代时体积迭代差为 0.045% , 故取工作空间体积为 4.26 m^3 。

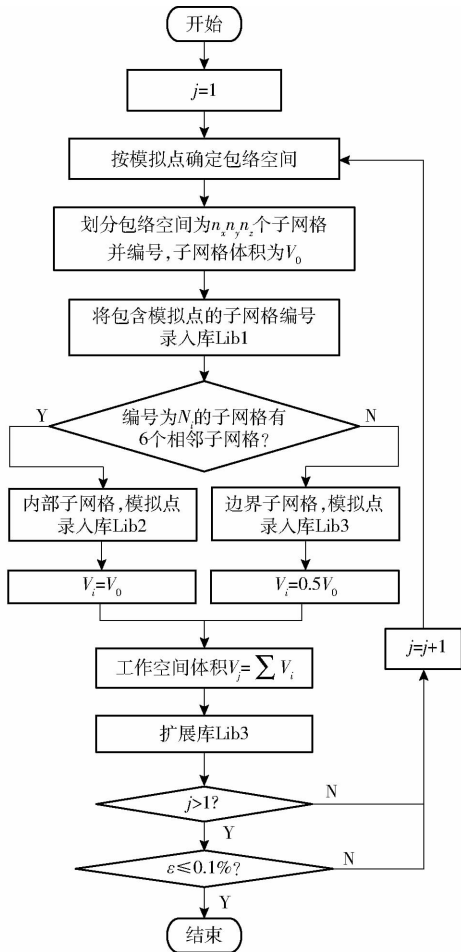


图 5 网格迭代算法流程图

Fig. 5 Flow chart of grid iteration algorithm

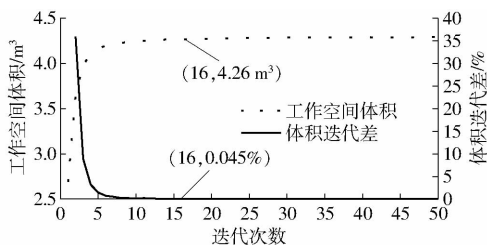


图 6 工作空间体积迭代变化曲线

Fig. 6 Workspace volume iteration curve

2.3 平均可操作度

为量化作业平台在 X, Y, Z 方向的运动能力, 以平台可操作性作为评价参数。目前关于机器人可操作性的研究方法主要有: 基于雅可比矩阵、基于 Hessian 矩阵和基于刚度矩阵^[18-20], 其中由于雅可比矩阵代表了机器关节空间的微分运动向操作空

间的微分运动之间的映射转换, 而被广泛应用。因此, 本文在平台参考点运动学模型基础上推导雅可比矩阵, 计算式为

$$\dot{D} = J \dot{\Theta} \quad (4)$$

其中 $D = [dx \ dy \ dz \ \delta x \ \delta y \ \delta z]^T$

$$J = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5 \ J_6]$$

$$\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ d_5 \ d_6]^T$$

$$\begin{cases} J_1 = [T_1^6(1,2) T_1^6(4,1) - T_1^6(1,1) T_1^6(4,2) \\ T_1^6(2,2) T_1^6(4,1) - T_1^6(2,1) T_1^6(4,2) \\ T_1^6(3,2) T_1^6(4,1) - T_1^6(3,1) T_1^6(4,2) \\ T_1^6(1,3) \ T_1^6(2,3) \ T_1^6(3,3)]^T \\ \vdots \\ J_6 = [T_6^6(1,3) \ T_6^6(2,3) \ T_6^6(3,3) \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (5)$$

式中 D ——参考点沿 X, Y, Z 轴的微分平移和绕 X, Y, Z 轴的微分旋转矩阵

J ——雅可比矩阵 Θ ——关节空间

$T_1^6(1,2)$ 表示矩阵 T_1^6 第 1 行第 2 列, 以此类推。

基于雅可比矩阵有多种指标可以描述平台可操作性, 其中可操作度 κ 考虑了机构执行末端的各方向运动能力而优于其他指标^[21], 计算式为

$$\kappa = \det(JJ^T) = \prod_{i=1}^n \lambda_i \quad (6)$$

式中 λ_i ——矩阵 JJ^T 的特征值

由式(4)、(6)可知, 当平台结构参数给定后, 可操作度随平台参考点空间位置变化而不同, 为描述作业平台在工作空间的全局操作性能, 引入平均可操作度 τ , 计算式为

$$\tau = \lg \left(\frac{1}{V} \int_{\Omega} \kappa dV_i \right) \quad (7)$$

其中 $\Omega = \{(x, y, z) | x \in D_{rx}, y \in D_{ry}, z \in D_{rz}\}$

式中 V_i ——平台可达工作空间子网格空间体积, m^3

V ——平台可达工作空间体积, m^3

Ω ——平台可达工作空间范围, m

2.4 结构参数对可达工作空间性能的影响

通过分析果园作业平台运动学模型和其工作空间, 影响其空间性能的结构参数主要是杆长和关节变量(关节角和连杆偏移)。根据其结构特点及作业要求, 主要分析杆 2、4 长度, 关节 1、3 关节角, 以及关节 5、6 连杆偏移对空间性能的影响规律。

2.4.1 杆长

保持关节变量和杆 1、3、5 长度不变, 杆 2、4 长度在 $0 \sim 1\ 600 \text{ mm}$ 之间变化, 通过蒙特卡洛方法多次模拟可达工作空间, 由 2.1 ~ 2.3 节分别得杆 2、4 对可达工作空间尺寸偏差 μ_{z1} 和 μ_{z2} 、体积 V 及平均可操作度 τ 的影响, 如图 7 所示。

由图 7 可知,杆 2、4 对 μ_{z1} 和 μ_{z2} 影响趋势一致,杆 2 影响更大:当杆 2 长度约为 950、960 mm 时, μ_{z1} 和 μ_{z2} 最小,分别为 42.82、40.05 mm;当杆 4 长度约

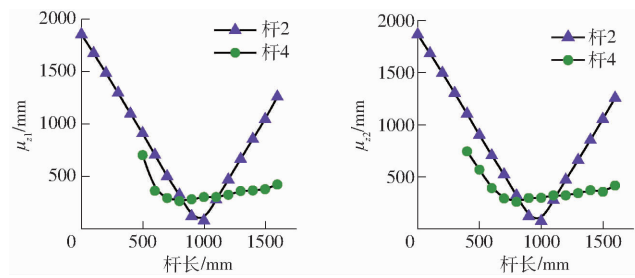
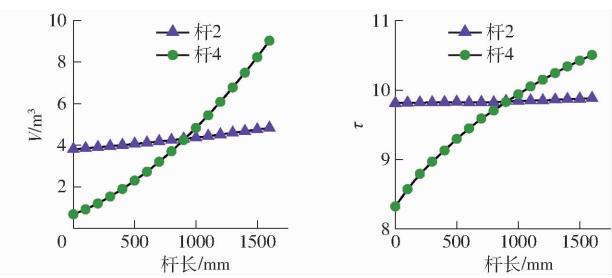


图 7 杆长对空间性能的影响

Fig. 7 Influence of rod length on workspace

为 800、810 mm 时, μ_{z1} 和 μ_{z2} 最小,分别为 260.49、258.97 mm;杆 2 对 V 和 τ 影响较小,杆 4 对 V 和 τ 影响较大且呈正相关。



2.4.2 关节变量

保持杆长和关节 2、4 关节角不变,关节 1、3 的关节角分别在 $[60^\circ, 300^\circ]$ 和 $[-130^\circ, -50^\circ]$ 范围内变化;由表 1 可知, d_{5min} 为 70 mm, $|d_{6max}| = |d_{6min}|$, 故

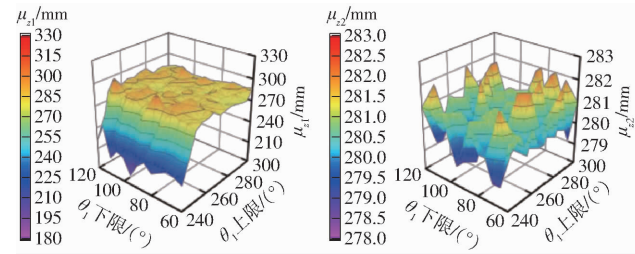


图 8 关节角 θ_1 对空间性能的影响

仅考虑 d_{5max} 、 d_{6max} 对工作空间的影响,关节 5、6 的连杆偏移最大值在 $[0, 1\ 200\text{ mm}]$ 范围内变化。得关节 1、3 的关节角和关节 5、6 的连杆偏移对可达工作空间性能的影响,如图 8~10 所示。

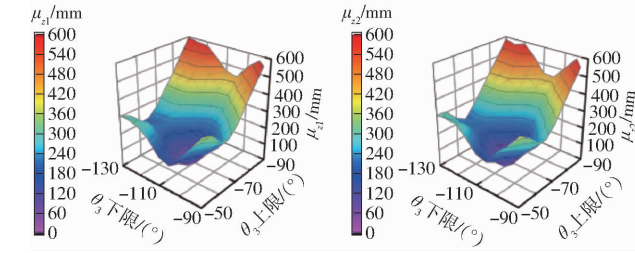
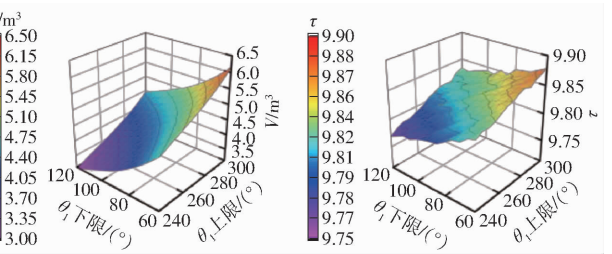


图 9 关节角 θ_3 对空间性能的影响

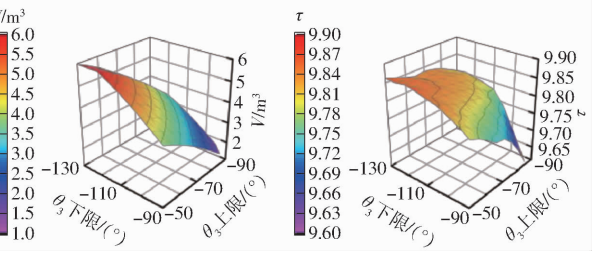


Fig. 9 Effect of joint angle θ_3 on spatial performance

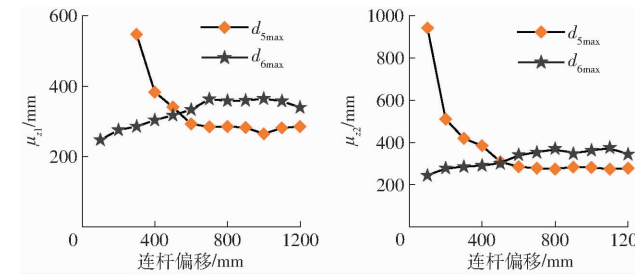


图 10 连杆偏移 d_{5max} 、 d_{6max} 对空间性能的影响

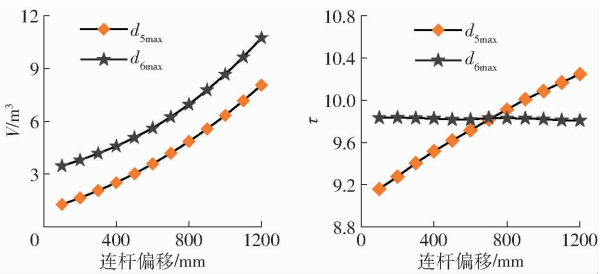


Fig. 10 Effect of rod offset d_{5max} and d_{6max} on spatial performance

由图 8~10 可知, θ_1 对 μ_{z1} 、 μ_{z2} 影响较小,当 θ_3 为 $-111^\circ \sim -63^\circ$ 时, μ_{z1} 和 μ_{z2} 最小,分别为 62.18、54.74 mm; θ_1 与 θ_3 对 V 影响较大,对 τ 影响较小但均呈正相关。当 d_{5max} 大于 700 mm 时, μ_{z1} 和 μ_{z2} 基本不再变化;当 d_{6max} 大于 800 mm 时, μ_{z1} 和 μ_{z2} 基本不再变化; d_{5max} 对 V 和 τ 均影响较大呈正相关; d_{6max} 对 V 影

响较大呈正相关,对 τ 影响较小呈负相关。

3 结构参数优化

3.1 优化模型

针对复杂的果园作业环境空间,为使作业平台能够安全可靠地完成动作,在能够满足目标工作空

间的作业要求下,执行升降、旋转和调平任务时更加灵活、高效,可达工作空间与目标工作空间的尺寸偏差应尽量小,空间体积和平均可操作度应尽量大。因此可达工作空间性能目标优化函数为

$$\begin{cases} \max f_1(\boldsymbol{w}) = -\mu_{z1} \\ \max f_2(\boldsymbol{w}) = -\mu_{z2} \\ \max f_3(\boldsymbol{w}) = V \\ \max f_4(\boldsymbol{w}) = \tau \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{w}$ ——待优化参数矩阵

同时,为使作业平台结构更加紧凑,在满足目标工作空间作业任务前提下,平台结构尺寸和关节变量应尽量小,即总杆长和关节变量总和应尽量小。因此结构紧凑目标优化函数为

$$\begin{cases} \max f_5(\boldsymbol{w}) = -\sum_{i=1}^5 l_i \\ \max f_6(\boldsymbol{w}) = -\sum_{i=1}^4 (\theta_{imax} - \theta_{imin})\zeta_1 - \\ \quad (d_{5max} - 70 + d_{6max} - d_{6min})\zeta_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 ζ_1, ζ_2 ——量纲统一系数

根据 2.4 节的分析和上述目标优化函数涉及的变量可得出平台待优化的参数为杆 2、4 长度,关节 1、3 关节角范围和关节 5、6 连杆偏移范围,用矩阵 $\boldsymbol{w}$ 表示为

$$\boldsymbol{w} = [l_2 \quad l_4 \quad \theta_{1max} \quad \theta_{1min} \quad \theta_{3max} \quad \theta_{3min} \quad d_{5max} \quad d_{6max}]^T \quad (10)$$

综上所述,作业平台结构参数优化函数共有 6 个子目标,8 个待优化参数,属于多元多目标函数优化问题,引入比例因子和权重,将其变为单目标优化函数;由图 7~10 得到待优化结构参数范围作为约束条件,优化模型为

$$\begin{cases} \max F(\boldsymbol{w}) = \sum_{i=1}^6 \left(\eta_i \frac{\max f_i(\boldsymbol{w})}{s_i} \right) \\ \text{s. t.} \begin{cases} l_2 \in [800 \text{ mm}, 1\,200 \text{ mm}] \\ l_4 \in [800 \text{ mm}, 1\,200 \text{ mm}] \\ \theta_1 \in [60^\circ, 300^\circ] \\ \theta_3 \in [-130^\circ, -70^\circ] \\ d_{5max} \in [400 \text{ mm}, 800 \text{ mm}] \\ d_{6max} \in [200 \text{ mm}, 800 \text{ mm}] \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\sum \eta_i = 1$

式中 $f_i(\boldsymbol{w})$ ——各子目标函数
 $F(\boldsymbol{w})$ ——总目标函数
 s_i ——比例因子 η_i ——权重

3.2 优化过程

根据平台原有结构和实际作业需求,对优化模型的各项指标设定适当的比例因子和权重。

3.2.1 比例因子

工作空间尺寸偏差越小越好,考虑优化精度和实际作业情况,其比例因子取 10 mm;工作空间体积、平均可操作度及结构参数指标的比例因子均以原样机结构为基础,分别按照前述对应内容计算求解,结果如表 2 所示。

表 2 子目标函数指标权重及比例因子
Tab.2 Index weight and scale factor of sub-objective function

一级指标 A		二级指标 B		二级权重 η_i	比例因子 s_i
名称	组内权重	名称	组内权重		
空间性能 (A_1)	0.667	$\mu_{z1}(B_{11})$	0.355	0.237	10 mm
		$\mu_{z2}(B_{12})$	0.355	0.237	10 mm
		$V(B_{13})$	0.135	0.090	4.26 m ³
		$\tau(B_{14})$	0.155	0.103	9.82
结构紧凑 (A_2)	0.333	总杆长 (B_{21})	0.667	0.222	3 566 mm
		关节变量总 和(B_{22})	0.333	0.111	2 730

3.2.2 权重

基于果园种植模式和优化模型,在能够完成作业任务的前提下,考虑农机农艺融合和人机工程学,各指标权重确定原则如下:①空间性能指标较结构紧凑指标更为重要。②在空间性能指标中,工作空间尺寸偏差最重要, μ_{z1}, μ_{z2} 为同一性质优化指标,二者同等重要。③为保证平台灵活高效地完成执行动作,平均可操作度较工作空间体积更为重要。④通过分析图 8~10 中杆长和关节变量对工作空间尺寸偏差的影响,前者大于后者,因此杆长较关节变量重要。

以工作空间性能和结构紧凑为一级指标,6 个子目标函数为二级指标。在上述原则前提下,采用德尔菲法^[22]征询相关领域专家意见,同时结合层次分析法^[23-24]的分析计算,最终确定各评价指标的权重。以空间性能(A_1)为准则的二级指标 $\mu_{z1}(B_{11}), \mu_{z2}(B_{12}), V(B_{13})$ 和 $\tau(B_{14})$ 为例,其步骤如下:

(1)将专家对各指标重要性评分汇总,依据判断矩阵标度^[25]对指标 $B_{11} \sim B_{14}$ 进行两两判断,构造出判断矩阵 E_{A1} ,计算式为

$$E_{A1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

(2)将上述矩阵每一行元素相乘得积为 P_{Ai} ,对其归一化处理,即得权重 η_{Ai} ,计算式为

$$\begin{cases} P_{A1i} = \prod_{j=1}^4 E_{A1ij} \\ \eta_{A1i} = \sqrt[4]{P_{A1i}} / \sum_{i=1}^4 \sqrt[4]{P_{A1i}} \end{cases} \quad (13)$$

(3)为保证专家对指标 $B_{11} \sim B_{14}$ 重要程度的判断一致,以一致性比率 CR 检验判断矩阵的一致性,计算式为

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{(E_{A1}\eta_{A1})_i}{4\eta_{A1i}} - 4}{3RI} \quad (14)$$

式中 RI ——随机指标,判断矩阵 4 阶时 RI 取 0.89^[26]

根据以上步骤,将判断矩阵 E_{A1} 和权重 η_{A1} 代入式(14),得 $CR=0.057<0.1$,即判断矩阵通过一致性检验, $\eta_{A1}=[0.355 \ 0.355 \ 0.135 \ 0.155]^T$ 。

同理,按上述步骤计算其余指标权重,结果如表 2 所示。

3.3 优化结果

将表 2 的数据代入式(11),并将其编译为适应

Matlab 遗传算法工具箱的适应度函数,将优化模型的约束条件编译为适应于算法工具箱的区域描述器。设置初始种群个体数目为 40,遗传代数为 200,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.007。运行算法得到适应度函数进化曲线如图 11 所示。

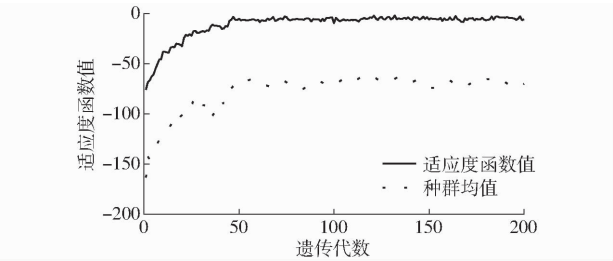


图 11 适应度函数进化曲线

Fig. 11 Fitness function evolution curve

由图 11 可知,适应度函数约在第 50 代收敛。考虑实际加工因素,规整优化参数,如表 3 所示。

将优化前后参数代入运动学模型,模拟可达工作空间,分别计算其空间性能指标、总杆长和关节变量总和,结果如表 4 所示。

表 3 优化前后结构参数对比

Tab. 3 Comparison of structural parameters before and after optimization

参数	l_2/mm	l_4/mm	$\theta_1/(^{\circ})$	$\theta_3/(^{\circ})$	d_5/mm	d_6/mm
优化前	812	900	[90,270]	[−115,−75]	[70,710]	[−320,320]
优化后	988	879	[107,256]	[−118,−76]	[70,720]	[−340,340]
优化百分比/%	+21.67	−2.33	−17.22	+5.00	+1.56	+6.25

注: + 表示增加或提高, − 表示减小或降低,下同。

表 4 优化前后指标对比

Tab. 4 Comparison of index before and after optimization

优化指标	μ_{z1}/mm	μ_{z2}/mm	V/m^3	τ	总杆长/mm	关节变量总和
优化前	275.95	279.93	4.26	9.82	3 566	2 730
优化后	10.80	12.33	4.07	9.96	3 739	2 645
优化百分比/%	−96.09	−95.60	−4.69	+1.43	+4.85	−3.11

由表 4 可知,优化后可达工作空间最大偏差仅为 12.33 mm,平均可操作度提高 1.43%,表明优化后更接近目标工作空间,且操作更灵活。

4 试验与结果分析

4.1 试验条件

4.1.1 试验准备

基于优化后的果园作业平台结构参数改进样机,于 2020 年 7 月在山东农业大学园艺实验基地果园(图 12)进行工作空间试验。该果园为乔砧密植苹果园,树形为自由纺锤形,株行距为 2 m×3 m,平均株高约为 3.5 m,试验人员肩高为 1.41 m,体质量为 65 kg。

试验仪器包括:直川电子科技有限公司 ZCT 230M 型倾角仪,Panasonic 公司 HG−C1100 型激光



图 12 工作空间试验现场

Fig. 12 Workspace test site

位移传感器,杰科斯 JK−100F 系列土壤水分仪,史丹利 SHT 36191−23 型钢卷尺和李宁 AQAP322 型秒表等。

4.1.2 试验设计

以 D−H 坐标原点为实际坐标系原点,工作台

保持水平,以平台承载质量、横坡坡度及纵坡坡度为影响因素进行工作空间尺寸偏差测量试验,设计三因素三水平试验,如表 5 所示。

表 5 试验因素水平
Tab.5 Factors and levels

水平	因素		
	平台承载质量/kg	横坡坡度/(°)	纵坡坡度/(°)
1	65	0	0
2	100	5	5
3	135	15	15

4.2 试验结果与分析

以标准型 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,结果如表 6 所示。表中 A 、 B 、 D 分别表示平台承载质量、横坡坡

度和纵坡坡度水平值, C 为补充因素水平值。 μ'_{z1} 、 μ'_{z2} 表示实际工作空间与目标工作空间尺寸偏差,其单项评分 y'_{ik} 和综合评分 y_i^* 计算式分别为

$$y'_{ik} = 100 \frac{y_{ik} - y_{mk}}{y_{Mk} - y_{mk}} = 100 \frac{y_{ik} - y_{mk}}{R_k} \quad (k = 1, 2; i = 1, 2, \cdots, 9) \tag{15}$$

$$y_i^* = \sum_{k=1}^2 y'_{ik} \eta_k \tag{16}$$

式中 y'_{ik} ——第 k 项指标第 i 指标值的评分
 y_{ik} ——第 k 项指标的第 i 指标实测值
 y_{Mk} 、 y_{mk} ——第 k 项指标最大、最小实测值
 R_k ——第 k 项指标的实测值极差
 η_k ——第 k 项指标的权重,由表 2 给出

表 6 试验方案与结果
Tab.6 Test scheme and result

试验 序号	因素				μ'_{z1}		μ'_{z2}		综合评分
	A	B	C	D	y_{i1}/mm	y'_{i1}	y_{i2}/mm	y'_{i2}	y_i^*
1	1	1	1	1	13.2	0	12.8	0	0
2	1	2	2	2	14.0	26.67	13.4	15.38	20.52
3	1	3	3	3	16.2	100	16.7	100	100
4	2	1	2	3	14.3	36.67	13.5	17.95	26.47
5	2	2	3	1	13.9	23.33	13.0	5.13	13.42
6	2	3	1	2	15.8	86.67	16.1	84.62	85.55
7	3	1	3	2	14.1	30.00	13.5	17.95	23.44
8	3	2	1	3	16.1	96.67	16.4	92.31	94.29
9	3	3	2	1	15.8	86.67	16.1	84.62	85.55
μ'_{z1}	$\bar{y}_{j11}$	21.70	20.80	22.55	21.45				
	$\bar{y}_{j21}$	22.00	22.00	22.05	21.95				
	$\bar{y}_{j31}$	23.00	23.90	22.10	22.10				
	R_{j1}	1.30	3.10	0.50	0.65				
μ'_{z2}	$\bar{y}_{j12}$	21.45	19.90	22.65	20.95				
	$\bar{y}_{j22}$	21.30	21.40	21.50	21.50				
	$\bar{y}_{j32}$	23.00	24.45	21.60	23.30				
	R_{j2}	1.70	4.55	1.15	2.35				
	$\bar{y}_{j1}^*$	60.26	24.96	89.92	49.48				
	$\bar{y}_{j2}^*$	62.72	64.12	66.27	64.76				
	$\bar{y}_{j3}^*$	101.64	135.55	68.43	110.38				
	R_j^*	41.38	110.59	23.65	60.90				

由表 6 可知, y_i^* 越小越好,则影响 μ'_{z1} 、 μ'_{z2} 的主次顺序为 B 、 D 、 A ,较优条件为 $A_1D_1B_1$ 。横坡坡度对 μ'_{z1} 、 μ'_{z2} 影响较平台承载质量、纵坡坡度更大,当平台承载质量为 65 kg、横坡坡度 15°、纵坡坡度 15°时, μ'_{z1} 、 μ'_{z2} 最大,分别为 16.2、16.7 mm,较可达工作空间分别增大 5.40、4.37 mm,与原型相比分别减小 93.89%、93.76%,表明优化模型较为准确,对乔砧密植果园适用性较好。

5 结论

(1)在果园作业平台前期研究基础上,结合农

机农艺融合确定了其目标工作空间,采用网格迭代算法求取可达工作空间体积,以工作空间尺寸偏差、工作空间体积和平均可操作度描述可达工作空间性能,分析了平台结构参数杆长、关节角和连杆偏移对可达工作空间性能的影响。

(2)建立了以可达工作空间性能和结构紧凑为目标的优化模型,通过引入各指标比例因子和权重转换为单目标函数,利用遗传算法求解得出最优结构参数为:杆 2 和杆 4 的长度分别为 988、879 mm,关节 1、3 的关节角范围分别为 $[107^\circ, 256^\circ]$ 、 $[-118^\circ, -76^\circ]$,关节 5、6 的连杆偏移最大值分

别为 720、340 mm。优化后工作空间尺寸偏差分别减小 96.09%、95.60%，平均可操作度增加 1.43%，表明优化后更接近目标工作空间，且操作更灵活。

(3)进行了不同承载质量、不同坡度下的优化样机实地果园工作空间试验,当平台承载质量 65 kg、横坡坡度 15°、纵坡坡度 15°时,实际工作空间尺寸偏差最大值仅为 16.7 mm,较原型减小了 93.76%。

参 考 文 献

- [1] 张晓辉,姜宗月,范国强,等.履带自走式果园定向风送喷雾机[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):117-122,247. ZHANG Xiaohui, JIANG Zongyue, FAN Guoqiang, et al. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):117-122,247. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140819&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.019. (in Chinese)
- [2] 郑永军,江世界,陈炳太,等.丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J/OL].农业机械学报,2020,51(11):1-20. ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201101&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.001. (in Chinese)
- [3] YAMADA Y, SHICHIJO T, HIROSE K. Labor-saving system for fruit harvesting and transporting in a sloping citrus orchard of satsuma mandarin oranges[J]. Bulletin of the Fruit Tree Research Station, 1982(B):1-22.
- [4] 马冀桐,王毅,何宇,等.基于构型空间先验知识引导点的柑橘采摘机械臂运动规划[J].农业工程学报,2019,35(8):100-108. MA Jitong, WANG Yi, HE Yu, et al. Motion planning of citrus harvesting manipulator based on informed guidance point of configuration space[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8):100-108. (in Chinese)
- [5] 刘大为,谢方平,李旭,等.小型果园升降作业平台的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(3):113-121. LIU Dawei, XIE Fangping, LI Xu, et al. Design and experiment of small lifting platform in orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):113-121. (in Chinese)
- [6] 吴超宇,钱小吾,余伟,等.直线驱动型并联机器人工作空间分析与优化[J/OL].农业机械学报,2018,49(1):381-389. WU Chaoyu, QIAN Xiaowu, YU Wei, et al. Workspace analysis and optimization of linear driven parallel robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):381-389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180148&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.048. (in Chinese)
- [7] 权龙哲,彭涛,沈柳杨,等.立体苗盘管理机器人的机械臂参数优化与试验[J].农业工程学报,2017,33(7):10-19. QUAN Longzhe, PENG Tao, SHEN Liuyang, et al. Parameter optimization and test of manipulator for three-dimensional seedling tray management robot[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7):10-19. (in Chinese)
- [8] 丁渊明,王宣银.串联机械臂结构优化方法[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(12):2360-2364. DING Yuanming, WANG Xuanyin. Optimization method of serial manipulator structure[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(12):2360-2364. (in Chinese)
- [9] 孙小勇,郑彬,鲍捷,等.高速6-PSS并联机器人参数优化设计[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):372-378. SUN Xiaoyong, ZHENG Bin, BAO Jie, et al. Parameter optimization design of high-speed 6-PSS parallel robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):372-378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150552&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.052. (in Chinese)
- [10] 李钊,樊桂菊,梁昭,等.基于D-H法的果园作业平台工作空间分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(16):25-34. LI Zhao, FAN Guiju, LIANG Zhao, et al. Workspace analysis and experiments of orchard platform based on D-H method[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16):25-34. (in Chinese)
- [11] 李维立,曹祥哲.人机工程学[M].北京:人民邮电出版社,2017.
- [12] SINGH A, SINGH A, SONI S. D-H parameters augmented with dummy frames for serial manipulators containing spatial links[C]//The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2014:975-980.
- [13] 覃艳明,赵静一,全少帅,等.八自由度机械臂位置运动学模型解析解[J/OL].农业机械学报,2019,50(1):400-405. QIN Yanming, ZHAO Jingyi, TONG Shaoshuai, et al. Analytical solution of kinematics model of eight-degree-of-freedom manipulator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):400-405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190146&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.046. (in Chinese)
- [14] 霍增起,王茂林,郑二牛.乔砧苹果树树形与密度的动态管理[J].西北园艺(果树),2010(4):18-21.
- [15] 石立委,何秀丽,曹洪建,等.苹果乔砧密植栽培技术[J].北方果树,2016(5):32-33.
- [16] 田海波,马宏伟,魏娟.串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J/OL].农业机械学报,2013,44(4):196-201. TIAN Haibo, MA Hongwei, WEI Juan. Workspace and structural parameters analysis for manipulator of serial robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):196-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130434&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.034. (in Chinese)

- Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2016: 770 – 778.
- [23] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2017: 936 – 994.
- [24] MNIH V, HEES N, GRAVES A, et al. Recurrent models of visual attention[C]//The Conference on Neural Information Processing Systems, 2014: 2204 – 2212.
- [25] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//European Conference on Computer Vision(ECCV), 2018: 3 – 19.
- [26] JADERBERG M, SIMONYAN K, ZISSERMAN A, et al. Spatial transformer networks[C]//The Conference on Neural Information Processing Systems, 2015: 2017 – 2025.
- [27] DAI J F, QI H Z, XIONG Y W, et al. Deformable convolutional networks[C]//The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2017: 764 – 773.
- [28] XU Z, XU X, WANG L, et al. Deformable convnet with aspect ratio constrained NMS for object detection in remote sensing imagery[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1312 – 1331.
- [29] 欧阳针,陈玮. 基于可变形卷积神经网络的图像分类研究[J]. 软件导刊, 2017, 16(6): 198 – 201.
- [30] 李旭青,张秦雪,安志远,等. 基于可变形全卷积神经网络的冬小麦自动解译研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 144 – 151.
LI Xuqing, ZAHNG Qinxue, AN Zhiyuan, et al. Automatic interpretation of winter wheat based on deformable full convolution neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 144 – 151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200917&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.017. (in Chinese)
- [31] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R – CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137 – 1149.
- [32] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(2): 336 – 359.
- ~~~~~
- (上接第 42 页)
- [17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 230 – 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130143&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.043. (in Chinese)
- [18] 刘迎春,余跃庆,姜春福. 机器人可操作性研究进展[J]. 机械设计与研究, 2003(4): 34 – 37, 7.
LIU Yingchun, YU Yueqing, JIANG Chunfu. Survey of robot manipulability[J]. Machine Design & Research, 2003(4): 34 – 37, 7. (in Chinese)
- [19] 高秀兰,鲁开讲,王娟平. Delta 并联机构工作空间解析及尺度综合[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 146 – 149, 145.
GAO Xiulan, LU Kaijiang, WANG Juanping. Workspace resolution and dimensional synthesis on Delta parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 146 – 149, 145. (in Chinese)
- [20] 陈士安,何仁,陆森林. 馈能型悬架综合性能评价体系[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 14 – 18.
CHEN Shian, HE Ren, LU Senlin. Evaluating system of reclaiming energy suspension comprehensive performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 14 – 18. (in Chinese)
- [21] TADOKOR S, KIMURA I, TAKAMORI T. A dexterity measure for trajectory planning and kinematic design of redundant manipulators[C]//Industrial Electronics Society, 1989. IECON'89. Conference of IEEE. IEEE, 1989: 415 – 420.
- [22] 王强,班义成,苏日娜,等. 农业机械适用性评价中性能试验法理论模型构建研究[J]. 内蒙古农业科技, 2013(6): 56 – 60, 63.
- [23] 刘东,龚方华,付强,等. 基于博弈论赋权的灌溉用水效率 GRA – TOPSIS 评价模型[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 218 – 226.
LIU Dong, GONG Fanghua, FU Qiang, et al. Evaluation model of irrigation water use efficiency based on game theory and GRA – TOPSIS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 218 – 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170527&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.027. (in Chinese)
- [24] 籍颖,张漫,刘刚,等. 农业机械导航系统综合评价方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 160 – 164.
JI Ying, ZHANG Man, LIU Gang, et al. Synthetical evaluation of agriculture machine navigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 160 – 164. (in Chinese)
- [25] 骆正清,杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004(9): 51 – 60.
LUO Zhengqing, YANG Shanlin. Comparative study on several scales in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004(9): 51 – 60. (in Chinese)
- [26] 程兴田,王祺,闫发旭. 农业机械适用性用户调查评价模型研究——基于模糊层次分析法[J]. 农机化研究, 2013, 35(7): 73 – 75, 80.
CHENG Xingtian, WANG Qi, YAN Faxu. Study on the evaluation model of agricultural machinery applicability by user survey with FAHP[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(7): 73 – 75, 80. (in Chinese)