

基于 D-H 法的果园作业平台工作空间分析与试验

李 钊^{1,2}, 樊桂菊^{1,3*}, 梁 昭^{1,2}, 牛成强¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安, 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安, 271018; 3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安, 271018)

摘 要: 针对蒙特卡洛方法分析果园作业平台工作空间存在边界不清、点浪费等问题, 该研究采用 D-H 法建立了作业平台运动学模型, 利用 U 形反正弦分布函数改进了蒙特卡洛方法, 得到其工作空间点云图。考虑农机农艺融合和工作人员舒适度, 分析了平台理想工作空间; 采用网格化算法对改进前后生成的工作空间进行分析, 改进后最底层与最顶层边界层面积分别增大 180.70 % 和 102.69 %, 表明边界清晰度明显提高; 改进后在 X、Y、Z 三个方向的空间差异系数较改进前分别降低了 6.92 %、8.99 %、2.64 %。利用高速摄像机对平台参考点跟踪测试, 平台参考点的实测值与计算值最大差值仅为 6.2 mm; 实际果园试验结果表明, 平台参考点实际工作空间与可达工作空间在 X、Y、Z 方向最大值、最小值均值的差异系数分别为 0.27 %、0.76 % 和 0.01 %, 改进方法有效。该研究为果园作业平台结构参数优化、智能控制和同类农业机械工作空间分析提供理论参考。

关键词: 农业机械; 运动学; 工作空间; 蒙特卡洛方法; D-H 法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.004

中图分类号: S225.93

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0025-10

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.004 http://www.tcsae.org

Li Zhao, Fan Guiju, Liang Zhao, et al. Workspace analysis and experiments of orchard platform based on D-H method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 25-34. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.004 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国果园种植面积和水果产量居世界首位, 但水果产业属于劳动密集型产业, 尤其剪枝、疏花疏果、采摘等环节人工劳动强度大、效率低^[1-3]。近年来, 由于农村劳动力的转移和人工成本的提高, 辅助人工作业的果园平台的研究与应用越来越多^[4-6], 但主要集中在结构与功能方面, 对其运动学与工作空间的研究比较少。随着现代化果园种植面积的扩大和人们对农业机械性能要求的提高, 农机农艺有机融合成为研究的重点和难点, 果园作业平台工作空间代表了其活动范围, 反映了平台与果树种植模式的融合程度, 直接影响作业人员的工作舒适度, 是其运动灵活性的重要衡量指标^[7-8]。因此对果园作业平台进行运动学与空间分析具有重要的意义。

许多学者开展了农业机械或农业机器人运动学与工作空间分析方面的研究。胡建平等^[9]采用几何法分析其约束方程及边界方程求解了 Delta 并联机构移栽机器人可达工作空间, 并以机器尺寸及运动学性能为综合进行优化; 李国利等^[10]采用 D-H 法建立了苹果采摘机械手正运动学方程, 通过蒙特卡洛方法模拟了机械手工作空间; 吴超

宇等^[11]提出了极坐标变步长迭代搜索法分析了并联机器人的工作空间, 以对空间利用率最大为目标进行了参数优化; 阳涵疆等^[12]基于旋量理论构建了一种混联采摘机器人运动学方程; 权龙哲等^[13]采用 D-H 法建立了立体苗盘管理机器人运动学模型, 通过几何图解法得到了工作空间及约束关系, 进而优化机械臂参数。

综上所述, 目前分析机构的工作空间主要有几何法、解析法和蒙特卡洛方法, 几何法和解析法仅适用于自由度或杆件数目较少的机构工作空间分析^[14-15]; 蒙特卡洛方法算法比较简单, 适用范围广泛, 但边界提取精度依赖于边界点分布状况, 模拟点多出现在非边界处, 造成点浪费且边界不清等^[16]。

针对以上问题, 本文在前期研制的果园作业平台基础上, 通过 D-H 法建立坐标系, 推导其运动学模型, 采用 U 形反正弦分布函数对蒙特卡洛方法改进, 利用 MATLAB 得到参考点工作空间点云图, 采用网格化算法分析改进前后的工作空间边界清晰度, 并通过仿真及样机试验进行验证, 为原型结构参数优化和智能控制提供理论依据。

1 果园作业平台结构

1.1 结构简介

果园作业平台整体结构包括动力装置、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^[17], 辅助人工完成剪枝、疏花疏果、套袋及果实采摘等环节。为适应果园复杂地形, 采用履带式底盘, 其工作原理为: 回转机构使工作台在果树行间左右摆动; 升降机构通过

收稿日期: 2020-01-17 修订日期: 2020-07-06

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2018MC017); 国家重点研发计划(2018YFD0700604); 山东农业大学“双一流”科技创新团队(SYL2017XTTD07)

作者简介: 李钊, 主要从事机械电子工程研究。Email: leez2018@163.com

*通信作者: 樊桂菊, 副教授, 主要从事智能农业装备研究。

Email: fanguiju2002@163.com

油缸伸缩带动工作台上升或下降, 满足果树不同高度的操作要求; 调平机构主要由调平油缸、调平液压回路和调平控制系统组成, 通过电磁阀控制调平油缸伸缩改变工作台横坡和纵坡倾角, 实现平台坡地作业时工作台保持水平。因此, 该平台既适用于乔砧密植的纺锤形平地果园, 也适用于坡度为 15° 以内的山区果园。

根据上述结构和工作原理, 果园作业平台的一系列动作与串联机器人相似, 回转机构相当于回转关节, 升降机构相对于立柱的运动构成旋转关节, 工作台的横坡调平运动和纵坡调平运动分别构成 2 个旋转关节, 因此该平台可看作串联开链机构。为便于作业平台运动学模型求解、工作空间分析和试验验证, 以纵坡调平油缸和工作台的连接点作为作业平台执行端参考点, 简称平台参考点。

1.2 自由度计算

机构自由度计算公式^[18-19]为

$$F = 3n - (2p_l + p_h - p') - F' \quad (1)$$

式中 F 表示机构自由度, n 表示零件个数, p_l 表示平面低副, p_h 表示平面高副, p' 表示虚约束, F' 表示局部自由度。

由果园作业平台结构和工作原理可知, 其构件个数 n 为 11, 将履带式底盘看作移动副, 则该平台的平面低副 $p_l=14$ (转动副 10 个、移动副 4 个), 平面高副 $p_h=0$, 虚约束 $p'=0$, 局部自由度 $F'=0$, 将以上数据代入式 (1), 得果园作业平台的自由度为 5。

1.3 果园作业平台运动学模型

1.3.1 基于 D-H 法建立坐标系

D-H 法^[20-23]通过 α 、 a 、 d 、 θ 4 个独立参数描述相邻杆件之间的坐标方向和参数, 可以有效的确定开链式串联机器人手臂关节参数和关节变量。

为描述果园作业平台工作台的运动, 对其作如下假设: 地面为刚性, 各构件为刚体, 各油缸质量忽略不计, 忽略铰链间隙与摩擦力的影响。根据假设, 立柱支承的上铰接点至底盘为连杆 1, 立柱为连杆 2, 两立柱支承连线中点至立柱为连杆 3, 横梁为连杆 4, 工作台与横梁、纵坡调平油缸铰接点间的杆为连杆 5。以立柱到地面的投影为初始坐标系原点 O_0 , 如图 1 采用 D-H 法建立果园作业平台连杆坐标系, 相应的 D-H 参数如表 1 所示。

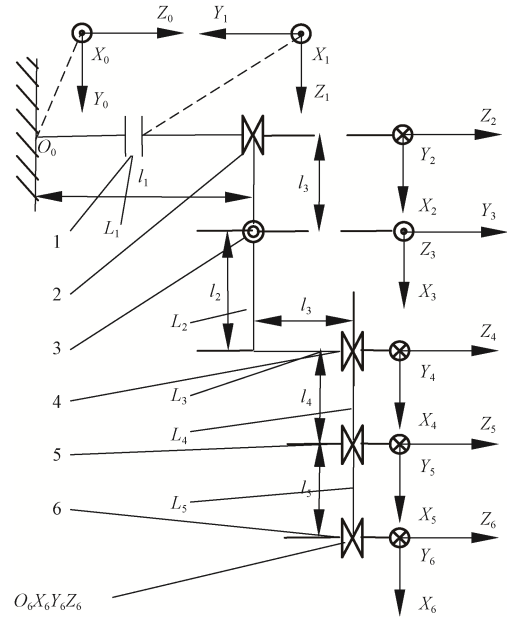
表 1 果园作业平台 D-H 参数

Table 1 D-H parameter of orchard platform

关节序号 Joint number	$\alpha_i / (^\circ)$	a_i / mm	d_i / mm	$\theta_i / (^\circ)$	θ_i 范围 Range of $\theta_i / (^\circ)$
1	-90	0	d_1	0	0
2	+90	0	l_1	θ_2	[90, 270]
3	+90	l_3	0	θ_3	[85, 105]
4	-90	l_2	l_3	θ_4	[-115, -75]
5	0	l_4	0	θ_5	[-120, -70]
6	0	l_5	0	θ_6	0

注: α_i (i 为关节序号, 下同) 为 Z_{i-1} 轴逆时针绕 X_{i-1} 轴到 Z_i 轴转动的角度, $(^\circ)$; a_i 为 Z_{i-1} 轴沿 X_{i-1} 轴到 Z_i 轴的距离, mm; d_i 为沿 Z_i 轴方向由 X_{i-1} 轴到 X_i 轴的距离, mm; θ_i 为 X_{i-1} 轴逆时针绕 Z_i 轴到 X_i 轴的角度, $(^\circ)$ 。

Note: α_i (i is the joint number, the same below) is the rotation angle of the Z_{i-1} axis counterclockwise around the X_{i-1} axis to the Z_i axis, $(^\circ)$; a_i is the distance from the Z_{i-1} axis along the X_{i-1} axis to the Z_i axis, mm; d_i is the distance from the X_{i-1} axis to the X_i axis along the Z_i axis, mm; θ_i is the rotation angle of the X_{i-1} axis counterclockwise around the Z_i axis to the X_i axis, $(^\circ)$ 。



注: 1~6 依次表示关节 1~6, X_i 、 Y_i 、 Z_i ($i=0, 1, \dots, 6$) 分别表示附于关节 i 的坐标系 $O_iX_iY_iZ_i$ 的 X 、 Y 、 Z 方向; $l_1 \sim l_5$ 依次表示连杆 1~5, $l_1=964 \text{ mm}$, $l_2=812 \text{ mm}$, $l_3=210 \text{ mm}$, $l_4=900 \text{ mm}$, $l_5=600 \text{ mm}$; 符号“||”表示移动副, “M”表示转动方向垂直于纸面的转动副, “⊙”表示转动方向平行于纸面的转动副, “⊗”表示坐标轴垂直于纸面且方向由里向外, “⊙”表示坐标轴垂直于纸面且方向由外向里。为明确表述平台参考点位置, 增加坐标系 $O_6X_6Y_6Z_6$, 其姿态矩阵无现实意义。

Note: 1-6 represents joint 1-6, X_i , Y_i , Z_i ($i=0, 1, \dots, 6$) respectively represent the X , Y , and Z directions of the coordinate system $O_iX_iY_iZ_i$ attached to joint i ; $l_1 \sim l_5$ represents connecting rod 1 to 5, and its length is $l_1=964 \text{ mm}$, $l_2=812 \text{ mm}$, $l_3=210 \text{ mm}$, $l_4=900 \text{ mm}$, $l_5=600 \text{ mm}$; The symbol “||” indicates the moving pair, “M” indicates the rotating pair whose rotation direction is perpendicular to the paper surface, “⊙” indicates the rotating pair whose rotation direction is parallel to the paper surface, “⊙” indicates that the coordinate axis is perpendicular to the paper surface and the direction is from inside to outside, “⊗” indicates that the coordinate axis is perpendicular to the paper surface and the direction is from outside to inside. In order to express the position of platform marker point, the coordinate system $O_6X_6Y_6Z_6$ is added, and its attitude matrix has no practical significance.

图 1 果园作业平台坐标系

Fig.1 Coordinate system of orchard platform

1.3.2 正运动学方程

相邻两坐标系 i 和 $i-1$ 之间的位姿变换矩阵 T_{i-1}^i ^[24-26]为

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 $c\theta_i = \cos\theta_i$, $s\theta_i = \sin\theta_i$, $c\alpha_i = \cos\alpha_i$, $s\alpha_i = \sin\alpha_i$, $i=1, 2, \dots, 6$, 下同。

平台参考点的正运动学方程为

$$T_0^6 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 R 为姿态矩阵, P 为位置矩阵, n, o, a, p 均为 d_i 与 θ_i 的函数, 具体如下

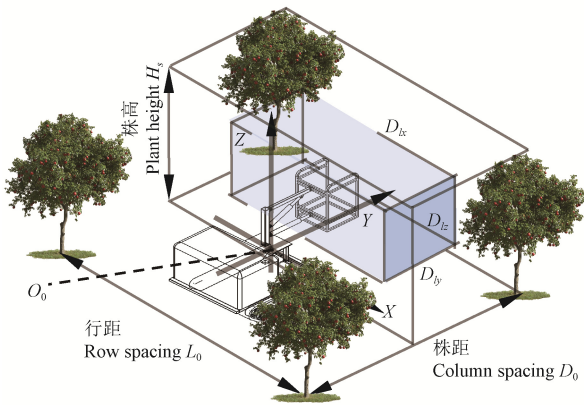
$$\begin{cases} n_x = -c_5(s_2s_4 - c_2c_3c_4) - s_5(s_2s_4 + c_2c_3s_4) \\ n_y = c_5(c_2s_4 + s_2c_3c_4) + s_5(c_2c_4 - s_2c_3s_4) \\ n_z = s_3(c_4c_5 - s_4s_5) \\ o_x = -c_5(s_2s_4 + c_2c_3s_4) + s_5(s_2s_4 - c_2c_3c_4) \\ o_y = c_5(c_2c_4 - s_2c_3s_4) - s_5(c_2s_4 + s_2c_3c_4) \\ o_z = -s_3(s_4c_5 + c_4s_5) \\ a_x = -c_2s_3 \\ a_y = -s_2s_3 \\ a_z = c_3 \\ p_x = l_2c_2c_3 + l_3c_2(1 - s_3) - l_4(s_2s_4 - c_2c_3c_4) \\ \quad - l_5(c_5(s_2s_4 - c_2c_3c_4) + s_5(s_2s_4 + c_2c_3s_4)) \\ p_y = -d_1 + l_2s_2c_3 + l_3s_2(1 - s_3) + l_4(c_2s_4 + s_2c_3c_4) \\ \quad + l_5(c_5(c_2s_4 + s_2c_3c_4) + s_5(c_2c_4 - s_2c_3s_4)) \\ p_z = l_1 + l_2s_3 + l_3c_3 + l_4s_3c_4 - l_5s_3(s_4s_5 - c_4c_5) \end{cases} \quad (4)$$

2 工作空间分析

2.1 理想工作空间

果园作业平台的工作空间是指平台参考点所能达到的所有位置空间点集的集合, 表示了其工作范围, 是作业平台结构设计和优化的重要依据, 其理想工作空间与果树种类、种植模式和操作人员自身因素密切相关。中国水果种植种类繁多, 其中苹果种植面积位居前列, 目前种植模式主要有: 乔砧稀植、乔砧密植和矮砧密植^[27]。本文以乔砧密植的纺锤形苹果园为研究对象, 其株行距为 $(3 \sim 4) \text{ m} \times (4 \sim 5) \text{ m}$, 株高 $2.8 \sim 3.5 \text{ m}$, 冠径 $1.4 \sim 3.0 \text{ m}$ ^[28]。

综合苹果园种植模式、平台通用性和操作人员自身因素, 平台参考点的理想工作空间如图 2 所示。



注: 以立柱到地面的投影为初始坐标系原点 O_0 ; X, Y, Z 分别为初始坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 的 X_0, Y_0, Z_0 方向; D_x, D_y, D_z 分别为平台参考点的理想工作空间 X, Y, Z 方向的距离, m 。

Note: Taking the projection from the column to the ground as the origin of the initial coordinate system O_0 ; X, Y, Z are the X_0, Y_0, Z_0 directions of the initial coordinate system $O_0X_0Y_0Z_0$; D_x, D_y, D_z are the distances of the ideal workspace of the platform reference point in X, Y and Z directions, m .

图 2 平台参考点理想工作空间示意图

Fig.2 Schematic diagram of orchard platform reference point ideal workspace

平台参考点的理想工作空间 X, Y, Z 三个方向的距

离 D_x, D_y, D_z 为

$$\begin{cases} D_x = L_0 - L_s - 2 \cdot L_r + L_z \\ D_y = D_0 / 2 - L_r + L_z \\ D_z = H_s - H_r + L_z \end{cases} \quad (5)$$

式中 L_s 为冠径, m ; L_r 为成人胳膊长度, m ; H_r 为成人双臂功能上举高, m ; L_z 为灵活长度, m 。

由文献[28], 各参数取值为: D_0, L_0, H_s 分别取最大值 $4, 5, 3.5 \text{ m}$, L_s 取最小值 1.4 m ; 由文献[29], $L_r = 0.6 \text{ m}$, $H_r = 2 \text{ m}$, $L_z = 0.1 \text{ m}$ 。代入式 (5) 可得 $D_x = 2.5 \text{ m}$ 、 $D_y = 1.5 \text{ m}$ 、 $D_z = 1.6 \text{ m}$, 平台参考点理想工作空间大小为 $2.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 。

2.2 蒙特卡洛方法改进

蒙特卡洛方法是一种基于大数定理和中心极限定理^[30-31]的应用较广的数值法, 通过人为构造合理的随机概率模型, 在机构关节空间内随机产生关节空间点, 利用坐标变换矩阵 T 逐一映射到工作空间内, 得到一定数量的平台参考点位置随机点, 将这些点以点云图形式显示, 即可直观地描述工作空间情况。

一般采用均匀分布模型 $R(a, b)$ 产生随机点, 其概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} 1/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 0 & x < a \text{ or } x > b \end{cases} \quad (6)$$

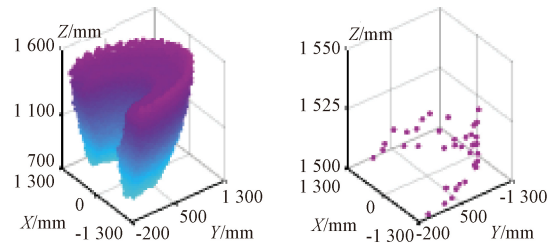
式中 a, b 表示样本在区间 $[a, b]$ 服从均匀分布。

因此, 果园作业平台关节空间点为

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_{i\min} + (\theta_{i\max} - \theta_{i\min}) \cdot X_R \\ X_R \sim R(a, b) \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\theta_{i\max}$ 与 $\theta_{i\min}$ 分别为关节角 θ_i 的最大值、最小值。本文关节角取值为包括关节角范围内所有值, $a=0, b=1$, 下同。

根据表 1 的作业平台参数, 通过蒙特卡洛方法模拟 10^5 个点得平台参考点的工作空间位置点云图如图 3a 所示, 为更清晰表达工作空间边界处点云分布情况, 截取 $Z > 1500 \text{ mm}$ 部分如图 3b 所示。



a. 整体点云图
a. Overall point cloud
b. 边界点云图
b. Boundary point cloud
图 3 平台参考点工作空间 (均匀分布)

Fig.3 Platform reference point workspace (uniform distribution)

由图 3 可知, 平台参考点的工作空间边界位置点云稀疏, 大多数点分布于非边界位置, 原因在于: 1) 关节空间边界取值不理想, 模拟 10^5 次服从均匀分布 $R(0, 1)$ 的随机数抽样, 得到随机数集合, 如图 4 所示, 以 $[0, 0.01]$ 和 $[0.99, 1]$ 为边界域, 其范围内的分布点占比 p_{bo} , 由式 (8) 计算得 2.00% ; 2) 作业平台正运动学方程为非线性方程,

将关节空间取值在映射过程中“拉伸”或者“压缩”，导致工作空间边界处点分布较少，非边界部分点分布集中，造成点浪费、边界不清晰。因此需要对蒙特卡洛方法进行改进。

$$p_{bo} = \frac{n_{bo}}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式中 n_{bo} 表示边界域内分布点个数; N 表示总模拟点个数, 10^5 个。

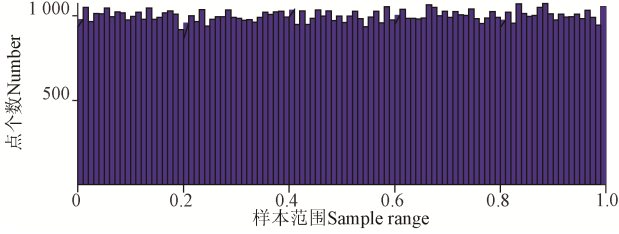


图 4 均匀分布的分布模拟

Fig.4 Distribution simulation of uniform distribution

根据上述分析,为增加平台参考点工作空间边界分布点,得到清晰的工作空间,关节空间取值分布需要边界处高而中心处低,故采用 U 形的反正弦分布,其概率密度函数为

$$\begin{cases} f(a,b) = \frac{(b+a)}{2} + \frac{(b-a)}{2} \cdot \sin(2\pi \cdot X_R) \\ X_R \sim R(a, b) \end{cases} \quad (9)$$

模拟 10^5 次服从该分布的随机数抽样,如图 5 所示,该随机数边界处分布点数明显增多,以 $[0, 0.01]$ 和 $[0.99, 1]$ 为边界域,由式(8)计算得其范围内的分布点占比为 12.76%,较均匀分布提高了 10.76%。

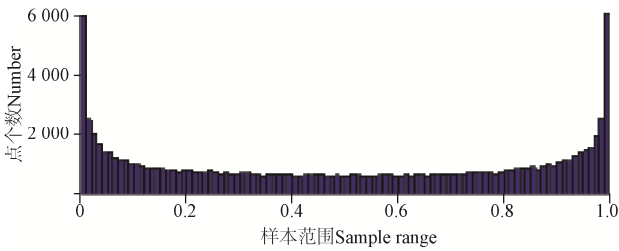


图 5 反正弦分布的分布模拟

Fig.5 Distribution simulation of arcsine distribution

采用改进蒙特卡洛方法得作业平台参考点的工作空间位置点云图如图 6,可知其工作空间边界部分点分布增加,边界线明显清晰。

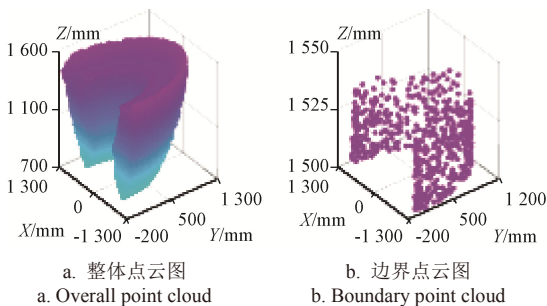


图 6 平台参考点工作空间 (反正弦分布)

Fig.6 Platform reference point workspace (arcsine distribution)

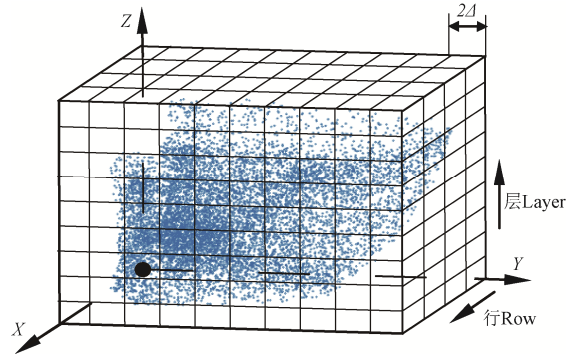
2.3 网格化算法

为进一步量化改进后的工作空间边界清晰度,采用网格化算法^[32]分别对改进前后的工作空间点云图进行分析,具体如下:

1) 外包长方体设计:根据工作空间点云图得到平台参考点在三维方向的最值,以略大于这些最值设计外包长方体,使得工作空间的所有点都分布在该长方体内。设该长方体在 3 个坐标轴方向上的最值分别为 x_{\min} 、 y_{\min} 、 z_{\min} 、 x_{\max} 、 y_{\max} 、 z_{\max} ,则长方体表示为

$$\begin{cases} x_{\min} \leq X \leq x_{\max} \\ y_{\min} \leq Y \leq y_{\max} \\ z_{\min} \leq Z \leq z_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

2) 工作空间网格化:将上述长方体沿 3 个坐标轴方向按照 2Δ 的步长间隔,划分为若干个小立方体,定义为网格化子空间,如图 7 所示。假设某个子空间中心坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,则子空间顶点坐标为 $(x_0 \pm \Delta, y_0 \pm \Delta, z_0 \pm \Delta)$ 。



注: 2Δ 为程序的搜索步长。

Note: 2Δ is the search step length of the program.

图 7 网格化空间示意图

Fig.7 Schematic diagram of gridded space

3) 子空间有序化:基于网格化子空间,沿 Z 方向按步长 2Δ 划分为若干层,然后沿 Y 方向按步长 2Δ 划分为若干行,以“层-行”编号将子空间有序化处理。

4) 子空间初筛:为节约计算时间,按“层-行”搜索所有子空间,初步筛除内部不含点的子空间,保留内部含有点的子空间。

5) 边界子空间搜索:对于保留的子空间,仍然按照“层-行”的逻辑搜索,若子空间连续,则每一行的最大值及最小值所在的子空间为边界子空间;若子空间不连续,则空间内有点而相邻子空间无点的子空间为边界子空间。

6) 清晰度评价指标:以边界分布点总个数和最底层和最顶层边界层面积为衡量清晰度的评价指标。其中边界分布点总个数指所有边界子空间的包含点数总和,边界层面积指第 i 层边界点封闭拟合曲线的面积,可分别用式(11)和式(12)表示。

$$nend = \sum \left\{ \sum \left[\sum (number)_y \right]_x \right\}_z \quad (11)$$

$$S_i = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} [f_i(y) - g_i(y)] dy \quad (12)$$

式中 $nend$ 为边界分布点总个数; $f_i(y)$ 、 $g_i(y)$ 为第 i 层边界点在 XOY 平面投影的拟合曲线(4 次多项式拟合); S_i

为该封闭拟合曲线的面积， m^2 ； y_{\min} 与 y_{\max} 分别为外包长方体在 Y 轴的最大值、最小值， mm 。

根据算法分析改进前后的平台参考点工作空间，考虑程序运行速度与计算精度，步长 $2A$ 取 10 mm ，模拟点 10^5 个时边界分布点总个数分别为 2.85×10^4 和 3.53×10^4 ；将改进前后的工作空间在同一边界层投影如图 8，根据式 (12) 计算，改进前后最底层和最顶层边界层面积分别为 0.057 、 0.16 和 0.11 、 0.22 m^2 。由此可知改进后工作空间边界分布点个数提高 23.74% ，最底层和最顶层的边界层面积增大 180.70% 和 102.69% ，表明改进后工作空间边界清晰度提高，网格化算法有效。

2.4 可达工作空间

根据蒙特卡洛方法原理，通过该方法得到工作空间的解是平台参考点到达位置的统计参量，是实际位置的近似值，为更加逼近平台参考点实际位置，采用 2 种方法多次生成工作空间，取其工作空间 X 、 Y 、 Z 方向的平均值，记为平台参考点的可达工作空间，即

$$\begin{cases} D_{kx} = \bar{x}_{k\max} - \bar{x}_{k\min} \\ D_{ky} = \bar{y}_{k\max} - \bar{y}_{k\min} \\ D_{kz} = \bar{z}_{k\max} - \bar{z}_{k\min} \end{cases} \quad (13)$$

式中 D_{kx} 、 D_{ky} 、 D_{kz} 为平台参考点可达工作空间在 X 、 Y 、 Z 方向的距离， mm ； $\bar{x}_{k\max}$ 与 $\bar{x}_{k\min}$ 、 $\bar{y}_{k\max}$ 与 $\bar{y}_{k\min}$ 、 $\bar{z}_{k\max}$ 与 $\bar{z}_{k\min}$ 分别为工作空间点云在 X 、 Y 和 Z 方向取 10 次最大值、最小值的平均值， mm 。

以 10^5 个点模拟出平台参考点的工作空间位置点，分别采用 2 种方法进行 10 次，得其 3 个方向的坐标最值如

表 2 平台参考点工作空间坐标最值

Table 2 The minimum and the maximum of platform reference point workspace

试验序号 Test number	改进前 Before improved /mm						改进后 After improved /mm					
	$x_{k\max}$	$x_{k\min}$	$y_{k\max}$	$y_{k\min}$	$z_{k\max}$	$z_{k\min}$	$x_{k\max}$	$x_{k\min}$	$y_{k\max}$	$y_{k\min}$	$z_{k\max}$	$z_{k\min}$
1	1 212.1	-1 219.6	1 218.2	-120.2	1 532.4	749.9	1 214.3	-1 222.6	1 221.0	-135.2	1 533.6	749.2
2	1 213.9	-1 218.7	1 216.7	-126.5	1 531.7	750.6	1 214.3	-1 222.3	1 220.8	-135.7	1 533.6	749.2
3	1 212.8	-1 218.6	1 218.5	-126.4	1 532.9	750.0	1 214.2	-1 222.4	1 220.7	-135.5	1 533.6	749.2
4	1 212.2	-1 219.7	1 218.6	-126.1	1 532.0	750.4	1 214.3	-1 222.5	1 221.1	-135.7	1 533.6	749.2
5	1 213.6	-1 220.1	1 218.3	-118.4	1 531.7	750.8	1 214.2	-1 222.6	1 220.8	-135.7	1 533.6	749.2
6	1 212.2	-1 218.3	1 219.1	-127.9	1 531.7	750.3	1 214.2	-1 222.6	1 220.7	-135.8	1 533.6	749.2
7	1 212.6	-1 219.6	1 217.8	-121.9	1 531.6	749.6	1 214.4	-1 222.7	1 220.9	-134.9	1 533.6	749.3
8	1 213.2	-1 220.0	1 217.7	-118.1	1 532.1	749.9	1 214.2	-1 222.5	1 220.9	-135.5	1 533.6	749.2
9	1 211.5	-1 219.5	1 218.4	-127.6	1 531.3	750.2	1 214.3	-1 222.5	1 220.7	-135.7	1 533.6	749.2
10	1 211.9	-1 220.7	1 216.5	-127.8	1 531.2	749.5	1 214.3	-1 222.7	1 220.7	-135.8	1 533.6	749.2
平均值 Average value	1 212.6	-1 219.5	1 218.0	-124.1	1 531.8	750.1	1 214.3	-1 222.5	1 220.8	-135.5	1 533.6	749.2
D_{kx} 、 D_{ky} 、 D_{kz}	2 432.1		1 342.1		1 531.8		2 436.8		1 356.3		1 533.6	
$r/\%$	2.72		10.53		4.26		2.53		9.58		4.15	

注： $x_{k\max}$ 与 $x_{k\min}$ 、 $y_{k\max}$ 与 $y_{k\min}$ 、 $z_{k\max}$ 与 $z_{k\min}$ 分别为工作空间点云在 X 、 Y 和 Z 方向最大值、最小值， mm ； D_{kx} 、 D_{ky} 、 D_{kz} 为平台参考点可达工作空间在 X 、 Y 、 Z 方向的距离， mm ； r 描述可达工作空间与理想工作空间的误差。

Note: $x_{k\max}$ and $x_{k\min}$, $y_{k\max}$ and $y_{k\min}$, $z_{k\max}$ and $z_{k\min}$ are the maximum and minimum values of the workspace point cloud in X , Y and Z directions, respectively, mm ; D_{kx} , D_{ky} , and D_{kz} are the distances from the platform reference point to the workspace in the X , Y , and Z directions, mm ; r describes the error between the reachable workspace and the ideal workspace.

根据表 2 数据和平台参考点的理想工作空间计算空间差异系数，改进后平台参考点 X 、 Y 、 Z 三个方向的空间差异系数分别为 2.53% 、 9.58% 、 4.15% ，较改进前分别降低了 6.92% 、 8.99% 、 2.64% ，表明改进后生成的工作空间更接近理想工作空间。

表 2 所示，引入空间差异系数 r 描述可达工作空间与理想工作空间的误差。

$$r = \frac{|D_{kj} - D_{lj}|}{D_{lj}} \times 100\%, \quad j = x, y, z. \quad (14)$$

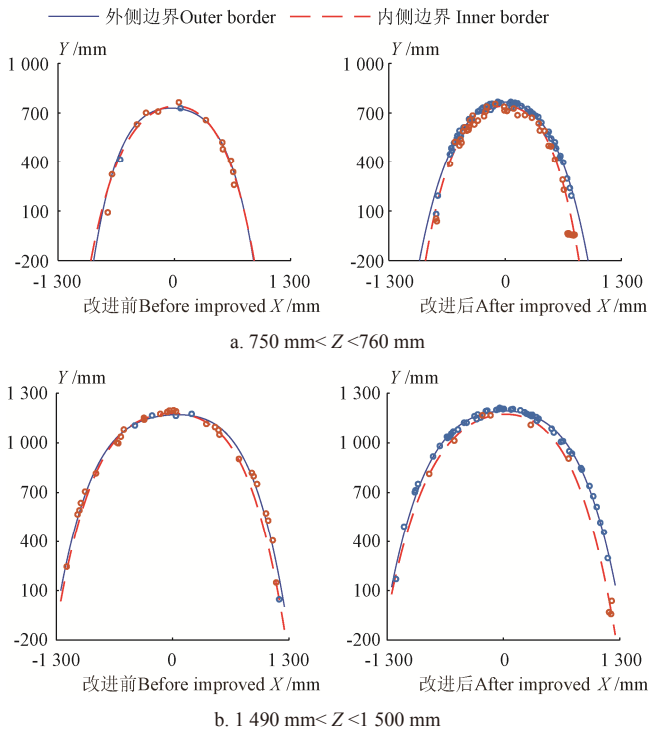


图 8 边界拟合曲线
Fig.8 Boundary fit curve

参数如表 3 所示。

试验采用北京约克科技有限公司的 VEO410L 型高速摄像机（拍摄分辨率 1 280×720，帧率 1 000 帧/s，曝光时间 40 μs）跟踪平台参考点位置；采用上海直川电子科技有限公司的 ZCT230M 倾角仪（精度 0.05°，数据通过 RS485 连续输出）测量油缸旋转角；采用日本 Panasonic 公司 HG-C1100 激光位移传感器测量油缸位移量，精度 0.01 mm；此外，还包括余姚索普电子科技有限公司的 VC-400HSS 高速摄影灯（400 Ws）、杰科斯 JK-100F 系列土壤水分仪（分辨率 0.1 %）、卷尺、秒表等。

表 3 果园作业平台主要技术参数
Table 3 Main parameters of orchard platform

参数 Parameters	数值 Values
配套动力 Supporting power /kW	17
发动机额定转速 Rated rotary speed of tractor /(r·min ⁻¹)	2 200
最小转弯半径 Minimum turning radius /m	1.6
最大升降高度 Maximum lifting height /m	1.5
最大承载质量 Maximum bearing mass /kg	150
整机质量 Total mass /kg	1 360

3.2 试验内容及方法

3.2.1 平台参考点位置跟踪试验

根据《农业机械生产试验方法》（GB/T 5667—2008）^[33]进行平台参考点位置跟踪试验，验证平台运动学模型的准确性。由于果园地形复杂和种植模式限制，高速相机不能很好捕捉平台参考点完整运动，因此在山东农业大学农学实验站空旷硬质地面上进行试验，如图 9 所示为位置跟踪试验现场，试验时间为 2019 年 10 月。

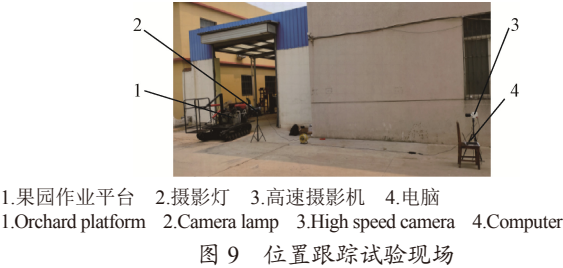


图 9 位置跟踪试验现场

因样机液压回路不能实现多个油缸同时稳定给油，将回转支承和横坡调平油缸保持中位，纵坡调平油缸缩短至

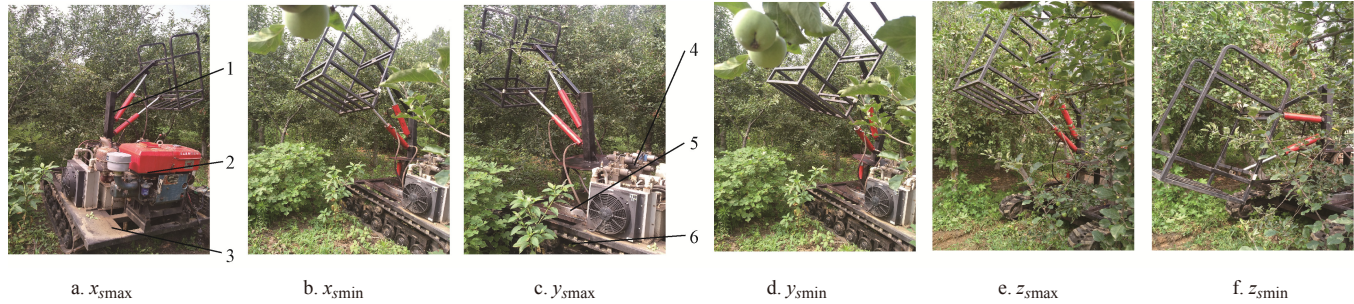


图 11 平台参考点工作空间极限位置
Fig.11 Limit position of platform reference point workspace

最小位移，升降油缸由最小行程伸长到最大行程的过程中，通过倾角仪实时测量横梁旋转角（ θ_4 ）和横梁与工作台之间旋转角（ θ_5 ），利用高速摄像机跟踪平台参考点，拍摄过程共 5 681 帧，以间隔 1 136 帧截取图像，如图 10 所示。

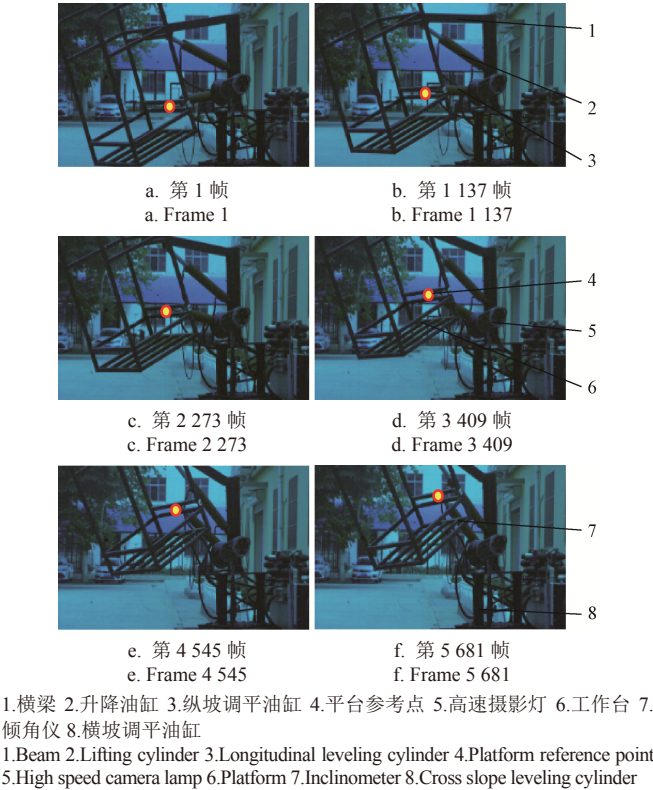


图 10 高速摄像图像
Fig.10 High-speed camera image

3.2.2 平台参考点工作空间试验

为获得平台参考点在实际果园的工作空间，2020 年 6 月在山东农业大学园艺实验基地果园进行现场试验。该果园主要种植苹果树，乔砧密植，树龄 8a，树形为自由纺锤形，株行距为 2 m×3 m，平均株高为 3.5 m，平均冠径为 2.4 m。试验时环境温度为 32 ℃，园地内地形较为平整，浅层土壤含水率约为 18.7 %。

以 D-H 坐标原点为实际坐标原点，调整回转支承和各油缸状态，分别测量平台参考点实际工作空间在 X、Y、Z 三个方向所能达到的最大值、最小值，如图 11 所示。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 平台参考点位置分析

根据高速摄像机得到的平台参考点运动跟踪图像和倾角仪测得的角度, 得到图 10 中对应各帧图像中的平台参考

点 Y 和 Z 方向坐标值和相应的关节角 θ_4 与 θ_5 , 因回转支承和横坡调平油缸保持中位, 故平台参考点在 X 方向上无变化。由样机参数和试验条件确定 $d_1=0$ mm、 $\theta_2=90^\circ$ 、 $\theta_3=90^\circ$, 代入运动学模型得平台参考点 Y 和 Z 方向的计算值, 如表 4。

表 4 各帧对应的平台参考点 Y 和 Z 方向坐标实测值与计算值

Table 4 Measured and calculated values of Y and Z coordinates of platform reference points corresponding to each frame

帧序号 Frame number	关节角度 Joint angle		Y 坐标 Y coordinate /mm			Z 坐标 Z coordinate /mm		
	$\theta_4 /(^{\circ})$	$\theta_5 /(^{\circ})$	实测值 Measured value	计算值 Calculated value	绝对差值 Absolute difference	实测值 Measured value	计算值 Calculated value	绝对差值 Absolute difference
1	-75.0	-120.0	714.0	714.1	0.1	1 428.0	1 429.4	1.4
1 137	-78.0	-116.1	735.0	734.2	0.8	1 380.1	1 381.2	1.1
2 273	-80.9	-112.1	753.2	753.7	0.5	1 328.2	1 333.7	5.5
3 409	-85.2	-106.9	770.3	771.1	0.8	1 262.4	1 264.6	2.2
4 545	-89.4	-101.9	783.0	782.4	0.6	1 194.8	1 197.1	2.3
5 681	-95.0	-95.0	792.4	792.4	0.0	1 115.9	1 116.7	0.8

由表 4 可知, 所选帧对应的 Y 方向和 Z 方向的最大差值分别为 0.8 和 5.5 mm。

为描述升降油缸整个伸长过程平台参考点的运动, 利用 Tema 软件导出拍摄图像的平台参考点位置数据, 以改进后蒙特卡洛方法求得的运动学正解为对照组, 采用 MATLAB 绘制平台参考点运动轨迹, 如图 12 所示。

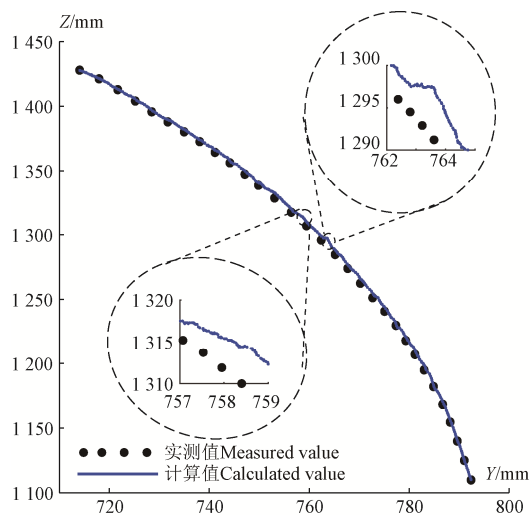


图 12 平台参考点实测值与计算值轨迹

Fig.12 Measured value and calculated value track of platform reference point

由图 12 可知, 平台参考点的实测值与计算值基本吻合, 当 Z 为 1314.4 mm 时, Y 值差值最大为 1.2 mm; 当 Y 为 763.6 mm 时, Z 值差值最大为 6.2 mm, 表明运动学模型和求解方法正确。

3.3.2 平台参考点实际工作空间分析

平台参考点实际工作空间为

$$\begin{cases} D_{sx} = \bar{x}_{smax} - \bar{x}_{smin} \\ D_{sy} = \bar{y}_{smax} - \bar{y}_{smin} \\ D_{sz} = \bar{z}_{smax} \end{cases} \quad (15)$$

式中 D_{sx} 、 D_{sy} 、 D_{sz} 为平台参考点实际工作空间在 X 、 Y 、 Z 三个方向距离, mm; \bar{x}_{smax} 与 \bar{x}_{smin} 、 \bar{y}_{smax} 与 \bar{y}_{smin} 、 \bar{z}_{smax}

与 \bar{z}_{smin} 分别为实际工作空间在 X 方向、 Y 方向和 Z 方向取 10 次最大值、最小值的平均值, mm。

调整回转支承和各油缸状态进行 10 次试验, 测量平台参考点实际工作空间在 X 、 Y 、 Z 三个方向的最大值、最小值, 并求取最大值、最小值的平均值代入式 (15), 得: $D_{sx}=2\ 430.2$ mm、 $D_{sy}=1\ 346.0$ mm、 $D_{sz}=1\ 533.7$ mm。

利用空间差异系数 $r'=(|D_{sj}-D_{lj}|/D_{lj})\times 100\%$ ($j=x$ 、 y 、 z , 下同) 和 $r''=(|D_{sj}-D_{kj}|/D_{kj})\times 100\%$ 分别描述实际工作空间与理想工作空间和可达工作空间的误差, 则平台参考点实际工作空间与理想工作空间和可达工作空间的对比如表 5 所示。

表 5 实际工作空间与理想工作空间和可达工作空间对比

Table 5 Actual workspace compared with ideal workspace and reachable workspace

方向 Direction	工作空间 Workspace /mm			差异系数 Coefficient /%	
	D_s	D_l	D_k	r'	r''
X	2 430.2	2 500	2 436.8	2.79	0.27
Y	1 346.0	1 500	1 356.3	10.27	0.76
Z	1 533.7	1 600	1 533.6	4.15	0.01

注: D_s 、 D_l 、 D_k 分别表示实际工作空间、理想工作空间和可达工作空间; r' 与 r'' 分别表示实际工作空间与理想工作空间、实际工作空间与可达工作空间的误差。

Note: D_s , D_l and D_k represent actual workspace, ideal workspace and reachable workspace, respectively; r' and r'' respectively represent the error of actual workspace and ideal workspace, actual workspace and reachable workspace.

由表 5 可知, 平台参考点实际工作空间与理想工作空间差异较大, Y 方向最大, 达到 10.27%, 主要原因在于设计样机时侧重行距和株高, 株距考虑的较少, 但因 Y 方向为前进方向, 对实际作业影响不大; 与可达工作空间的差异较小, X 、 Y 、 Z 三个方向的空间差异系数 r'' 分别为 0.27%、0.76% 和 0.01%, 表明通过改进的蒙特卡洛方法分析工作空间有效。

另外试验过程中, 偶尔会出现运动不连续、参考点出现晃动等现象, 分析原因主要有: 安装铰链存在间隙和摩擦; 升降速度过快, 作业平台由于惯性产生摆动。

4 结 论

1) 本文以前期研制的果园作业平台为研究对象, 以

简化的作业平台模型建立 D-H 坐标系, 推导了果园作业平台参考点的正向运动学方程。

2) 利用 U 形反正弦分布函数改进了蒙特卡洛方法, 采用网格化算法对改进前后生成的工作空间进行分析, 改进后最底层与最顶层边界面积分别增大 180.70 % 和 102.69 %, 与理想工作空间 X、Y、Z 三个方向的差异系数较改进前分别降低了 6.92 %、8.99 %、2.64 %, 表明改进后工作空间边界清晰度明显提高, 更接近理想工作空间。

3) 对平台进行位置跟踪和实际空间测试: 平台参考点位置的实测值与计算值基本吻合, 最大差值仅为 6.2 mm, 表明运动学模型正确; 平台参考点实际工作空间与理想工作空间差异较大, 而与可达工作空间差异较小, 与可达工作空间差异系数最大仅为 0.76 %, 表明改进方法有效, 为下一步作业平台结构和参数优化提供理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] 陈科尹, 邹湘军, 熊俊涛, 等. 基于视觉显著性改进的水果图像模糊聚类分割算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 157-165.
Chen Keyin, Zou Xiangjun, Xiong Juntao, et al. Improved fruit fuzzy clustering image segmentation algorithm based on visual saliency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 157-165. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王长勤, 许林云, 周宏平, 等. 偏心式林果振动采收机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 10-16.
Wang Changqin, Xu Linyun, Zhou Hongping, et al. Development and experiment of eccentric-type vibratory harvester for forest-fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 10-16. (in Chinese with English abstract)
- [3] 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等. 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 38-46.
Fan Guiju, Wang Yongzhen, Zhang Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 38-46. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱余清, 洪添胜, 吴伟斌, 等. 山地果园自走式履带运输车抗侧翻设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 19-23.
Zhu Yuqing, Hong Tiansheng, Wu Weibin, et al. Design and simulation of side rollover resistant capability of tracked vehicle for mountain orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 19-23. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王丹丹, 宋怀波, 何东健. 苹果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 59-69.
Wang Dandan, Song Huaibo, He Dongjian. Research advance on vision system of apple picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 59-69. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨洲, 牛萌萌, 李君, 等. 果园在线混药型静电喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 60-67.
Yang Zhou, Niu Mengmeng, Li Jun, et al. Design and experiment of an electrostatic sprayer with on-line mixing system for orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(21): 60-67. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨永, 曾祥坤. 一种椰子抓取采摘机械手设计及其工作空间仿真分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 132-135.
Yang Yong, Zeng Xiangkun. Design of the manipulator for picking coconut and simulation of its work space[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 132-135. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陆叶, 杨云兰. 剪枝机器人的虚拟样机建模与运动学分析[J]. 机械与电子, 2015(1): 73-75.
Lu Ye, Yang Yunlan. Kinematical analysis and virtual prototype modeling of pruning robot[J]. Machinery & Electronics, 2015(1): 73-75. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡建平, 靳合琦, 常燕超, 等. 基于 Delta 并联机构钵苗移栽机器人尺度综合与轨迹规划[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 28-35.
Hu Jianping, Jin Heqi, Chang Yanchao, et al. Dimensional synthesis and trajectory planning of plug seedling transplanting robot based on delta parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 28-35. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李国利, 姬长英, 顾宝兴, 等. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 14-21.
Li Guoli, Ji Changying, Gu Baoxing, et al. Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 14-21. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 381-389. (in Chinese with English abstract)
- [12] 阳涵疆, 李立君, 高自成. 基于旋量理论的混联采摘机器人正运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 53-59.
Yang Hanjiang, Li Lijun, Gao Zicheng. Forward kinematics analysis and experiment of hybrid harvesting robot based on screw theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 53-59. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 experiment of manipulator for three-dimensional seedling tray management robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 10-19. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张颖, 赵建国, 沈鑫, 等. Delta 并联机器人的运动学分析及虚拟样机仿真[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(11): 20-24. Zhang Ying, Zhao Jianguo, Shen Xin, et al. The kinematic analysis and virtual prototyping simulation of a delta parallel manipulator[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(11): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵智远, 徐振邦, 何俊培, 等. 基于工作空间分析的 9 自由度超冗余串联机械臂构型优化[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 51-63. Zhao Zhiyuan, Xu Zhenbang, He Junpei, et al. Configuration optimization of nine degree of freedom super-redundant serial manipulator based on workspace analysis[J]. Journal of Mechanical engineering, 2019, 55(21): 51-63. (in Chinese with English abstract)
- [16] 伍辑军, 宋欣, 杨磊, 等. 采摘机械臂结构参数对其工作空间的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 251-254.
- [17] 王永振. 果园多功能遥控作业平台的研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018. Wang Yongzhen. Design and Experiment of Multi-function Remote Operation Platform in Orchard[D]. Tai'an Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [18] 卢文娟, 张立杰, 曾达幸, 等. 基于一种自由度新理论的过约束判断方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 17-24. Lu Wenjuan, Zhang Lijie, Zeng Daxing, et al. Method for determination of overconstraint based on a new mobility theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural engineering, 2014, 50(17): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郭卫东, 于靖军. 一种计算平面机构自由度的新方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 125-129. Guo Weidong, Yu Jingjun. A new method of mobility calculation for planar mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural engineering, 2013, 49(7): 125-129. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丁华锋, 曹宇, 杨真真, 等. 基于 D-H 法的多连杆正铲挖掘机运动学分析与包络图绘制[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(3): 197-203. Ding Huafeng, Cao Yu, Yang Zhenzhen, et al. Position kinematics analysis of multi-linkage face-shovel excavator and envelope plotting using D-H method[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(3): 197-203. (in Chinese with English abstract)
- [21] Zhu Chunxia, Zhao Zhiyu. Research on influence of joint clearance on precision of 3-TPT parallel robot[J]. Mechanical Science 2019, 10(1):287-29.
- [22] Amanpreet S, Ashish S, Sanjeev S. Extension of D-H parameter method to hybrid manipulators used in robot-assisted surgery[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2015, 229(10):703-712.
- [23] 吕永军, 刘峰, 郑颺默, 等. 通用和修正 D-H 法在运动学建模中的应用分析[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(5): 197-202. Lü YongJun, Liu Feng, Zheng Liaomo, et al. Application analysis of generalized and modified D-H method in kinematic modeling[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(5): 197-202. (in Chinese with English abstract)
- [24] Wang Fuping, Chen Chong, Zhou Tingting. The research of lift control system in four-point platform based on DSP[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3823: 307-310.
- [25] 李扬, 杜帅, 陈宝林, 等. 高枝修剪机姿态协调控制与精准锯切定位[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 40-48. Li Yang, Du Shuai, Chen Baolin, et al. Attitude coordination control and accurately sawing-positioning of high-branch pruning machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 40-48. (in Chinese with English abstract)
- [26] 罗陆锋, 邹湘军, 程堂灿, 等. 采摘机器人视觉定位及行为控制的硬件在环虚拟试验系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 39-46. Luo Lufeng, Zou Xiangjun, Cheng Tangcan, et al. Design of virtual test system based vision localization on hardware-in-loop for picking robot and behavior control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 39-46. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 中国标准化与信息分类编码研究所. GB/T13547-1992 工作空间人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [30] 权龙哲, 张冬冬, 查绍辉, 等. 三臂多功能棚室农业机械人的运动学分析及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 32-38. Quan Longzhe, Zhang Dongdong, Zha Shaohui, et al. Kinematics analysis and experiment of multifunctional agricultural robot in greenhouse with three arms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(13): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孟煜飞, 何必仕. 基于蒙特卡洛模拟法的管网节点压力分析[J]. 杭州电子科技大学学报: 自然科学版, 2019, 39(3): 60-64. Meng Yufei, He Bishi. Node pressure analysis of water distribution system based on Monte Carlo simulation method[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2019, 39(3): 60-64. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 196-201. (in Chinese with English abstract)
- [33] 全国农业机械标准化技术委员会. GB/T5667-2008 农业机械生产试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

Workspace analysis and experiments of orchard platform based on D-H method

Li Zhao^{1,2}, Fan Guiju^{1,3*}, Liang Zhao^{1,2}, Niu Chengqiang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Tai'an, 271018, China; 3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Tai'an, 271018, China)

Abstract: In recent years, due to the transfer of rural labor and the increase of labor cost, there have be more and more researches and applications on the orchard platform which was used for assisting artificial works. The workspace is an important index to measure the organic integration of orchard platform and orchard planting mode. The researcher about kinematics and workspace analysis of agricultural machinery or agricultural robots was few. The values of the samples with the traditional Monte Carlo method are evenly distributed. In the course of the mapping process, the non-linear equation 'stretches' or 'compresses' the uniformly distributed intervals, which results in uneven distribution of the boundary position of platform reference point. The sparse point cloud and large 'noise' makes the workspace boundary inaccurate and thereby affects the optimization of mechanical parameters of orchard platform and other follow-up researches. In order to improve the utilization rate of orchard platform's workspace and make the operators more comfort, a kinematic model of orchard platform based on the D-H method was established to deduce the positive solution of the platform reference point kinematics of orchard platform and analyze the workspace. In view of the problems, such as workspace boundary fuzziness of orchard platform and point waste etc, an improved Monte Carlo method in which the domain of definition was of the U-shaped arcsine distribution was proposed, and a gridding algorithm was used to analyze the workspace generated by the ones before and after improved, then a cuboid was constructed which was divided into several subspaces along the direction of axis Z-Y-X contained all simulation points. The boundary definition therein was obviously improved, the number of boundary distribution points of workspace was increased by 23.74 %, and the area of the bottom and the top boundary layer was increased by 180.70 % and 102.69 % respectively. By taking the mean value of the workspace generated multiple times as the reachable workspace of orchard platform, the spatial difference coefficients in three directions were reduced 6.92 %, 8.99 % and 2.64 % respectively compared with those before improved, which indicated that the workspace after improved was closer to the ideal workspace. Through the platform reference point position tracking test, the measured value of platform reference point basically agreed with the calculated value. When Z was 1 314.4 mm, the maximum difference of Y direction was 1.2 mm; when Y was 763.6 mm, the maximum difference of Z direction was 6.2 mm. The results showed that the kinematic model and the solution method were correct. On the actual workspace test of platform reference point, there was larger difference between the actual workspace and the ideal workspace of platform reference point, which was maximum in the direction Y and it was 10.27 %, but which between actual workspace and reachable workspace was less and they were respectively 0.27 %, 0.76 % and 0.01 % in three directions, indicating the one of analyzing workspace by improving the Monte Carlo method was effective. The research can provide the theoretical reference for orchard operation platform's structural parameter optimization, smart control and workspace analysis of similar type of agricultural machinery.

Keywords: agricultural machinery; kinematics; workspace; Monte Carlo method; D-H method