doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.006

混联式名优茶采摘机械臂优化设计与试验

韩重阳[1]　王　博[1]　王　锴[1]　吴伟斌[1,2]　罗远强[1,2]　吕金洪[1]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;
2.广东省山地果园机械创新工程技术研究中心,广州 510642)

摘要:针对名优茶采摘对高精度、高灵活性机械臂的需求,设计了一种基于 Delta 并联机构与 3 自由度串联机构的混联构型茶叶采摘机械臂。首先,结合茶园环境与茶丛生长特性,通过几何法和 D-H 参数法分别建立了并联与串联机构的运动学模型,基于欧拉角变换实现了混联机械臂的整体运动学求解。其次,采用 NSGA-Ⅱ多目标优化算法对机械臂结构尺寸进行优化,使全域姿态可操作度、区域姿态可操作度及全局灵巧度分别提升 54.3%、81.3%和 57.92%。进一步通过 ADAMS 动力学仿真和 ANSYS 拓扑优化,实现了主动臂减重 27.62%,同时最大应力和变形量分别控制在 2.118 MPa 和 0.015 mm 以内,关节驱动力矩降低 13.06%。样机试验表明,该机械臂重复定位精度为 0.036 mm,单芽采摘成功率为 79%,平均耗时 2.27 s,验证了混联方案在名优茶采摘中的可行性。

关键词:名优茶采摘;混联机械臂;运动学分析;多目标优化

中图分类号:S225　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0089-14　　**OSID**:

Optimized Design and Test of Hybrid Robotic Arm for Picking of High Quality Tea

Han Chongyang[1]　Wang Bo[1]　Wang Kai[1]　Wu Weibin[1,2]　Luo Yuanqiang[1,2]　Lü Jinhong[1]

(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
2. *Guangdong E&T Research Center for Mountainous Orchard Machinery, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Aiming to address the demand for high-precision, high-flexibility robotic arms in the picking of premium tea, a hybrid-configuration tea-picking robotic arm based on a Delta parallel mechanism and a 3-degree-of-freedom serial mechanism was designed. Firstly, considering the tea garden environment and the growth characteristics of tea bushes, kinematic models of the parallel and serial mechanisms were established by using the geometric method and the D-H parameter method, respectively. The overall kinematic solution of the hybrid robotic arm was achieved through Euler angle transformation. Subsequently, the NSGA-Ⅱ multi-objective optimization algorithm was employed to optimize the structural dimensions of the robotic arm, resulting in improvements of 54.3%, 81.3%, and 57.92% in global orientation manipulability, regional orientation manipulability, and global dexterity, respectively. Furthermore, through ADAMS dynamic simulation and ANSYS topology optimization, the mass of the active arm was reduced by 27.62%, while the maximum stress and deformation were controlled within 2.118 MPa and 0.015 mm, respectively, and the joint driving torque was decreased by 13.06%. Prototype tests demonstrated that the robotic arm achieved a repeated positioning accuracy of 0.036 mm, a single-bud plucking success rate of 79%, and an average cycle time of 2.27 s, verifying the feasibility of the hybrid configuration for premium tea plucking.

Key words: picking of high quality tea; hybrid robotic arm; kinematic analysis; multi-objective optimization

收稿日期:2026-03-04　修回日期:2026-04-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32572189)和广东省自然科学基金面上项目(2026A1515011831)

作者简介:韩重阳(1996—),男,博士生,主要从事农业机器人技术研究,E-mail:scauhancy@stu.scau.edu.cn

通信作者:吴伟斌(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械技术研究,E-mail:wuweibin@scau.edu.cn

0 引言

茶叶作为我国重要的经济作物,其采摘环节的机械化水平直接影响生产效率和经济效益[1]。名优茶(如一芽一叶或一芽二叶)的采摘要求高精度和选择性,传统大宗茶采摘机械虽效率高,但缺乏选择性[2],难以满足名优茶“一芽一叶”的高标准采摘需求,而人工采摘存在劳动强度大、季节性用工短缺等问题[3-4]。随着农业智能化发展,采摘机器人成为突破瓶颈的关键技术,其中机械臂作为核心执行部件,其结构设计直接影响采摘效率与质量[5]。

目前,国内外学者针对采摘机器人开展了广泛研究。串联机械臂凭借多自由度、大工作空间等优势,在番茄、甜椒等作物采摘中取得进展[6-8],但存在关节误差累积、动态响应慢等问题;并联机械臂则凭借高灵活度、高刚度特性在名优茶采摘领域得到应用[9],陈建能团队[10-12]采用 Delta 型和 XYZ 式机械臂研发了多款名优茶采摘机器人,显著提高了采摘效率;徐丽明团队[13]改进了龙门架式采摘机器人,提出了双臂式采摘机器人设计方案;Wang 等[14]将 Stewart 并联平台应用于履带式采摘机器人上,组成 6 自由度的茶叶采摘机械臂,提高了采摘机械臂的稳定性。由于茶芽叶的生长姿态不同,单一类型采摘机械臂存在自由度不足导致难以调整姿态,采摘性能受限;混联机械臂则融合了并联机构的高速度、高精度与串联机构的多自由度优势,在工业领域已展现出综合性能优势[15-16],但其在农业采摘中的应用仍面临轻量化、适应性能不足等挑战[17]。现有针对名优茶采摘的研究多是直接移植工业构型,聚焦于机械臂运动学建模与工作空间分析,未能充分契合茶叶生长特性与采摘工艺需求,对采摘任务导向的尺寸优化、动力学性能提升研究较少[18]。相较于传统串联构型,混联方案在保证末端灵活性的同时可有效抑制关节误差累积;与纯并联采摘构型相比,混联结构能够在不显著牺牲刚度的前提下提供更大的姿态调节裕度,更适应茶芽在冠层中分散、朝向各异的非结构化作业环境。

基于此,本文结合名优茶生长空间分布特征并融合串并联机构优势,提出一种面向名优茶采摘的 Delta-串联混联构型机械臂。通过几何法与 D-H 参数法分别建立并联与串联机构的运动学模型,并基于欧拉角简化逆解求解。采用 NSGA-Ⅱ算法优化机械臂尺寸,提升姿态可操作度与灵活度。结合 ADAMS 动力学仿真与 ANSYS 拓扑优化,实现轻量化设计。最后通过样机试验验证定位精度与采摘效率。

1 采摘机械臂任务空间与结构设计

1.1 采摘任务空间分析

为了实现复杂茶园环境下不同姿态的茶芽叶精准采摘,在设计采摘机械臂时需要根据茶园种植情况和茶芽生长特点分析采摘任务空间[19]。本文以广东省名优茶“英红 9 号”为对象,通过调研广东省清远试验站的茶园可知,该品种属于地面栽培直立生长作物,采用矮化密植种植;测量可知茶丛间距约 0.3 m,茶丛宽度 0.6 ~ 0.8 m,茶丛高度 0.8 ~ 1.0 m,其中茶芽主要分布于距地面 0.8 m 处,即位于茶丛的顶部。茶芽叶大部分呈竖直向上生长,存在侧向生长以及侧芽等导致姿态随机分布,而且密度分布不均,如图 1 所示。



图 1 茶园环境和茶芽叶生长特征

Fig. 1 Characteristics of tea plantation environment and growth of tea buds and leaves

基于茶叶的空间生长分布特征,将机械臂采摘任务空间定义为茶丛顶部的矩形工作区域,其几何尺寸(长×宽×高)为 0.8 m×0.8 m×0.2 m,该空间范围可有效覆盖茶丛顶部大部分的可采摘茶芽区域。为适应茶园采摘任务空间特征,要求机械臂具备较高的可操作度和灵活度,因此采用倒挂式安装机械臂,实现自上而下的采摘作业模式。

1.2 机械臂结构设计

为了提高采摘效率并实现茶芽目标的快速定位,采用并联机械臂结合串联机械臂合并形成 6 自由度混联机械臂构型,并联部分采用 Delta 型机械臂带动串联部分高速移动,使末端执行器快速精准地到达茶芽目标位置。并联部分由静平台、主动臂、从动臂、减速器、驱动电机与动平台组成,主动臂与减速器、驱动电机连接,从动臂则与动平台连接,整体具有 3 个空间平移自由度。考虑到茶芽生长姿态不同以及侧芽采摘问题,自主设计了轻量化的关节型串联机械臂,该机械臂具有 3 个旋转自由度负责全方位采摘空间姿态控制,由驱动电机和末端执行器组成,整体结构搭载于并

联机械臂末端的动平台下方，末端执行器安装于串联机械臂末端。

本文设计的混联茶叶采摘机械臂旨在将并联机械臂的高速、精准与串联机械臂灵活、自由度多的特点相互结合，实现不同姿态下的茶芽采摘功能，采用 Solidworks 软件对混联机械臂进行虚拟样机建模，结果如图 2 所示。

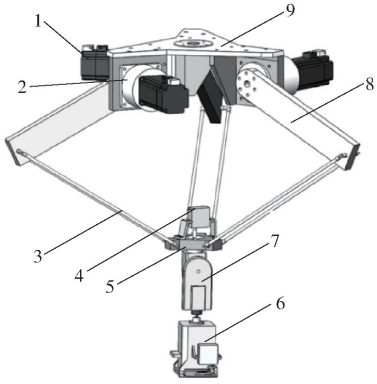


图 2　混联茶叶采摘机械臂三维模型

Fig. 2　Three-dimensional model of hybrid tea picking manipulator

1. 并联机械臂驱动电机　2. 并联机械臂减速器　3. 并联从动臂　4. 串联机械臂驱动电机　5. 动平台　6. 末端执行器　7. 串联机械臂　8. 并联机械臂主动臂　9. 静平台

2　混联机械臂运动学分析与工作空间

本文对于混联茶叶采摘机械臂的运动学采取先分后合的方式，分别建立并联及串联机构的独立运动学方程，然后求解混联机械臂的运动学正逆解并分析其工作空间。

2.1　并联机械臂逆运动学分析

并联机械臂逆运动学分析为已知动坐标系$\{O_A\}$三维坐标的情况下，求解各支链与竖直方向间的夹角β_i，本文采用封闭向量多边形法求解。构建 Delta 并联机械臂简化模型及其分解模型示意图，如图 3 所示。

分析图 3 可知，Detla 并联机构静平台的 3 个顶点A_i在基坐标系$\{O\}$中的坐标为

$$A_i=\begin{bmatrix}R\mathrm{c}\alpha_i\\R\mathrm{s}\alpha_i\\0\end{bmatrix}\tag{1}$$

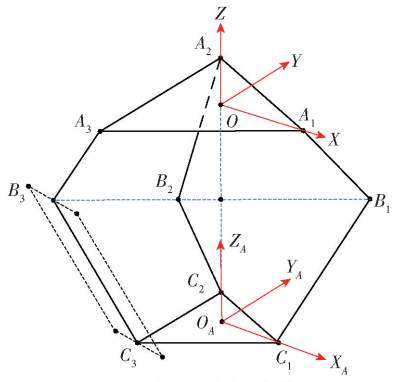
其中　$\alpha_i=(i-1)\pi/3\quad(i=1,2,3)$

式中　R——静平台外接圆半径

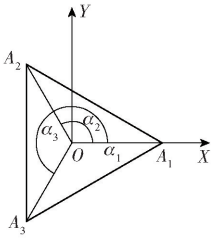
α_i——直链与基坐标系 X 轴的夹角

s 表示正弦函数，c 表示余弦函数。

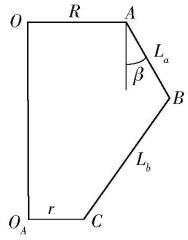
动坐标系$\{O_A\}$的原点O_A相对于静坐标系$\{O\}$原点 O 的坐标可以表示为 $O_A=(x,y,z)$，依据式(1)类推，动平台中各顶点C_i在坐标系$\{O_A\}$中的



(a) Delta并联机械臂简化模型



(b) 静平台俯视图



(c) 支链示意图

图 3　并联机构简化模型与分解示意图

Fig. 3　Simplified model and decomposition diagram of parallel mechanism

位置可以表示为

$$^{A}\boldsymbol{C}_i=\begin{bmatrix}r\mathrm{c}\alpha_i\\r\mathrm{s}\alpha_i\\0\end{bmatrix}\tag{2}$$

式中　r——动平台外接圆半径

O_i在坐标系$\{O\}$中的位置为

$$\boldsymbol{C}_i=\begin{bmatrix}r\mathrm{c}\alpha_i+x\\r\mathrm{s}\alpha_i+y\\z\end{bmatrix}\tag{3}$$

由式(3)及图 3c 推导点B_i在坐标系$\{O\}$中的坐标为

$$\boldsymbol{B}_i=\begin{bmatrix}(R+L_a\mathrm{c}\beta_i)\,\mathrm{c}\alpha_i\\(R+L_a\mathrm{c}\beta_i)\,\mathrm{s}\alpha_i\\-L_a\beta_i\end{bmatrix}\tag{4}$$

式中　L_a——并联主动臂长度

L_b——并联从动臂长度

根据空间几何关系可得

$$\begin{aligned}&[x-(R-r+L_b\mathrm{c}\beta_i)\,\mathrm{c}\alpha_i]^2+\\&[y-(R-r+L_b\mathrm{c}\beta_i)\,\mathrm{s}\alpha_i]^2+\\&[z+L_b\mathrm{s}\beta_i]^2=L_b^2\end{aligned}\tag{5}$$

分别代入未知β_i和已知的α_i参数值，得到 3 个支链对应的等式，通过三角恒等变换，令 $\tan\beta_i=t_i$，将 3 个等式中的三角函数分别替换为 $\sin\beta_i=2t/(1+t^2)$、$\cos\beta_i=(1-t^2)/(1+t^2)$，以此将 3 个方程组转换为一元二次方程

$$D_i t_i^2 - E_i t_i + F_i = 0 \quad (i = 1,2,3) \tag{6}$$

3 个支链对应一元二次方程中的系数 D_i、E_i、F_i 分别为

$$\begin{cases} D_1 = \dfrac{x^2 + y^2 + z^2 + (R-r)^2 + L_a^2 - L_b^2 - 2x(R-r)}{2L_a} - \\ \qquad (R - r - x) \\ E_1 = 2z \\ F_1 = \dfrac{x^2 + y^2 + z^2 + (R-r)^2 + L_a^2 - L_b^2 - 2x(R-r)}{2L_a} + \\ \qquad (R - r - x) \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} D_2 = \dfrac{x^2 + y^2 + z^2 + (R-r)^2 + L_a^2 - L_b^2 - (x - \sqrt{3}y)(R-r)}{2L_a} - \\ \qquad 2(x - \sqrt{3}y)(R-r) \\ E_2 = 2z \\ F_2 = \dfrac{x^2 + y^2 + z^2 + (R-r)^2 + L_a^2 - L_b^2 - (x - \sqrt{3}y)(R-r)}{2L_a} + \\ \qquad 2(x - \sqrt{3}y)(R-r) \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} D_3 = \dfrac{x^2 + y^2 + z^2 + (R-r)^2 + L_a^2 - L_b^2 - 2x(R-r)}{2L_a} - \\ \qquad 2(x + \sqrt{3}y)(R-r) \\ E_3 = 2z \\ F_3 = \dfrac{x^2 + y^2 + z^2 + (R-r)^2 + L_a^2 - L_b^2 - 2x(R-r)}{2L_a} + \\ \qquad 2(x + \sqrt{3}y)(R-r) \end{cases} \tag{9}$$

求解一元二次方程和式(7)~(9)得到 Delta 并联机构的运动学反解，即并联机械臂各支链对应的关节角度 $\beta_i = 2\arctan t_i$。一般情况方程组会有两组解，取两者中的较小值作为逆解，舍去造成奇异位形的解。

2.2 并联机械臂正运动学分析

并联机械臂的正运动学分析采用几何法求解，由于并联机械臂只有 3 个平移自由度，所以其正运动学分析只计算动平台中心点 O_A 的空间坐标，而不涉及姿态问题，并联机械臂运动过程中从动臂存在的平行四边形特性，可以在并联机构中添加如图 4 所示的辅助线。

如图 4 所示，分别将 3 个主动臂末端点 B_i 向三角形 $B_1B_2B_3$ 重心平移距离 r，使得 $B_iB_i'O_AC_i$ 构成 3 个平行四边形，三角形 $B_1'B_2'B_3'$ 内点 M 为 O_A 到三角形所在平面的垂足，由平行四边形定理可知 $|O^AB_1'|$、$|O^AB_2'|$、$|O^AB_3'|$ 等长，所以点 M 同时为三角形 $B_1'B_2'B_3'$ 外接圆的圆心，取点 N 为边 $B_2'B_3'$ 的中点，则

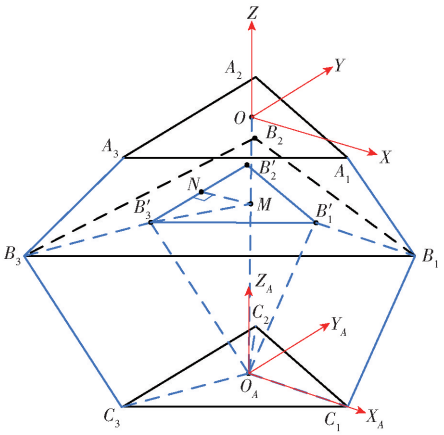


图 4 Delta 机械臂正解辅助模型

Fig. 4 Delta robotic arm positive solution auxiliary model

NM 垂直于边 $B_2'B_3'$，根据向量运算可知

$$\boldsymbol{l}_{OO_A} = \boldsymbol{l}_{OM} + \boldsymbol{l}_{MO_A} \tag{10}$$

其中

$$\begin{cases} \boldsymbol{l}_{OM} = \boldsymbol{l}_{OB_2'} + \boldsymbol{l}_{B_2'M} \\ \boldsymbol{l}_{B_3'M} = \boldsymbol{l}_{B_3'N} + \boldsymbol{l}_{NM} \end{cases} \tag{11}$$

由于 3 个驱动关节的角度 β_i 为已知量，同时主动臂 $|A_iB_i|$ 长度为 L_a，从动臂 $|B_iC_i|$ 长度为 L_b，则根据式(4)类推可得 B_i' 的坐标为

$$\boldsymbol{B}_i' = \begin{bmatrix} (R - r + L_a c\beta_i) c\alpha_i \\ (R - r + L_a c\beta_i) s\alpha_i \\ -L_a s\beta_i \end{bmatrix} \quad (i = 1,2,3) \tag{12}$$

由公式(12)以及点 N 为边 $B_2'B_3'$ 中点可以求出式(11)中 $l_{B_3'N}$ 的大小。由于 NM 与 $B_3'B_2'$ 相互垂直，且点 M 为三角形 $B_1'B_2'B_3'$ 外接圆圆心，可以利用三角形外接圆圆心性质以及用一个向量的模长与方向向量的乘积表示向量 $\boldsymbol{l}_{NM}$，设三角形 $B_1'B_2'B_3'$ 外接圆半径为 R_B，面积为 S，有

$$\begin{cases} l_{NM} = |\boldsymbol{l}_{NM}| l_{n_{NM}} \\ |\boldsymbol{l}_{NM}| = \sqrt{R_B^2 - \dfrac{l_{B_3'B_2'}}{4}} \\ R_B = |\boldsymbol{l}_{B_3'M}| = \dfrac{|\boldsymbol{l}_{B_3'B_1'}| |\boldsymbol{l}_{B_1'B_2'}| |\boldsymbol{l}_{B_2'B_3'}|}{4S} \\ l_{n_{NM}} = \dfrac{l_{B_3'B_1'} l_{B_1'B_2'} l_{B_2'B_3'}}{|\boldsymbol{l}_{B_3'B_1'}| |\boldsymbol{l}_{B_1'B_2'}| |\boldsymbol{l}_{B_2'B_3'}|} \end{cases} \tag{13}$$

同理根据向量 $\boldsymbol{l}_{NM}$ 的解法可以将向量 $\boldsymbol{l}_{MO_A}$ 表示为

$$\begin{cases} l_{MO_A} = |\boldsymbol{l}_{MO_A}| l_{n_{MO_A}} \\ |\boldsymbol{l}_{MO_A}| = \sqrt{L_b^2 - R_B^2} \\ l_{n_{MO_A}} = \dfrac{l_{B_2'B_3'} l_{B_3'B_1}}{|\boldsymbol{l}_{B_2'B_3'}| |\boldsymbol{l}_{B_3'B_1}|} \end{cases} \tag{14}$$

联立公式(10)~(14)即可求解向量 $\boldsymbol{l}_{OO_A}$，即可知动平台中心点 O_A 的坐标，至此完成 Delta 并联机械臂正运动学求解。

2.3　并联机械臂雅可比矩阵求解

为了后续优化并联机械臂的灵巧度指标，采用微分变换法求解并联机械臂的雅可比矩阵[21]，设驱动关节角速度为 β，机构末端的输出速度为 $\boldsymbol{v}$，则由雅可比矩阵定义可以得到

$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\beta}}=[\dot{x},\dot{y},\dot{z}]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

其中

$$\dot{\boldsymbol{\beta}}=[\dot{\beta}_1,\dot{\beta}_2,\dot{\beta}_3]^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

式中　$\boldsymbol{\beta}$——驱动角速度

$\dot{x}$、$\dot{y}$、$\dot{z}$——末端沿 x、y、z 轴的分速度

$\boldsymbol{J}$——雅克比矩阵

对时间求导可得

$$\frac{\partial F_i}{\partial x}\dot{x}+\frac{\partial F_i}{\partial y}\dot{y}+\frac{\partial F_i}{\partial z}\dot{z}=\frac{\partial F_i}{\partial \beta_i}\dot{\beta}_i \tag{17}$$

将上述公式写成矩阵形式可以得出 Delta 机械臂的雅克比矩阵表达式

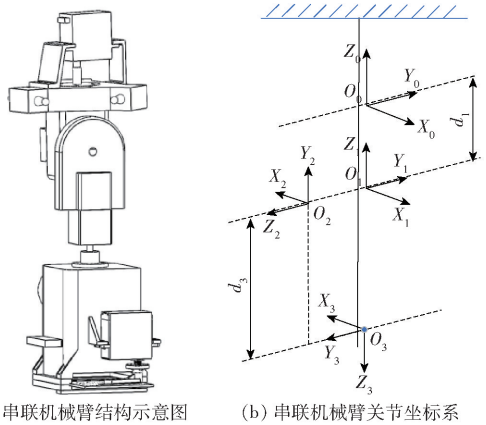
$$\boldsymbol{v}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\beta}}=\boldsymbol{J}_x^{-1}\boldsymbol{J}_q\dot{\boldsymbol{\beta}} \tag{18}$$

其中

$$\begin{cases}\boldsymbol{J}_x=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial F_1}{\partial x} & \dfrac{\partial F_2}{\partial y} & \dfrac{\partial F_3}{\partial z}\\ \dfrac{\partial F_1}{\partial x} & \dfrac{\partial F_2}{\partial y} & \dfrac{\partial F_3}{\partial z}\\ \dfrac{\partial F_1}{\partial x} & \dfrac{\partial F_2}{\partial y} & \dfrac{\partial F_3}{\partial z}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{J}_q=\mathrm{diag}\left(\begin{bmatrix}\dfrac{\partial F_1}{\partial \beta_1} & \dfrac{\partial F_2}{\partial \beta_2} & \dfrac{\partial F_3}{\partial \beta_3}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\right)\end{cases} \tag{19}$$

2.4　串联机械臂正运动学分析

串联机械臂正运动学分析采用 D－H 参数法求解[22]，通过建立串联机械臂各关节连杆坐标系，采用齐次变换矩阵求解机械臂末端与基座之间的位姿关系。如图 5 所示，θ_i 代表关节转角，即关节 i 从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴旋转的角度；d_i 代表连杆偏距，即从 x_{i-1} 轴到 x_i 轴移动的距离；a_i 代表连杆长度，即从 z_{i-1} 轴到 z_i 轴移动的距离；α 代表连杆扭角，即从 z_{i-1} 轴到 z_i 轴旋转的角度。最终构建串联机械臂的 D－H 参数，如表 1 所示。



(a) 串联机械臂结构示意图　　(b) 串联机械臂关节坐标系

图 5　串联机械臂结构示意图与关节坐标系

Fig. 5　Schematic structure of tandem robotic arm with joint coordinate system

表 1　3 自由度串联机械臂 D－H 参数

Tab. 1　D－H parameters of three-degree-of-freedom tandem robotic arm

关节 i	θ_i	d_i/mm	a_{i-1}/mm	α_{i-1}	关节变量范围
1	θ_0	－53	0	－π/2	(－π/2，π/2)
2	θ_1	0	0	π/2	(－π/2，π/2)
3	θ_2	－227	0	0	(－π/2，π/2)

根据 D－H 参数法中相邻关节坐标系之间的变换顺序：$\theta\rightarrow d\rightarrow a\rightarrow\alpha$，将串联机械臂相邻关节之间的坐标系变换表示为矩阵 $\boldsymbol{T}_i^{i-1}$，即

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}_i^{i-1}&=\mathrm{Rot}(z_{i-1},\theta_i)\,\mathrm{Trans}(0,0,d_i)\cdot\\&\mathrm{Trans}(a_i,0,0)\,\mathrm{Rot}(x_{i-1},\alpha_i)=\\&\begin{bmatrix}\mathrm{c}\theta_i & -\mathrm{s}\theta_i\mathrm{c}\alpha_i & \mathrm{s}\theta_i\mathrm{s}\alpha_i & \mathrm{c}\theta_i a_i\\ \mathrm{s}\theta_i & \mathrm{c}\theta_i\mathrm{c}\alpha_i & -\mathrm{c}\theta_i\mathrm{s}\alpha_i & \mathrm{s}\theta_i a_i\\ 0 & \mathrm{s}\alpha_i & \mathrm{c}\alpha_i & d_i\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{20}$$

矩阵 $\boldsymbol{T}_i^{i-1}$ 中的参数依据表 1 所示的 D－H 参数确定，根据齐次变换矩阵运算可以得出表示机械臂末端坐标系相对于基坐标系位姿变化的正运动学方程

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}_0^3&=\boldsymbol{T}_0^1\boldsymbol{T}_1^2\boldsymbol{T}_2^3=\\&\begin{bmatrix}\mathrm{c}\theta_1 & 0 & -\mathrm{s}\theta_1 & 0\\ \mathrm{s}\theta_1 & 0 & \mathrm{c}\theta_1 & 0\\ 0 & -1 & 0 & -53\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{c}\theta_2 & 0 & \mathrm{s}\theta_2 & 0\\ \mathrm{s}\theta_2 & 0 & -\mathrm{c}\theta_2 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\\&\begin{bmatrix}\mathrm{c}\theta_3 & -\mathrm{s}\theta_3 & 0 & 0\\ \mathrm{s}\theta_3 & \mathrm{c}\theta_3 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & -165\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=\\&\begin{bmatrix}\mathrm{c}\theta_1\mathrm{c}\theta_2\mathrm{c}\theta_3-\mathrm{s}\theta_1\mathrm{s}\theta_3 & -\mathrm{c}\theta_3\mathrm{s}\theta_1-\mathrm{c}\theta_1\mathrm{c}\theta_2\mathrm{s}\theta_3 & \mathrm{c}\theta_1\mathrm{s}\theta_2 & 165\mathrm{c}\theta_1\mathrm{s}\theta_2\\ \mathrm{c}\theta_1\mathrm{s}\theta_3+\mathrm{c}\theta_2\mathrm{c}\theta_3\mathrm{s}\theta_1 & \mathrm{c}\theta_1\mathrm{c}\theta_3-\mathrm{c}\theta_2\mathrm{s}\theta_1\mathrm{s}\theta_3 & \mathrm{s}\theta_1\mathrm{s}\theta_2 & 165\mathrm{s}\theta_1\mathrm{s}\theta_2\\ -\mathrm{c}\theta_3\mathrm{s}\theta_2 & \mathrm{s}\theta_2\mathrm{s}\theta_3 & \mathrm{c}\theta_2 & -165\mathrm{c}\theta_2-53\\ x & y & z & 1\end{bmatrix}=\\&\begin{bmatrix}n_x & o_x & a_x & p_x\\ n_y & o_y & a_y & p_y\\ n_z & o_z & a_z & p_z\\ x & y & z & 1\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{21}$$

其中　$\boldsymbol{n}=(n_x,n_y,n_z)$　$\boldsymbol{o}=(o_x,o_y,o_z)$

$\boldsymbol{a}=(a_x,a_y,a_z)$　$\boldsymbol{p}=(p_x,p_y,p_z)$

式中　$\boldsymbol{n}$、$\boldsymbol{o}$、$\boldsymbol{a}$——机械臂末端姿态的矢量

$\boldsymbol{p}$——机械臂末端的位置矢量

通过式(21)可在已知机械臂各关节角度的情况下求解末端的位姿参数。

2.5 串联机械臂逆运动学分析

本文设计的3自由度串联机械臂作为混联机构的末端姿态调节单元,主要用于适应茶芽的空间朝向,具有尺寸小和关节轴线共点的特点,因此采用欧拉变换法直接求解姿态参数。欧拉角通过绕不同轴的旋转序列描述末端姿态,其变换过程与机械臂关节运动一致:第1关节绕基坐标系$\{O\}$的z轴,依据右手定则正方向旋转ϕ得到坐标系$\{O_A\}$,如图6b所示;第2关节绕坐标系$\{O_A\}$的y轴正向旋转角度θ得到坐标系$\{O_B\}$,如图6c所示;第3关节绕坐标系$\{O_B\}$的z轴旋转角度ψ得到末端姿态的坐标系$\{O_C\}$,如图6d所示,通过将欧拉角直接映射至关节角度,可避免复杂逆解计算。需要说明的是,在混联系统层面,并联与串联子机构之间采用串联式坐标耦合,即并联动平台坐标系作为串联机构的基准坐标系,整体运动学通过齐次变换串联求解;Delta并联机构逆运动学在工作空间内解唯一,串联机构因采用欧拉角直接映射而无多解问题;为规避欧拉角姿态奇异,本文采用*ZYX*欧拉角表示,并将实际采摘作业俯仰角限制在±30°以内,确保工作空间远离奇异位形。

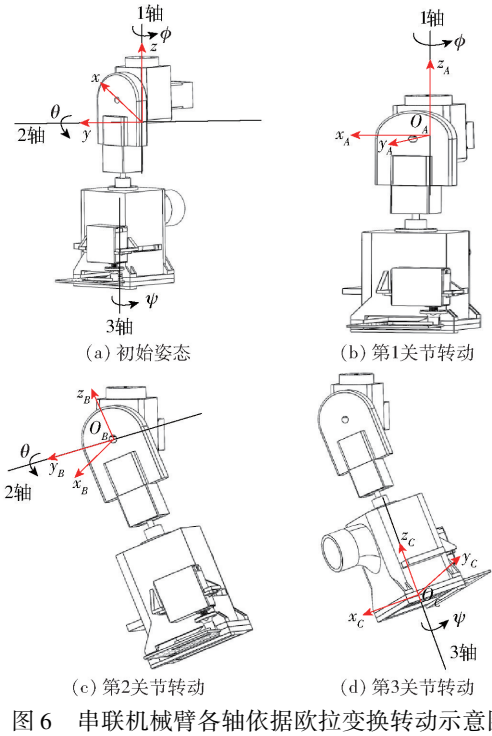


图6 串联机械臂各轴依据欧拉变换转动示意图

Fig. 6 Schematics of rotation of each axis of tandem robotic arm according to Euler transformation

2.6 混联机械臂正运动学分析

在正向分析整体运动学时,将并联机械臂的动平台中心点作为采摘机械臂的腕点,串联机械臂作为实现姿态转变的手部,各自的关节转角独立分析,只需将最终的位置坐标累加即可,用矩阵$\boldsymbol{T}_O^A$表示并联机械臂末端动平台中心点的坐标,即

$$\boldsymbol{T}_O^A=\begin{bmatrix}0&0&0&x_A\\0&0&0&y_A\\0&0&0&z_A\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{22}$$

根据串联机械臂运动学正解,串联机械臂末端的位姿表示为矩阵$\boldsymbol{T}_0^3$,即

$$\boldsymbol{T}_0^3=\begin{bmatrix}c\theta_1c\theta_2c\theta_3-s\theta_1s\theta_3&-c\theta_3s\theta_1-c\theta_1c\theta_2s\theta_3&c\theta_1s\theta_2&165c\theta_1s\theta_2\\c\theta_1s\theta_3+c\theta_2c\theta_3s\theta_1&c\theta_1c\theta_3-c\theta_2s\theta_1s\theta_3&s\theta_1s\theta_2&165s\theta_1s\theta_2\\-c\theta_3s\theta_2&s\theta_2s\theta_3&c\theta_2&-165c\theta_2-53\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{23}$$

结合欧拉变换依次绕各轴的旋转变换,可以将式(23)改写为矩阵$\boldsymbol{T}_A^B$,即

$$\boldsymbol{T}_A^B=\begin{bmatrix}c\phi c\theta c\psi-s\phi s\psi&-c\phi c\theta s\psi-c\phi s\psi&c\phi s\theta&165c\phi s\theta\\c\phi c\theta c\psi+c\phi s\psi&-s\phi c\theta s\psi+c\phi c\psi&s\phi s\theta&165s\phi s\theta\\-s\theta c\psi&s\theta s\psi&c\theta&-165c\theta-53\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{24}$$

矩阵$\boldsymbol{T}_A^B$表示在以欧拉变换下的机械臂运动姿态与位置符合变换矩阵,结合并联机械臂正运动学模型,得出混联机械臂整体运动学正向变换矩阵$\boldsymbol{T}_O^B$为

$$\boldsymbol{T}_O^B=\begin{bmatrix}c\phi c\theta c\psi-s\phi s\psi&-c\phi c\theta s\psi-c\phi s\psi&c\phi s\theta&165c\phi s\theta+x_A\\c\phi c\theta c\psi+c\phi s\psi&-s\phi c\theta s\psi+c\phi c\psi&s\phi s\theta&165s\phi s\theta+y_A\\-s\theta c\psi&s\theta s\psi&c\theta&-165c\theta-53+z_A\\0&0&0&1\end{bmatrix}\tag{25}$$

2.7 混联机械臂逆运动学分析

混联机械臂的逆运动学分析先利用已知的3个欧拉角参数求解串联机械臂当前姿态下首端与末端的位置差,再根据位置差求解并联机械臂动平台中心点需要移动的实际坐标,最终依靠串联定姿、并联插补定位的方法实现混联机械臂整体逆运动学的求解。根据已知的ϕ、θ、ψ参数以及式(25)的正运动学公式得出串联机械臂在此关节角度下串联机械臂末端相对于坐标系原点的坐标$\boldsymbol{P}_A^B$,即

$$\boldsymbol{P}_A^B=\begin{bmatrix}165c\phi s\theta\\165s\phi s\theta\\-165c\theta-53\end{bmatrix}\tag{26}$$

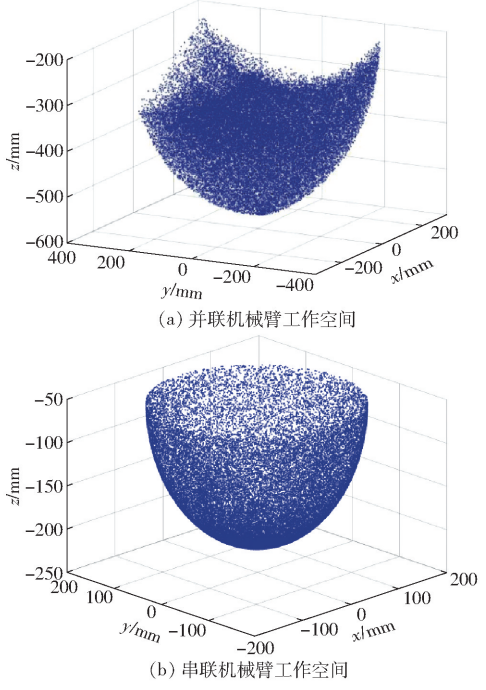
根据串联机械臂的逆运动学方程和目标点 x、y、z 坐标值可以逆向推导串联机械臂原点位置，即并联机械臂动平台中心点位置，由此将动平台中心点坐标 $\boldsymbol{P}_A$ 表示为

$$\boldsymbol{P}_A = \begin{bmatrix} x - 165\mathrm{c}\phi\mathrm{s}\theta \\ y - 165\mathrm{s}\phi\mathrm{s}\theta \\ z + 165\mathrm{c}\theta + 53 \end{bmatrix} \tag{27}$$

将 $\boldsymbol{P}_A$ 代入并联机械臂逆运动学求解方程中即可求解并联机械臂的 3 个关节参数。

2.8　基于蒙特卡洛法的工作空间分析

为了验证混联机械臂的作业空间有效性，根据运动学分析给出并联和串联机械臂的关节角度限制范围分别为 $-10°\sim90°$ 和 $-90°\sim90°$。利用蒙特卡洛法分别计算混联机械臂两种结构机械臂的工作空间，最后再综合分析，并联机械臂的初始尺寸参考工业 Delta 机械臂，分别取 $R=140$ mm、$r=100$ mm、$L_b=200$ mm、$L_a=370$ mm。在其关节角限制范围内取样 40 000 个关节角度样本，基于并联机械臂正运动学求解公式在 Matlab 中得出末端坐标位置，绘制出并联和串联机械臂工作空间示意图，如图 7 所示。



(a) 并联机械臂工作空间

(b) 串联机械臂工作空间

图 7　机械臂工作空间示意图

Fig. 7　Schematics of workspace of manipulator

图 8 展示了混联机械臂的工作空间，图中黑色和红色点集分别代表并联和串联机械臂末端工作空间，可以看出混联机械臂进一步扩展了工作空间范围，但为了验证机械臂的灵活性并提高采摘质量，仍需对机械臂尺寸进行优化。

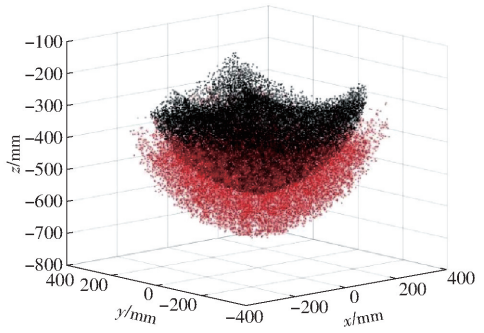


图 8　混联机械臂工作空间示意图

Fig. 8　Schematic of workspace of hybrid manipulator

3　基于多目标遗传算法的机械臂尺寸优化

3.1　遗传算法

由于并联机械臂初始设置参数不适用于茶叶采摘环境，且混联结构需协调并联与串联机械臂的尺寸，为了保证机械臂工作空间精准覆盖采摘区域，既要减少机械臂无效采摘区域，又要提高运动精度和灵活性，因此混联机械臂尺寸优化属于多目标优化难题。本文采用快速非支配排序遗传算法（NSGA－Ⅱ）对混联机械臂的相关杆件尺寸进行优化[23]，算法流程如图 9 所示。

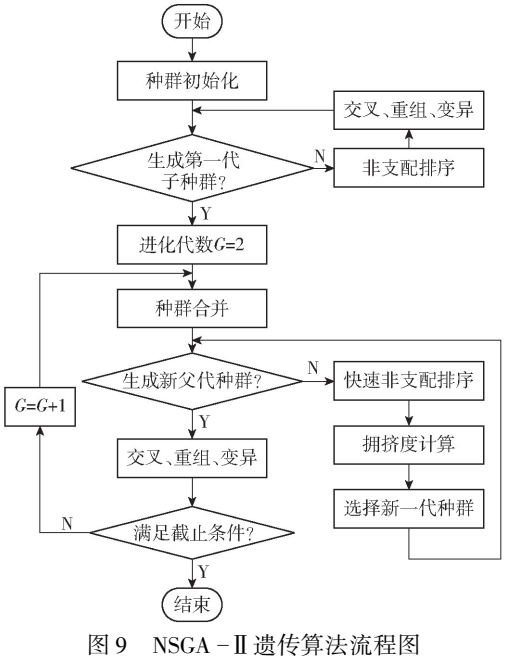


图 9　NSGA－Ⅱ遗传算法流程图

Fig. 9　Flowchart of NSGA－Ⅱ genetic algorithm optimization process

3.2　优化指标

（1）姿态可操作度指标。该指标用于衡量混联机械臂在工作空间内的位姿变化能力。在区域目标工作空间 U 中随机采样 M 个点，其中采摘末端在 M 个随机点中能够到达的点数量为 N，则区域姿态可操作度 φ_U 可定义为

$$\varphi_U(\varepsilon) = N/M \quad (0 \leqslant \varphi_U \leqslant 1) \tag{28}$$

当 φ 趋近于 1,机械臂在采样区域 U 上灵活性越好,若 U 为机械臂的全域工作空间,则 φ 为机械臂的全域姿态可操作度。

(2)灵巧度指标。采用雅可比矩阵条件数的倒数 k^{-1}作为机械臂灵巧度性能的评价指标[24]

$$k(\boldsymbol{J})^{-1}=\frac{1}{\mathrm{cond}(\boldsymbol{J})} \tag{29}$$

式中 $\mathrm{cond}(\boldsymbol{J})$——雅可比矩阵条件数

该灵巧度表达式仅表示在某个确定关节角 β_i下的并联机械臂灵巧度,为了表征并联机械臂在全域范围内的性能,提出全域灵巧度性能指标 η_k来衡量并联机械臂在其整个工作空间上的性能。计算公式为

$$\eta_k=\frac{\int_W k^{-1}\mathrm{d}w}{\int_W \mathrm{d}w} \tag{30}$$

式中 W——并联机械臂的工作空间

$\eta_k\in[0,1]$,η_k值越小,机械臂灵巧度越低。

3.3 设计变量选择

由于茶芽主要生长于茶丛表层,总体分布为一个弧形区域,将其等效为长方体作为目标采摘区域,如图 10 所示。为了使采摘区域能够位于机械臂的最优工作区域。选择机械臂本体参数 R、r、L_a、L_b以及机械臂动平台与茶丛间的距离 H 作为设计变量。

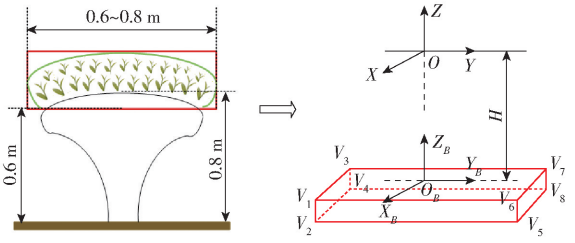


图 10 等效工作空间示意图

Fig. 10 Schematic of equivalent workspace

3.4 目标函数

选择并联机械臂全局灵巧度 η_k和混联机械臂姿态可操作度 φ 作为优化目标。将图 10 中长方体的 8 个顶点分别代入并联机械臂的运动学逆解模型中,通过判断公式(6)是否有解确定顶点是否位于机械臂的工作空间之内,将公式(6)改写为

$$\begin{cases}a_i s\beta_i+b_i c\beta_i-c_i=0\\ a_i=2L_a(R-r)-2L_a x c\alpha_i-2L_a y s\alpha_i\\ b_i=2L_a z\\ c_i=L_a^2-L_b^2-x^2-y^2-z^2-(R-r)^2+\\ \qquad 2(R-r)(x s\alpha_i+y s\alpha_i)\end{cases} \tag{31}$$

式(31)有解的条件为

$$\frac{c_i}{\sqrt{a_i^2+b_i^2}}\leqslant c_i^2-(a_i^2+b_i^2)\leqslant 0 \tag{32}$$

当 $V_i(x,y,z)=c_i^2-(a_i^2+b_i^2)\leqslant 0$ 时,表示顶点位于工作空间的表面以及内部,机械臂的工作空间符合要求,进而构建惩罚函数 F_1

$$F_1=\begin{cases}0 & (V_i(x,y,z)\leqslant 0)\\ d & (V_i(x,y,z)>0)\end{cases} \tag{33}$$

式中,d 取正无穷大,结合姿态可操作度和灵巧度指标,建立目标函数

$$W=\min\begin{cases}F_1\\ -\eta_k\\ -\varphi_V\end{cases}\quad(\varepsilon=0.85) \tag{34}$$

设置对应变量的边界和约束条件

$$\begin{cases}100\ \mathrm{mm}\leqslant R\leqslant 180\ \mathrm{mm}\\ 50\ \mathrm{mm}\leqslant r\leqslant 150\ \mathrm{mm}\\ 100\ \mathrm{mm}\leqslant L_a\leqslant 300\ \mathrm{mm}\\ 270\ \mathrm{mm}\leqslant L_b\leqslant 570\ \mathrm{mm}\\ 200\ \mathrm{mm}\leqslant H\leqslant 700\ \mathrm{mm}\end{cases} \tag{35}$$

3.5 优化过程与结果

在 Matlab 2022b 软件中编程,采用 NSGA-Ⅱ算法进行多目标优化求解,设置最大迭代次数为 100,由于求解目标函数为最小值,所以式(34)中最优值为 1 的两个指标均取负值,经过 115 次迭代计算后结果收敛,生成一组最优 Pareto 解集,如图 11 所示。

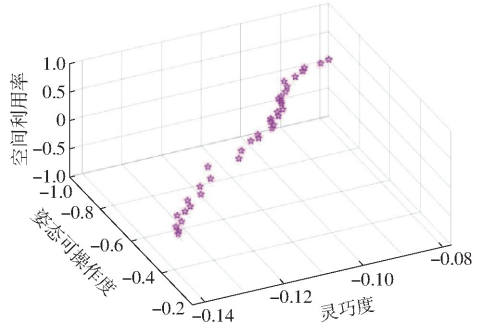


图 11 Pareto 最优解

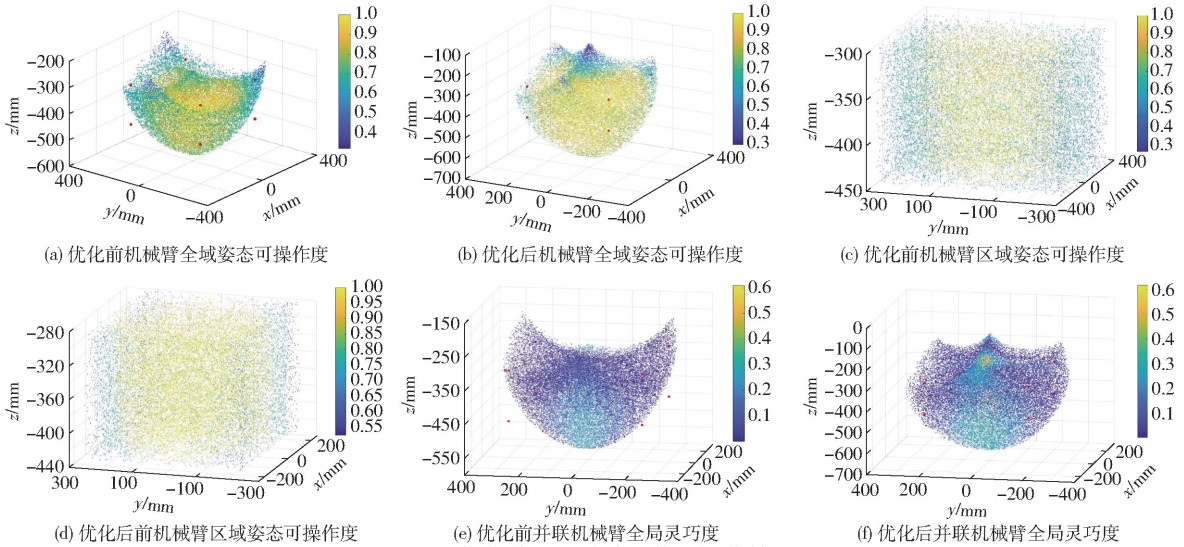
Fig. 11 Pareto optimal solution

表 2 展示了从 Pareto 最优解集中筛选的 7 组代表性解。结果显示,姿态可操作度与灵巧度在整个工作空间的平均值呈负相关,可操作度达到峰值 0.992 0 时,灵巧度最低,为 0.076 46,其中第 4 组参数实现了可操作度(0.678 8)和灵巧度(0.125 18)的最优平衡,采用该组参数分析机械臂优化前后的全域姿态可操作度对比结果如图 12a、12b 所示,图中 8 个红色点包含的长方体区域为目标采摘区域。优化前目标采摘区域部分位于机械臂工作空间之外,且高可操作度区域(黄色散点)占比较小。优化后工作空间显著扩展,高可操作度区域基本覆盖整个目标采摘区域。目标区域姿态可操作度对比分析表明(图 12c、12d),优化前可操作度仅 0.374 4,存

表 2　筛选后的优化结果

Tab. 2　Optimization results after screening

组别	R/mm	r/mm	L_a/mm	L_b/mm	H/mm	φ_V	η_k	φ
1	128. 694	76. 313 6	273. 224	516. 542	444. 200	0. 992 0	0. 076 46	0. 670 4
2	131. 728	75. 864 5	273. 502	479. 664	402. 552	0. 841 6	0. 086 99	0. 666 8
3	162. 767	72. 407 1	274. 701	421. 598	339. 749	0. 833 4	0. 109 48	0. 590 6
4	163. 906	72. 813 3	274. 115	386. 375	280. 234	0. 678 8	0. 125 18	0. 511 2
5	164. 139	71. 516 0	274. 638	363. 581	282. 464	0. 523 0	0. 143 15	0. 427 0
6	162. 833	72. 375 3	274. 759	353. 921	281. 165	0. 435 8	0. 144 21	0. 377 8
7	164. 579	74. 373 3	273. 564	328. 143	281. 638	0. 323 0	0. 167 23	0. 276 4



(a) 优化前机械臂全域姿态可操作度　(b) 优化后机械臂全域姿态可操作度　(c) 优化前机械臂区域姿态可操作度

(d) 优化后前机械臂区域姿态可操作度　(e) 优化前并联机械臂全局灵巧度　(f) 优化后并联机械臂全局灵巧度

图 12　优化前后机械臂性能可视化结果

Fig. 12　Visualization of manipulator performance before and after optimization

在大量低可操作度点(蓝色),影响采摘;优化后提升至 0. 766 5,低可操作度点减少,中心区域可达 85% 以上,结合末端执行器容差性能设计,可以显著提升采摘适应性。图 12e、12f 分别显示了优化前后并联机械臂的全局灵巧度变化。优化前灵巧度峰值仅为 0. 25,且高灵巧度区域集中在工作空间中心。优化后峰值提升至 0. 6,高灵巧度区域分布更广,工作空间形态更加饱满,完全覆盖目标工作区域。这一改进显著提升了机械臂的运动传递精度和工作稳定性。

通过 NSGA－Ⅱ算法优化后,机械臂各项指标在整个工作空间内的平均值均获得显著提升,如表 3 所示,全域姿态可操作度提升 54. 30%,达到 0. 511 2;目标采摘区域姿态可操作度提升 81. 30%,达到 0. 678 8;全局灵巧度提升 57. 92%,达到 0. 125 1。这一结果表明优化后的机械臂在操作灵活性和运动精度方面均有明显改善。

表 3　优化前后机械臂性能指标对比

Tab. 3　Comparison of robotic arm performance indexes before and after optimization

性能参数	优化前	优化后	提升百分比/%
全域姿态可操作度	0. 331 3	0. 511 2	54. 30
区域姿态可操作度	0. 374 4	0. 678 8	81. 30
全局灵巧度	0. 079 2	0. 125 1	57. 92

4　机械臂动力学仿真与轻量化设计

4. 1　混联机械臂虚拟样机建模与仿真

ADAMS 是一款多体动力学仿真分析软件,可以模拟机械臂的动态性能,用于分析运动过程中机械臂各关节、连杆的受力情况[25]。采用 Solidworks 软件完成机械臂建模和装配限制,然后导入 ADAMS 中分析,添加关节约束及驱动以及重力设置后,搭建虚拟样机模型,如图 13 所示。为了模拟单次茶芽采摘过程,实现机械臂从中心点运行至采摘点再返回中心点的运动路径,设置并联机械臂关节 1、3 的驱动函数为(－15d)×time^2 +30d×time(deg),(－40d)×time^2 +80d×time(deg)。

仿真时间设置为 2 s,0 ~ 1 s 内机械臂末端逐渐远离中心位置,机械臂末端伸出采摘茶芽的动作,1 ~ 2 s 机械臂末端逐渐趋近中心位置,模拟机械臂采摘任务完成后的收回动作。仿真步长设置为 0. 005 s,2 s 共计 400 个数据点,机械臂仿真过程中

末端执行器的运动轨迹如图 13 所示。

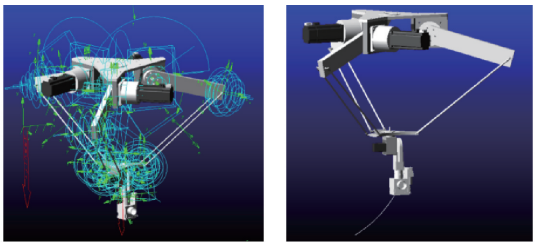


图 13 ADAMS 虚拟样机模型与仿真轨迹

Fig. 13 ADAMS virtual prototype model and simulation trajectory

4.2 仿真结果分析

仿真过程中并联机械臂 3 个关节的旋转角度随时间的变化曲线如图 14 所示,并联机械臂 3 个关节的旋转角度随时间呈二次曲线变化,符合预设驱动函数,运动过程平稳无波动。在 0 ~ 1 s 内,关节 1 旋转角度逐渐增至最大值 45°,关节 2、3 增至 15°;在 1 ~ 2 s 内,所有关节角度逐渐减小至初始位置。

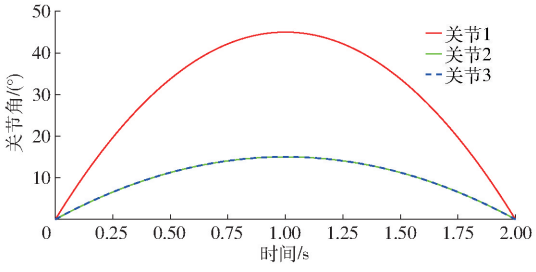


图 14 关节驱动角度变化曲线

Fig. 14 Variation of joint drive angle

关节驱动力矩随时间的变化曲线如图 15 所示,由于串联机械臂整体结构重心不在并联机械臂中轴线处,偏向关节 1,驱动力矩呈现规律性变化,关节 1 力矩先减小后增大,关节 2、3 力矩变化趋势相反。最大驱动力矩为 7.198 N·m,出现在关节 1,故后续有限元分析将以该关节力矩作为基准,确保结构安全余量。该仿真验证了机械臂运动的稳定性和力矩分布的合理性,为结构优化提供了依据。

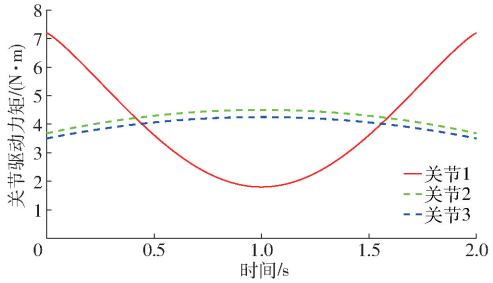


图 15 关节驱动力矩变化曲线

Fig. 15 Variation of joint driving torque

4.3 机械臂轻量化设计

4.3.1 拓扑优化分析

基于 ANSYS 软件,采用变密度法对并联机械臂的主动臂进行拓扑优化,在保证结构强度的同时,实现轻量化设计。首先采用 Solidworks 软件完成建模,导入 ANSYS Workbench 软件,采用多区域网格划分法对主动臂进行网格划分,边界条件设置基于 ADAMS 动力学仿真分析结果得到的各零部件的最大受力工况及具体载荷数值,在 ANSYS 软件中添加相应驱动力矩、载荷等,模拟机械臂运行工况,并求解最终零部件的总变形、等效应力以及等效应变,以判断机械臂零部件的结构强度。

考虑到主动臂的预设材料为 6061 铝合金,弹性模量为 68.9 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 720 kg/m^3,屈服强度为 55.2 MPa,采用变密度法对主动臂结构进行拓扑优化,则单元密度 ρ_e 与其弹性模量 E_e 的数学关系为

$$E_e(\rho_e) = \rho_e^P E_0 \tag{36}$$

式中 ρ_e——单元相对密度,范围为[0,1]

E_0——材料固有弹性模量

P——惩罚因子,取 3

SIMP 法以最小化结构柔度为目标,以体积为约束的优化模型为

$$\begin{cases} \min C(\rho) = \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U} \\ \text{s. t. } \dfrac{V(\rho)}{V_0} \leqslant f \end{cases} \tag{37}$$

式中 $\boldsymbol{F}$——全局外力向量

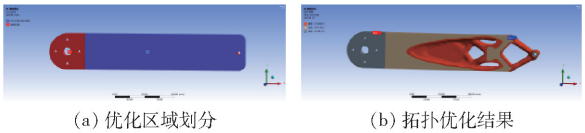
$\boldsymbol{U}$——结构位移矢量

C——结构柔度

f——限定优化体积比(设计约束),取 0.6

ρ——密度 V——材料体积

拓扑优化区域划分如图 16a 中蓝色区域所示,设置材料保留阈值 60% 作为响应约束,质量最小化作为响应目标进行拓扑优化计算,优化结果如图 16b 所示。将优化模型输出至 Solidworks 软件,并根据加工特点对机械臂模型进行重建,保留优化结果的构型,对不规则区域进行差补,最终生成模型。



(a) 优化区域划分 (b) 拓扑优化结果

图 16 拓扑优化区域划分与优化结果

Fig. 16 Topology optimization region division and optimization results

4.3.2 静力学分析

机械臂拓扑优化的过程中存在打孔、铣削等操作,会对机械臂的刚度以及抗变形能力造成影响,为了验证机械臂的静态和动态性能,采用有限元法对优化前后机械臂的静态结构进行仿真对比分析。仿真过程中机械臂的固定方式、转矩、载荷以及边界条

件等设置相同，等效应力、应变及总变形量的仿真结果如图 17 所示。

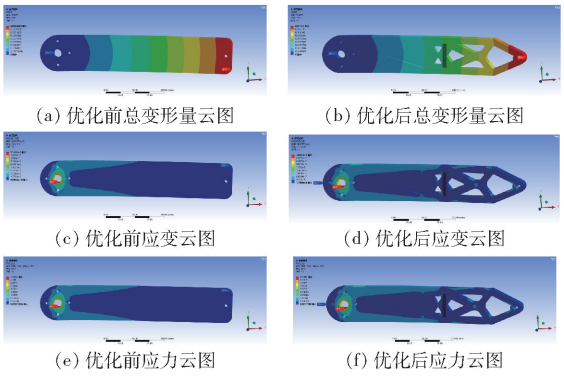


图 17　拓扑优化前后静力学分析结果

Fig. 17　Static analysis results before and after topology optimization

分析可知，优化后的机械臂总变形量、等效应变、优化之前变化不大，等效应力较大幅度减少，机械臂的整体性能不受影响，而机械臂的体积从 382.20/cm^{3}降低至 276.63/cm^3，减少了 27.62%，在减轻重量的同时基本维持了原有结构的强度，具体数据如表 4 所示。

表 4　优化前后机械臂性能参数

Tab. 4　Manipulator performance parameters before and after optimization

参数	优化前	优化后
最大等效应变/mm	1.598×10^{-5}	3.069×10^{-5}
最大等效应力/MPa	3.196	2.118
最大总变形量/mm	6.631×10^{-3}	1.433×10^{-2}
总体积/cm^3	382.20	276.63
总质量/g	1 031.94	746.90
关节 1 最大驱动力矩/(N·m)	7.198	6.258
关节 2 最大驱动力矩/(N·m)	4.475	3.947
关节 3 最大驱动力矩/(N·m)	4.211	3.692

4.3.3　动力学分析

动力学分析则可以直观展现结构变化对机械臂运行过程中各关节驱动力矩等的影响，利用 ADAMS 将拓扑优化后的重构模型与初始机械臂模型在路径、速度、加速度等变量相同的条件下，模拟机械臂在从中心点运动至远端点之后返回至中心点的运动轨迹，仿真结果如图 18 所示，红色和黑色曲线分别表示拓扑优化前后各关节驱动力矩随时间的变化情况，其中优化前的关节最大驱动力矩为 7.198 N·m，而优化后仅为 6.258 N·m，相对减少 13.06%，详细参数如表 4 所示。

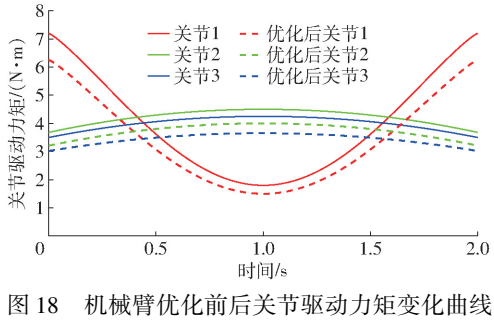


图 18　机械臂优化前后关节驱动力矩变化曲线

Fig. 18　Variation curves of joint driving torque before and after manipulator optimization

5　机械臂样机搭建与性能试验

5.1　样机搭建

基于上述结构优化结果，最终搭建的混联机械臂样机如图 19 所示，由机械臂本体、动力系统、控制系统及机架组成。本体结构包括静平台、动平台、并联机械臂、串联机械臂等。动力系统采用伺服电机驱动并联机构，搭配谐波减速器(减速比 1∶100)以保证高精度；串联机构选用步进电机与行星减速器(减速比 1∶25)以减轻负载。控制系统以台达 AS228T－A 型 PLC 为核心，通过 CANopen 通讯控制伺服电机，脉冲信号驱动步进电机与舵机，并利用 ISPsoft 软件编写梯形图程序，上位机集成视觉模块用于茶芽坐标识别，经坐标转换后结合 Matlab 实现运动学解算，为控制系统提供目标位姿输入。

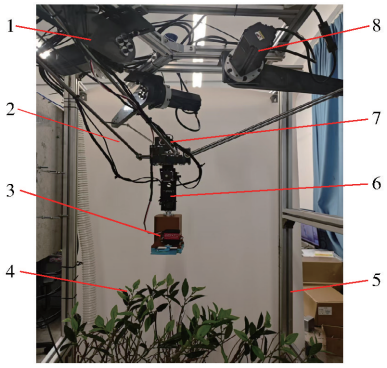


图 19　采摘样机

Fig. 19　Picking prototype

1. 并联主动臂　2. 并联从动臂　3. 末端执行器　4. 茶芽目标
5. 机架　6. 串联机械臂　7. 串联驱动电机　8. 并联驱动电机

5.2　重复定位精度与速度测试

机械臂的重复定位精度是评估其运动稳定性和结构可靠性的关键指标，依据 ISO 9283 测试标准[26]，采用百分表、游标卡尺测量装置，以多次测量目标点与初始目标点坐标的标准差作为机械臂的重复定位精度，R_{Pi}为

$$R_{Pi}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i-\bar{x})^2+(y_i-\bar{y})^2+(z_i-\bar{z})^2\right]} \tag{38}$$

式(38)表示在同一点的不同方向上重复测量 n 次后，重复定位坐标与实际坐标的平均偏离度。$\bar{x}$、$\bar{y}$、$\bar{z}$ 为目标点 n 次定位偏差量的平均值，n 为同一目标点同一方向上的的重复测量次数，n 取 10，在工作空间内选取 10 个目标点各进行 30 次测量

(每个目标点的 x、y、z 方向重复 10 次),总计 300 组数据。计算每次测量值与基准的偏差值发现,机械臂重复定位精度呈现明显的空间分布特性,其平均定位精度达到 0.036 42 mm,且随着末端执行器远离工作空间中心区域,定位偏差呈渐进式增大趋势,最大偏差出现在工作空间最远端点,达到 0.047 91 mm,如图 20 所示,采用透明平面划分空间象限,直观反映偏差的空间分布特性,距离越大(精度越低)则点颜色趋近黄色,反之趋近深蓝色(原点用红色标识)。运行速度测试通过记录机械臂往返不同目标点的耗时,发现单次抵达最远目标点耗时 1.331 s,最近目标点耗时 0.604 s,x、y 正负方向对称位姿点的运动时间一致性验证了动力学模型的准确性,而正负方向微小时间差异反映了并联机构驱动非对称性。

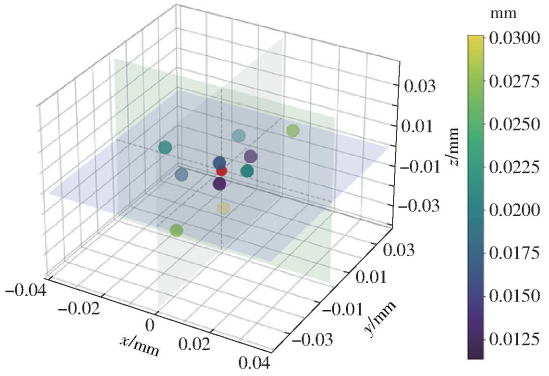


图 20 最远端点定位偏差分布图

Fig. 20 Distribution of localization deviations of the farthest endpoints

5.3 模拟采摘试验

为了评估该混联机械臂的采摘性能,在理想环境下,采用模拟茶树进行了茶芽叶的采摘试验。采用三维坐标定位仪精确测量仿真茶芽位姿,并在优化后的采摘区域内进行 100 次采摘测试,如图 21 所示。结果表明,机械臂的平均采摘成功率为 79%,平均全程用时为 3.68 s,其中采摘阶段(移动至接触点及采摘点)耗时 2.27 s,返回中心点耗时 1.41 s。采摘失败的主要原因是枝叶遮挡导致末端执行器与茶芽碰撞,使目标偏离预设位姿,而非机械臂定位误差。试验验证了混联机械臂本体方案的基本可行性。



图 21 实验室采摘测试效果

Fig. 21 Laboratory picking test results

6 结论

(1)优化设计了一款适用于名优茶采摘的混联机械臂系统。通过建立基于欧拉角姿态表示法的混联机械臂整体正逆运动学方程,并基于蒙特卡洛算法求解了工作空间,构建了机械臂的姿态可操作度以及灵巧度评价指标,运用 NSGA-Ⅱ多目标遗传算法对机械臂尺寸参数进行优化设计,使全域可操作度、区域姿态可操作度和全局灵巧度分别提升 54.3%、81.3% 和 57.92%,显著改善了机械臂的运动性能。

(2)通过 ADAMS 和 ANSYS 软件完成了系统的动力学分析与轻量化优化设计。仿真结果表明,机械臂关节最大驱动力矩为 7.198 N·m,最大应力仅 3.196 MPa,经拓扑优化后质量减轻 27.62%,关节驱动力矩降低 13.06%,实现了结构轻量化与性能优化的双重目标,有利于提升机械臂运动效率。

(3)试验测试表明,所研制的混联机械臂样机具有优异运动性能,平均重复定位精度达 0.036 mm。在模拟采摘测试中,系统实现了 79% 的成功率,单次采摘平均耗时 2.27 s。

参 考 文 献

[1] 贾江鸣,王登艺,贺磊盈,等. 名优茶采摘机器人整机机械技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(8):193-206.
Jia Jiangming, Wang Dengyi, He Leiying, et al. Research progress and prospects of mechanical technology forwhole machine of high-quality tea picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(8):193-206. (in Chinese)

[2] Han C, Lü J, Dong C, et al. Classification, advanced technologies, and typical applications of end-effector for fruit and

vegetable picking robots[J]. Agriculture, 2024, 14(8): 1310.
[3] 陈之威. 名优茶嫩梢检测定位及机器人采摘试验[D]. 杭州:浙江理工大学,2023.
Chen Zhiwei. Detection, positioning and robotic picking test for famous tea buds[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)
[4] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 手持式名优茶嫩梢采摘机械手设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2022,53(5):86 - 92.
Jia Jiangming, Ye Yuze, Cheng Peilin, et al. Design and experimental optimization of hand-held manipulator for picking famous tea shoot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):86 - 92. (in Chinese)
[5] Luo H, Wang M, Wu C, et al. Motion planning of targeted tea leaves harvesting by manipulator based on state parsing[C]// 2023 4th International Conference on Computer, Big Data and Artificial Intelligence (ICCBD + AI). IEEE, 2023: 479 - 484.
[6] Gao J, Zhang F, Zhang J, et al. Picking patterns evaluation for cherry tomato robotic harvesting end-effector design[J]. Biosystems Engineering, 2024, 239: 1 - 12.
[7] 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 robotics harvesting technologies in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):1 - 18. (in Chinese)
[8] 王亚薇,何津立,林熙淼,等. 温室番茄采摘机器人伸缩式机械臂设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):18 - 28.
Wang Yawei, He Jinli, Lin Ximiao, et al. Design and experiment of tomato picking robot based on telescopic robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(S1):18 - 28. (in Chinese)
[9] 张恩祎. 基于并联机械手的茶叶嫩芽采摘装置研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
Zhang Enyi. Research on tea shoot picking device based on parallel manipulator[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[10] 杨化林,钟岩,姜沅政,等. 基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略[J]. 机械工程学报,2022,58(9):62 - 70.
Yang Hualin, Zhong Yan, Jiang Yuanzheng, et al. Hybrid strategy of parallel tea picking robot trajectory planning based on optimal time and jerk[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(9):62 - 70. (in Chinese)
[11] 周宇杰,吴强,贺磊盈,等. 名优茶采摘机器人的系统设计与试验[J]. 机械工程学报,2022,58(19):12 - 23.
Zhou Yujie, Wu Qiang, He Leiying, et al. Design and experiment of intelligent picking robot for famous tea[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(19):12 - 23. (in Chinese)
[12] 李亚涛,周宇杰,王少卿,等. 名优茶采摘机器人收获试验[J]. 茶叶科学, 2024,44(1):75 - 83.
Li Yatao, Zhou Yujie, Wang Shaoqing, et al. Experimental study on high-quality tea plucking by robot[J]. Journal of Tea Science, 2024,44(1):75 - 83. (in Chinese)
[13] 陆鑫,李恒,徐丽明,等. 双臂式茶叶采摘机器人的改进设计[J]. 农机化研究, 2015,37(2):101 - 106.
Lu Xin, Li Heng, Xu Liming, et al. The improve design of tea picking robot with two arms[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(2):101 - 106. (in Chinese)
[14] Wang Z, Yang C, Che R, et al. Assisted tea leaf picking: the design and simulation of a 6-DOF Stewart parallel lifting platform[J]. Agronomy, 2024(4):844.
[15] 李研彪,王泽胜,孙鹏,等. 一种四自由度冗余串并混联拟人机械臂的动载协调分配优化[J]. 机械工程学报, 2020,56(9):45 - 54.
Li Yanbiao, Wang Zesheng, Sun Peng, et al. Dynamic load distribution optimization for a 4-DOF redundant and series-parallel hybrid humanoid arm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(9):45 - 54. (in Chinese)
[16] 伞红军,吴兴梅,陈久朋,等. 五自由度混联机构运动学分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2025,56(7):701 - 712.
San Hongjun, Wu Xingmei, Chen Jiupeng, et al. Kinematic analysis and parameter optimization of 5-DOF hybrid mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7):701 - 712. (in Chinese)
[17] 李立君,刘涛,高自成,等. 基于旋量理论的六自由度林果采摘混联机械臂运动学逆解[J]. 农业工程学报, 2019,35(8):75 - 82.
Li Lijun, Liu Tao, Gao Zicheng, et al. Inverse kinematics of 6-DOF hybrid manipulator for forest-fruit harvest based on screw theory[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(8):75 - 82. (in Chinese)
[18] 陈光明,毛奔,章永年. 名优茶采摘机器人关键技术研究[J]. 中国农机化学报, 2023,44(12):174 - 179.
Chen Guangming, Mao Ben, Zhang Yongnian. Research on key technologies of famous tea picking robot[J]. Journal of China Agricultural Mechanization, 2023,44(12):174 - 179. (in Chinese)
[19] 郑应松,吴伟斌,汪小名,等. 名优茶叶采摘坐标动态变化过程试验与分析[J]. 中国农机化学报,2025,46(2):193 - 198.
Zheng Yingsong, Wu Weibin, Wang Xiaoming, et al. Experiment and analysis of dynamic change process of picking coordinates of high-quality tea[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025,46(2):193 - 198. (in Chinese)
[20] 蒲志新,郭建伟,潘玉奇,等. 2PPaPaR 并联机构性能分析及优化设计[J]. 中国机械工程,2023,34(19):2304 - 2312.
Pu Zhixin, Guo Jianwei, Pan Yuqi, et al. Performance analysis and optimization design of 2PPaPaR parallel mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2023,34(19):2304 - 2312. (in Chinese)
[21] 强红宾,薛大鹏,冯新宇,等. 基于无量纲化辨识雅可比矩阵选取测量位姿的 Stewart 并联机构运动学标定[J]. 光学精密工程,2020,28(7):1546 - 1557.

Qiang Hongbin, Xue Dapeng, Feng Xinyu, et al. Stewart parallel manipulator kinematic calibration based on the normalized identification Jacobian choosing measurement configurations[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(7): 1546 – 1557. (in Chinese)

[22] 高跃,房立金,姜雪洁,等. 一种基于 D – H 参数的 7 自由度机械臂机构精度综合方法研究[J]. 仪器仪表学报,2022, 43(4):137 – 145.
Gao Yue, Fang Lijin, Jiang Xuejie, et al. Research on the precision synthesis method of a 7 DOF manipulator based on D – H parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 137 – 145. (in Chinese)

[23] 孙顺利,汤维,罗远强,等. 山地果茶园单轨运输机摆臂式装卸结构设计与优化[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(2): 246 – 255.
Sun Shunli, Tang Wei, Luo Yuanqiang, et al. Design and optimization of swing arm loading and unloading structure of monorail conveyor for hilly orchard and tea garden[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(2): 246 – 255. (in Chinese)

[24] 胡子瑞,王丙旭,杨景,等. 基于轨迹灵巧度的机械臂尺寸优化[J]. 制造业自动化,2023, 45(11): 96 – 101.
Hu Zirui, Wang Bingxu, Yang Jing, et al. Dimension optimization of manipulator based on trajectory dexterity[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(11): 96 – 101. (in Chinese)

[25] 谭月胜,詹登辉,张彭豪. 刚柔耦合串联机械臂末端位置误差分析与补偿[J]. 农业机械学报,2021, 52(2): 416 – 426.
Tan Yuesheng, Zhan Denghui, Zhang Penghao. Analysis and compensation of end position error of rigid-flexible coupling serial manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 416 – 426. (in Chinese)

[26] 高跃,房立金,许继谦,等. 一种 7 – DOF 机械臂的结构设计及其几何位置误差分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7): 1003 – 1009.
Gao Yue, Fang Lijin, Xu Jiqian, et al. Structural design of a 7 – DOF manipulator and its geometric position error analysis [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(7): 1003 – 1009. (in Chinese)

(上接第 88 页)

[17] Hu G, Chen C, Chen J, et al. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107177.

[18] Chen W H, Ballance D J, O'Reilly J. Model predictive control of nonlinear systems: computational burden and stability[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2000, 147(4): 387 – 394.

[19] Rybus T, Seweryn K, Sasiadek J Z. Control system for free-floating space manipulator based on nonlinear model predictive control (NMPC)[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017, 85: 491 – 509.

[20] 陈明方, 黄良恩, 魏松坡, 等. 基于 Jacobian + RBF 的 3-PTT 并联机构末端精确控制方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 430 – 440.
Chen Mingfang, Huang Liang'en, Wei Songpo, et al. End precise control method of 3-PTT parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 430 – 440. (in Chinese)

[21] 尚东阳, 李小彭, 尹猛, 等. 基于干扰观测器的含有柔性关节的柔性机械臂抑振策略[J]. 振动与冲击, 2022, 41(24): 125 – 133.
Shang Dongyang, Li Xiaopeng, Yin Meng, et al. Vibration suppression strategy for the flexible manipulator with a flexible joint based on an disturbance observer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(24): 125 – 133. (in Chinese)

[22] Wang Y, Zhang Z, Li C, et al. Adaptive incremental sliding mode control for a robot manipulator[J]. Mechatronics, 2022, 82: 102717.

[23] Nguyen T S, Harton D, Campeau-Lecours A, et al. Motion control algorithms based on the dynamic modelling of kinematically redundant hybrid parallel robots[J]. Mechatronics, 2021, 76: 102555.

[24] Scholl P, Iskandar M, Wolf S, et al. Learning-based adaption of robotic friction models[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 89: 102780.

[25] Saleki A, Fateh M M. Model-free control of electrically driven robot manipulators using an extended state observer[J]. Computers and Electrical Engineering, 2020, 87: 106768.

[26] Chen Z, Gao X, Wang A, et al. An online open-loop S-curve velocity profile control method for stepping motors on FPGA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(12): 16452 – 16462.

[27] Fang Y, Hu J, Liu W H, et al. Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated robots and machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 127 – 153.

[28] 李扬, 侯加林, 苑进, 等. 基于改进 PSO 的模糊 PID 高枝修剪机械臂末端抑振算法与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 49 – 58.
Li Yang, Hou Jialin, Yuan Jin, et al. Experiment and vibration suppression algorithm for high-branch pruning manipulator based on fuzzy PID with improved PSO[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 49 – 58. (in Chinese)