

大空间运动3-RRRU并联机器人运动学标定与误差分析

赵磊^{1,2} 闫照方³ 栾倩倩⁴ 赵新华^{1,3} 李彬^{1,3}

(1. 天津理工大学天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;

2. 机电工程国家级实验教学示范中心(天津理工大学), 天津 300384;

3. 天津理工大学机械工程学院, 天津 300384; 4. 天津市金桥焊材集团股份有限公司, 天津 300384)

摘要: 并联机器人具有高速、高刚度和大负载等明显优势,被广泛应用到农业和工业领域,但多关节导致该类机器人控制精度不高。针对大空间运动3-RRRU并联机器人的运动学建模和误差标定方法展开了系统、深入研究。综合应用DH法和空间矢量法建立了机器人的运动学模型,在此基础上,借助偏微分理论推导并建立机器人的误差模型;应用激光跟踪仪进行不同轨迹下机器人的空间位置数据采集,对一般遗传算法进行改进,以等步距搜索策略实现主要遗传算子的优化,并通过全局数值寻优获取机器人的误差补偿数据,完成标定和补偿工作。实验表明:基于直线标定方式,补偿后直线轨迹跟踪误差控制在0.14~1.34 mm,但不适用于曲线轨迹补偿,其实测补偿后的最大误差高达5.08 mm。曲线轨迹标定精度高于直线轨迹标定,补偿后将直线和曲线两种路径下的最大误差分别降低至1.18 mm和1.56 mm。该标定方法自动化程度高,适用于含有大量关节并联机器人的误差标定工作。

关键词: 大范围运动; 并联机器人; 运动学解耦; 误差标定; 精度

中图分类号: TP242.6; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)11-0411-10 **OSID:**



Kinematic Calibration and Error Analysis of 3-RRRU Parallel Robot in Large Overall Motion

ZHAO Lei^{1,2} YAN Zhaofang³ LUAN Qianqian⁴ ZHAO Xinhua^{1,3} LI Bin^{1,3}

(1. Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education (Tianjin University of Technology), Tianjin 300384, China

3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

4. Tianjin Golden Bridge Welding Materials Group Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: Parallel robot is a kind of nonlinear strong coupling system with many branches and joints. It has obvious advantages of high speed, high stiffness and large load. With the number of joints increasing, its control accuracy is generally not high. In order to improve the accuracy of 3-RRRU parallel robot, kinematic modeling and error calibration method were systematically researched. Firstly, the kinematic equation and error model were derived by DH theory and space vector method. On this basis, the error model of the robot was derived and established with the partial differential theory. Secondly, position data were collected by using laser tracker for straight line and curve path. Lastly, genetic algorithm was optimized and used to complete calculation. The experiment result showed that the tracking error was controlled between 0.14 mm and 1.34 mm based on the linear trajectory calibration, and the maximum error was greatly reduced from 9.36 mm to 1.34 mm. But this calibration mode was not suitable for curve path compensation. Its maximum error of curve compensation reached 5.08 mm. The linear calibration was just suitable for straight path, and its compensation accuracy was also lower than that of curve calibration mode. After compensation, the maximum error of line trajectory and curve trajectory was respectively reduced to 1.18 mm and 1.56 mm. According to the experimental data, 3-RRRU robot had better accuracy in the central area of workspace. In summary, the proposed method owned high automation and its feasibility of the method was verified by experiments.

Key words: large overall motion; parallel robot; kinematic decoupling; error calibration; accuracy

收稿日期: 2020-12-06 修回日期: 2020-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1303502)、国家自然科学基金面上项目(51975412)和天津市自然科学基金项目(18JCYBJC87900)

作者简介: 赵磊(1983—),男,副教授,主要从事机器人和机电一体化技术研究,E-mail: leizhaotjut@163.com

通信作者: 赵新华(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事机器人技术研究,E-mail: xinhua Zhao@tjut.edu.cn

0 引言

串联机器人具有工作空间大、结构简单和成本低等特点,最早被应用于工业生产^[1]。但由于仅拥有一条控制链,存在明显的误差积累效应,且连杆机构各构件的惯性负荷与原构件转速的平方成正比,高速下多个关节的弹性变形以及内部惯性力的耦合作用越加明显,使得其高速与高精度之间的矛盾更为明显,故该类机器人工作速度相对较低^[2]。目前,农业果园采摘的产业自动化加速了机器人在该领域的推广和应用,其工作精度一般在毫米级。

相比串联机器人,并联机器人具有高速、高负载和高刚度等优势,近年来被广泛应用到工业生产中。但由于存在多条支链和大量的关节,导致该类机器人误差标定难度很大。目前,对于多支链并联机器人误差标定方法的研究相对较少,主要原因是该类机器人的支链和关节数量较多,运动学模型很复杂,且难以获取含有大量被动关节的转角信息。现阶段成熟的单步标定方法无法实现该类并联机器人的误差标定工作^[3]。此外,由于安装过程中存在不同程度的关节间隙和晃动,其不确定性难以将大量被动副的转角误差进行精确量化并引入误差模型,致使该类大空间并联机器人的工作精度不高^[4-6]。

对于拥有多关节的并联机器人,实现高精度误差补偿,需要高精密传感器来获取大量被动关节的转角信息,安装复杂且标定成本极高^[7-8]。因此,寻求一种自动化程度高、易操作和较高精度的误差标定方法成为工程上亟待解决的问题^[9]。

工作空间是衡量机器人性能的重要指标之一。早期连杆式平面四杆、五杆和六杆并联机器人具有良好的运动速度,但工作空间狭小仅能实现平面二维空间的运动。经典的 Stewart 并联机构以其特有的高刚度和高载荷等特点被应用到工业中,但适用于工作空间较小的场合。3-RRRU 并联机器人是一种具有多支链、三维平动机构,各支链结构相同且由多个连杆和运动副组成,支链长度较大使其终端可达静平台以外的空间,相比经典的平面并联机器人和 Stewart 平台,具有明显的大空间特性。

本文针对 3-RRRU 并联机器人的运动学标定和误差补偿等问题进行研究,对比分析两种不同轨迹标定方式下机器人补偿前后的控制精度,并通过实验验证标定方法的有效性和可行性。

1 机器人运动学坐标系建立

图 1 为本文所研究的 3-RRRU 并联机器人,由

静平台、动平台和 3 条支链构成。



图 1 3-RRRU 并联机器人

Fig. 1 3-RRRU parallel robot

1. 静平台 2. 驱动关节 3. 支架 4. 动平台

图 2 为图 1 的结构示意图,静平台固定在支架最上方,3 条支链对应的驱动关节(驱动副)均固定于静平台上,动平台则位于下方。3 条支链结构相同,靠近静平台的关节为驱动副,其余为被动副。

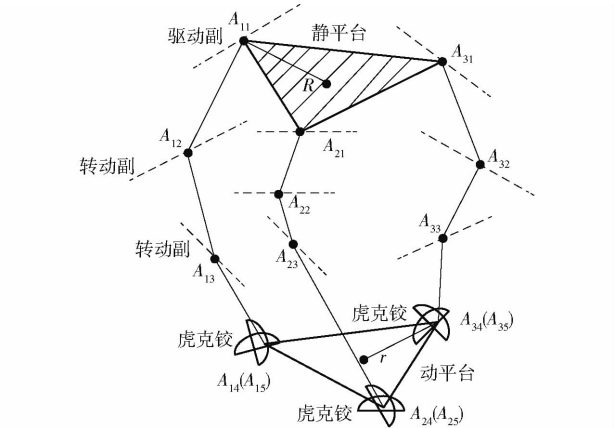


图 2 3-RRRU 并联机器人结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of 3-RRRU parallel robot

A_{ij} 代表第 i ($i = 1, 2, 3$) 条支链的第 j ($j = 1, 2, \dots, 5$) 个关节,以第 1 支链为例,驱动关节 A_{11} 轴线平行于被动关节 A_{12} ,同时平行于静平台所在平面,垂直于转动关节 A_{13} 轴线,虎克铰 $A_{14}(A_{15})$ 与动平台连接,动、静平台均为等边三角形,其外接圆半径分别为 r 和 R 。

第 1 支链运动学坐标系如图 3 所示,机器人的基坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 建立在静平台的几何中心, $O_R Z_R$ 垂直于静平台, θ_{ij} 为第 i 条支链上的第 j 个关节的转动角,动平台坐标系 $Ox'y'z'$ 位于动平台几何中心, L_{ij} 代表第 i 条支链中第 j 个连杆长度,虎克铰由两个轴线相互垂直的转动关节 A_{14} 和 A_{15} 组成, L_{14} 为虎克铰中 A_{14} 与 A_{15} 之间的连杆长度, L_{15} 为关节 A_{15} 与动平台之间的连杆长度。

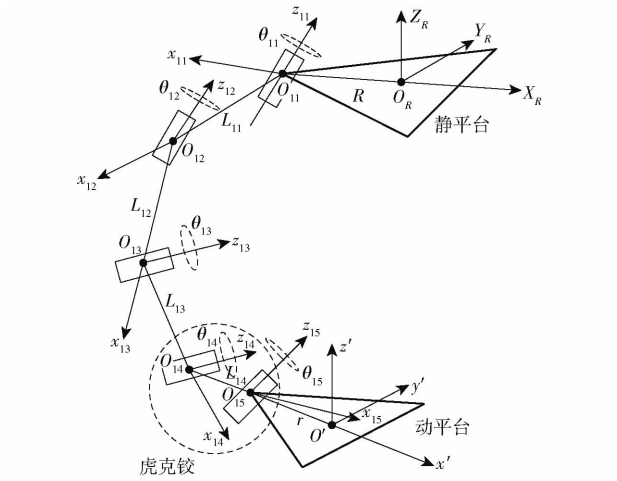


图 3 第 1 支链运动学坐标系

Fig. 3 Kinematic coordinate system of the first branch chain

2 并联机器人运动学解耦与误差建模

2.1 运动学建模

为了实现 3 - RRRU 并联机器人的自动化控制，应用 DH 法建立机器人的运动学模型，第 i 条支链第 j 个关节到第 $j + 1$ 关节间的齐次变换矩阵 $T_{ij,i(j+1)}$ 可表示为

$$T_{ij,i(j+1)} = \begin{bmatrix} c\theta_{ij} & -c\alpha_{ij}s\theta_{ij} & s\alpha_{ij}s\theta_{ij} & L_{ij}c\theta_{ij} \\ s\theta_{ij} & c\alpha_{ij}c\theta_{ij} & -s\alpha_{ij}c\theta_{ij} & L_{ij}s\theta_{ij} \\ 0 & s\alpha_{ij} & c\alpha_{ij} & d_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 θ_{ij} 、 α_{ij} ——绕 z_{ij} 和 x_{ij} 轴旋转角
 L_{ij} 、 d_{ij} ——沿 z_{ij} 和 x_{ij} 轴平移的距离
其中 $c\theta_{ij}$ 表示 $\cos\theta_{ij}$ ， $s\theta_{ij}$ 表示 $\sin\theta_{ij}$ ， $c\alpha_{ij}$ 表示 $\cos\alpha_{ij}$ ， $s\alpha_{ij}$ 表示 $\sin\alpha_{ij}$ 。

故并联机器人第 1 支链闭环运动学方程表示为

$$T = T_{1R} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15} \quad (2)$$

其中

$$T_{1R} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{11} = \begin{bmatrix} c\theta_{11} & -s\theta_{11} & 0 & L_{11}\theta_{11} \\ s\theta_{11} & c\theta_{11} & 0 & L_{11}s\theta_{11} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} c(\theta_{11} + \theta_{12})c(\theta_{13} + \theta_{14}) & s(\theta_{11} + \theta_{12}) & -c(\theta_{11} + \theta_{12})s(\theta_{13} + \theta_{14}) & L_{11}c\theta_{11} + (L_{12} + L_{13}c\theta_{13})c(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s(\theta_{11} + \theta_{12})c(\theta_{13} + \theta_{14}) & c(\theta_{11} + \theta_{12}) & -s(\theta_{11} + \theta_{12})s(\theta_{13} + \theta_{14}) & L_{11}s\theta_{11} + (L_{12} + L_{13}c\theta_{13})s(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s(\theta_{13} + \theta_{14}) & 0 & c(\theta_{13} + \theta_{14}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{12} = \begin{bmatrix} c\theta_{12} & 0 & s\theta_{12} & L_{12}\theta_{12} \\ s\theta_{12} & 0 & -c\theta_{12} & L_{12}s\theta_{12} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{13} = \begin{bmatrix} c\theta_{13} & -s\theta_{13} & 0 & L_{13}\theta_{13} \\ s\theta_{13} & c\theta_{13} & 0 & L_{13}s\theta_{13} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{14} = \begin{bmatrix} c\theta_{14} & 0 & -s\theta_{14} & 0 \\ s\theta_{14} & 0 & c\theta_{14} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{15} = \begin{bmatrix} c\theta_{15} & 0 & s\theta_{15} & 0 \\ s\theta_{15} & 0 & -c\theta_{15} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x - r \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 P_x 、 P_y 、 P_z ——机器人动平台几何中 M 坐标
第 1 支链闭环运动学方程中对应的 DH 矩阵参数如表 1 所示。

表 1 第 1 支链 DH 矩阵参数

Tab. 1 DH matrix parameters of the first branch chain

关节	θ_{ij}	α_{ij}	L_{ij}	d_{ij}
1	θ_{11}	0	L_{11}	0
2	θ_{12}	$\pi/2$	L_{12}	0
3	θ_{13}	0	L_{13}	0
4	θ_{14}	$-\pi/2$	0	0
5	θ_{15}	$\pi/2$	0	0

对式(2)作如下变换

$$T_{1R}^{-1} T T_{15}^{-1} = T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} \quad (3)$$

将 DH 矩阵参数代入式(3)可得

$$\begin{bmatrix} -c\theta_{15} & -s\theta_{15} & 0 & r - P_x - R \\ s\theta_{15} & -c\theta_{15} & 0 & P_z \\ 0 & 0 & 1 & P_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} c(\theta_{11} + \theta_{12})c(\theta_{13} + \theta_{14}) & s(\theta_{11} + \theta_{12}) & -c(\theta_{11} + \theta_{12})s(\theta_{13} + \theta_{14}) & L_{11}c\theta_{11} + (L_{12} + L_{13}c\theta_{13})c(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s(\theta_{11} + \theta_{12})c(\theta_{13} + \theta_{14}) & c(\theta_{11} + \theta_{12}) & -s(\theta_{11} + \theta_{12})s(\theta_{13} + \theta_{14}) & L_{11}s\theta_{11} + (L_{12} + L_{13}c\theta_{13})s(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s(\theta_{13} + \theta_{14}) & 0 & c(\theta_{13} + \theta_{14}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)矩阵方程左右相等,并联机器人关节角 θ_{13} 的转动范围为 $[-\pi/2,\pi/2]$,则有 $\cos\theta_{13}\geq 0$,求解计算方程组可得

$$\begin{cases} \sin\theta_{13} = -\frac{P_y}{L_{13}} \\ \cos\theta_{13} = \sqrt{L_{13}^2 - P_y^2}/L_{13} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)并求解方程组,可求得

$$\begin{cases} \theta_{11} = 2\arctan \frac{-K_{16} \pm \sqrt{K_{16}^2 - 4K_{15}K_{17}}}{2K_{15}} \\ \theta_{12} = \arcsin \frac{P_z - L_{11}\sin\theta_{11}}{L_{12} + \sqrt{L_{13}^2 - P_y^2}} - \theta_{11} \\ \theta_{13} = \arccos(\sqrt{L_{13}^2 - P_y^2}/L_{13}) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $K_{16}=4L_{11}P_z$

$$\begin{aligned} K_{15} &= L_{11}^2 + (r - R - P_x)^2 + P_z^2 - 2L_{11}(r - R - P_x) - \\ &\quad (L_{12} + \sqrt{L_{13}^2 - P_y^2})^2 \\ K_{17} &= L_{11}^2 + (r - R - P_x)^2 + P_z^2 + 2L_{11}(r - R - P_x) - \\ &\quad (L_{12} + \sqrt{L_{13}^2 - P_y^2})^2 \end{aligned}$$

同理,完成其他两条支链转角的求解,实现运动学解耦计算,详细计算过程详见文献[10],不做过多赘述。

工业串联机器人的关节数量较少,且关节均为驱动副,实际转角可由内部传感器直接读取,因此,单步标定的误差补偿精度高^[11]。3-RRRU 并联机器人存在大量的被动关节,单步标定并不适合,寻求一种自动化程度高、快速有效的误差标定方法成为并联机器人机构学领域的研究焦点^[12]。因此,合理建立运动学模型并完成解耦是实现误差标定的前提和基础^[10,13-14]。由于关节间隙和晃动等因素具有不确定性和随机性,难以精确量化。为了测试所提出方法的有效性和可行性,故忽略上述误差因素。

为建立机器人的误差模型,本文从支链构型出发,应用空间矢量法构建闭环方程。以第1支链为例,如图4所示该支链的闭环方程可表示为

$$l_{A_{11}A_{12}} + l_{A_{12}A_{13}} + l_{A_{13}A_{15}} = l_{O_R P} + l_{P A_{15}} - l_{O_R A_{11}} \quad (7)$$

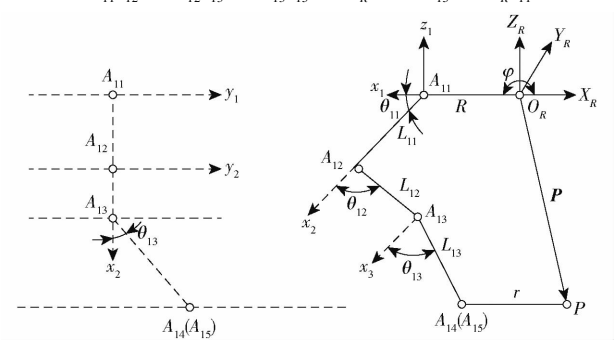


图4 第1支链几何构型图

Fig.4 Geometry of the first chain

其中

$$\begin{aligned} l_{O_R P} &= \begin{bmatrix} -P_x \\ -P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad l_{O_R A_{11}} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad l_{A_{11}A_{12}} = \begin{bmatrix} c\theta_{11}L_{11} \\ 0 \\ -s\theta_{11}L_{11} \end{bmatrix} \\ l_{P A_{15}} &= \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad l_{A_{12}A_{13}} = \begin{bmatrix} c(\theta_{11} + \theta_{12})L_{12} \\ 0 \\ -s(\theta_{11} + \theta_{12})L_{12} \end{bmatrix} \\ l_{A_{13}A_{15}} &= \begin{bmatrix} c\theta_{13}L_{13}c(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ s\theta_{13}L_{13} \\ -c\theta_{13}L_{13}c(\theta_{11} + \theta_{12}) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由式(7)可得第1支链的闭环方程,同理,也可获得其余两条支链方程,进而得到机器人的运动学模型为

$$\begin{cases} (P_x + a_1)^2 + (P_z + a_2)^2 + P_y^2 - \\ \quad (L_{12}^2 + L_{13}^2 + 2L_{12}\sqrt{L_{13}^2 - P_y^2}) = 0 \\ \left(P_x - \frac{b_1}{2}\right)^2 + \left(P_y + \frac{\sqrt{3}b_1}{2}\right)^2 + (P_z + b_2)^2 - \\ \quad [L_{22}^2 + L_{23}^2 + L_{22}\sqrt{4L_{23}^2 - (\sqrt{3}P_x + P_y)^2}] = 0 \\ \left(P_x - \frac{c_1}{2}\right)^2 + \left(P_y - \frac{\sqrt{3}c_1}{2}\right)^2 + (P_z + b_2)^2 - \\ \quad [L_{32}^2 + L_{33}^2 + L_{32}\sqrt{4L_{33}^2 - (\sqrt{3}P_x - P_y)^2}] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

具体推导过程详见文献[10]。

2.2 机器人误差建模

具有大范围平动3-RRRU 并联机器人的结构参数见表2。基于偏微分原理,将对应结构参量的误差项表示为 $\Delta\theta_{i1}$ 、 ΔL_{i1} 以及 ΔL_{i2} 以及 ΔL_{i3} ($i=1,2,3$)以及 ΔR 和 Δr ,共14项误差。

表2 结构参数
Tab.2 Structure parameters

mm					
支链 <i>i</i>	<i>L</i> _{<i>i1</i>}	<i>L</i> _{<i>i2</i>}	<i>L</i> _{<i>i3</i>}	<i>R</i>	<i>r</i>
1	400	100	800		
2	400	100	800	400	400
3	400	100	800		

各误差项定义为

$$\theta_{i1}^e = \theta_{i1} + \Delta\theta_{i1}$$

式中 θ_{i1}^e ——第*i*条支链驱动角实际值
 θ_{i1} ——第*i*条支链驱动角理论值
 $\Delta\theta_{i1}$ ——对应驱动角误差

$$\begin{cases} L_{i1}^e = L_{i1} + \Delta L_{i1} \\ L_{i2}^e = L_{i2} + \Delta L_{i2} \\ L_{i3}^e = L_{i3} + \Delta L_{i3} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\Delta L_{i1}、\Delta L_{i2}、\Delta L_{i3}$ ——每条支链上驱动杆件以及两个被动杆件存在的加工误差

$L_{i1}^e、L_{i2}^e、L_{i3}^e$ ——每条支链上驱动杆件以及两个被动杆件实际值

由于连杆加工在同一机床完成,故其余两支链上的连杆加工误差相同,则有 $\Delta L_{11} = \Delta L_{21} = \Delta L_{31}$, $\Delta L_{12} = \Delta L_{22} = \Delta L_{32}$ 和 $\Delta L_{13} = \Delta L_{23} = \Delta L_{33}$ 。

$$\begin{cases} R^e = R + \Delta R \\ r^e = r + \Delta r \end{cases} \quad (10)$$

式中 $R^e、r^e$ ——静、动平台外接圆半径实际值

$\Delta R、\Delta r$ ——静、动平台外接圆半径误差

将含有误差的各关节实际参数代入正解方程,可得到机器人末端实际坐标值 $P^e(P_x^e, P_y^e, P_z^e)$,令 ΔP 为理论点 $P(P_x, P_y, P_z)$ 与实际值的距离,则有

$$\Delta P = \sqrt{(P_x^e - P_x)^2 + (P_y^e - P_y)^2 + (P_z^e - P_z)^2} \quad (11)$$

式(11)为目标函数,通过获取机器人终端实际空间数据,应用数值算法开展寻优计算,目标函数补偿后在允许误差范围内停止寻优。

3 误差标定

3 - RRRU 并联机器人常用于工业生产线中产品的分拣和搬运工作,如图 5 所示。



图 5 工业生产线

Fig. 5 Industrial production line

对于工业生产线上,分拣和搬运机器人的工作精度要求不高,将货物放置在指定位置,适合于精度要求不高的场合。基于实际应用工况,生产线要求搬运机器人的工作误差为 $3\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,故设定 3 - RRRU 并联机器人的允许误差为 2 mm。

3.1 遗传算子优化

选取不依赖初值的遗传算法开展寻优计算^[15-16]。适应度函数根据目标函数来检测群体中的每个个体,判断其是否能够达到最优解程度^[17-18]。由于遗传算法整体搜索不依赖于梯度信息,常用于非线性系统的优化计算和机器人动态最优路径的规划^[19-23]。

(1)交叉概率

以步距为 0.1 进行搜索,并通过 Matlab 遗传算

法工具箱输出窗口可获取交叉概率 P_c 与适应度 F_v 测试结果和分布曲线,如表 3 和图 6 所示,故本文交叉概率选取 0.8。

表 3 交叉概率与适应度值

Tab. 3 Crossover probability and fitness value

P_c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
F_v	0.554 4	0.529 3	0.517 1	0.516 0	0.514 9
P_c	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
F_v	0.511 5	0.511 8	0.511 4	0.512 8	0.651 6

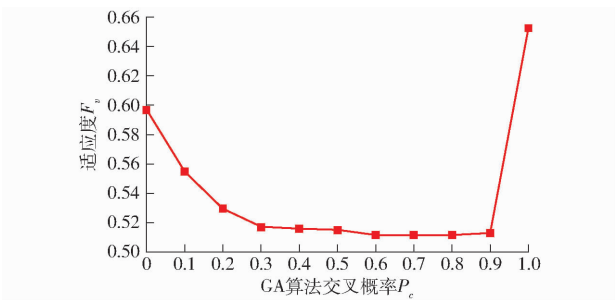


图 6 交叉概率与适应度曲线

Fig. 6 Curve of crossover probability and fitness

(2)迁移概率

基于上述原理,迁移概率 P_m 与适应度 F_v 的测试结果和分布关系如表 4 和图 7 所示,当迁移概率 P_m 为 0.7 时获得适应度 F_v 为 0.511 2。因此,迁移概率取 0.7。

表 4 迁移概率与适应度值

Tab. 4 Migration probability and fitness value

P_m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
F_v	0.511 5	0.511 4	0.511 3	0.511 3	0.511 4
P_m	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
F_v	0.511 3	0.511 2	0.511 4	0.511 3	0.511 3

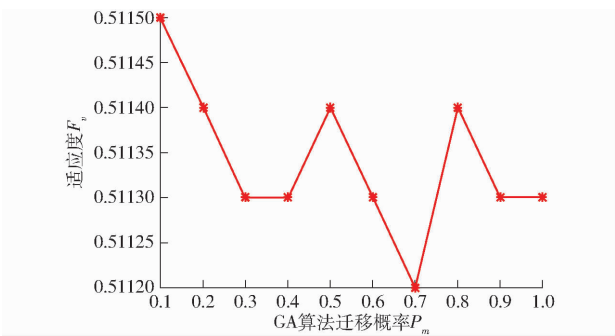


图 7 迁移概率与适应度曲线

Fig. 7 Curve of migration probability and fitness

本文采用归一化实数制编码,初始种群尺度为 30,遗传算子中交叉概率 $P_c = 0.8$,迁移概率 $P_m = 0.7$,适应度比例和选择算子分别选取线性转换和随机均匀分布方式。

3.2 直线轨迹标定

跟踪靶标固定在机器人动平台(图 8),匀速阶

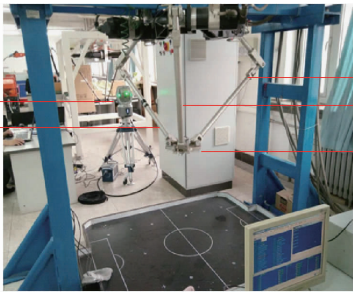


图 8 机器人误差标定实验

Fig. 8 Error calibration experiment of robot

1. 激光跟踪仪 2. 第 2 支链 3. 第 1 支链 4. 第 3 支链 5. 动平台

表 5 直线轨迹标定结果

Tab. 5 Calibration result of straight-line track

参数	$\Delta\theta_{11}/\text{rad}$	$\Delta\theta_{21}/\text{rad}$	$\Delta\theta_{31}/\text{rad}$	$\Delta L_{11}/\text{mm}$	$\Delta L_{12}/\text{mm}$	$\Delta L_{13}/\text{mm}$	$\Delta L_{21}/\text{mm}$
数值	0.001 2	-0.000 3	0.000 3	0.309 2	0.240 5	-0.176 1	0.309 2
参数	$\Delta L_{22}/\text{mm}$	$\Delta L_{23}/\text{mm}$	$\Delta L_{31}/\text{mm}$	$\Delta L_{32}/\text{mm}$	$\Delta L_{33}/\text{mm}$	$\Delta R/\text{mm}$	$\Delta r/\text{mm}$
数值	0.240 5	-0.176 1	0.309 2	0.240 5	-0.176 1	-1.209 0	0.886 5

应用表 5 结果进行直线轨迹误差补偿,第 1 组实验轨迹采样点补偿前后分布和误差曲线如图 9 所示。图 9 表明,由于并联机器人存在大量关节和连杆机构,导致运动过程中其最大误差高达 8.356 mm,补偿前最小误差为 4.232 mm,此时机器人连续轨迹跟踪性能较低;此外,补偿前位置误差曲线存在多个明显的尖峰误差,侧面反映了机器人轨迹跟踪时并不平稳。

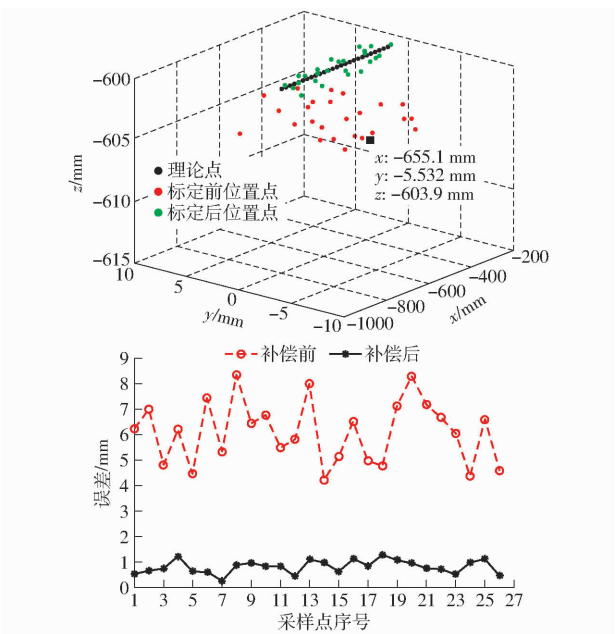


图 9 标定前后第 1 组采样点分布及误差曲线

Fig. 9 Sampling points' distribution and error curves of the first group before and after calibration

可见,通过补偿有效消除了其轨迹中的尖峰误差,反映机器人的运动平稳性和控制精度得到了大幅改善,其位置误差控制在 0.294 ~ 1.220 mm。相比补偿前的最小误差降低了一个数量级,最大误差

段速度为 80 mm/s,加速度为 40 mm/s²,采用梯形控制策略,理论起点为(-800 mm,0 mm,600 mm),终点为(-300 mm,0 mm,600 mm),每条直线等间距方式采集 26 个点,借助激光跟踪仪获取对应空间位置信息,共进行 7 组直线轨迹跟踪实验。第 1 组直线轨迹位于机器人工作空间中心区域的 xoz 平面上,第 2 组和第 3 组轨迹最靠近第 1 组轨迹,第 6 组和第 7 组靠近边界区域,应用 Matlab 遗传工具箱,采用上述遗传算子值和目标函数,对 14 项运动学误差进行寻优计算,结果如表 5 所示。

缩小为 $\frac{1}{7}$ 。其余 6 组直线轨迹标定前、后的误差曲线如图 10 所示。

通过以上 7 组实验数据证明:补偿后机器人的位置误差有效控制 在 0.14 ~ 1.34 mm,达到了预期控制要求。从图 10a 发现,第 2、3 组即位于机器人工作空间的中心区域,其补偿前、后的精度优于其他 4 组;由图 10b 看出,第 6 组和第 7 组轨迹误差明显高于其余 5 组,其最大误差高达 9.36 mm,出现在第 6 组直线轨迹即靠近边界区域,说明该类结构的并联机器人在工作空间的中心区域具有较高的精度。

3.3 曲线轨迹标定

3 - RRRU 机器人是一种平动并联机构,通常搬运轨迹主要以直线轨迹为主。然而,在某些工作环境下需机器人完成部分的曲线轨迹运动,本文同时开展了曲线轨迹标定实验。预设曲线轨迹为螺旋线如图 11a 所示,共设置 40 个采样点,基于同样标定原理,完成曲线轨迹标定实验;此外,应用直线轨迹标定结果对该曲线路径进行误差补偿,则两种不同轨迹标定方式下在 x 、 y 、 z 方向的误差补偿曲线如图 11b ~ 11d 所示,标定结果如表 6 所示。

实验结果表明:直线标定方式对曲线轨迹误差补偿的效果较差,补偿后在 x 方向的位置误差分布在 -5.03 ~ 4.78 mm;在 z 方向误差最小,其最大绝对值误差小于 3 mm;而曲线标定方式的补偿效果明显优于直线标定补偿,在 3 个方向的位置误差均分布在 -1.63 ~ 1.52 mm,满足控制要求。可见,直线标定并不适用于机器人曲线路径的误差补偿。

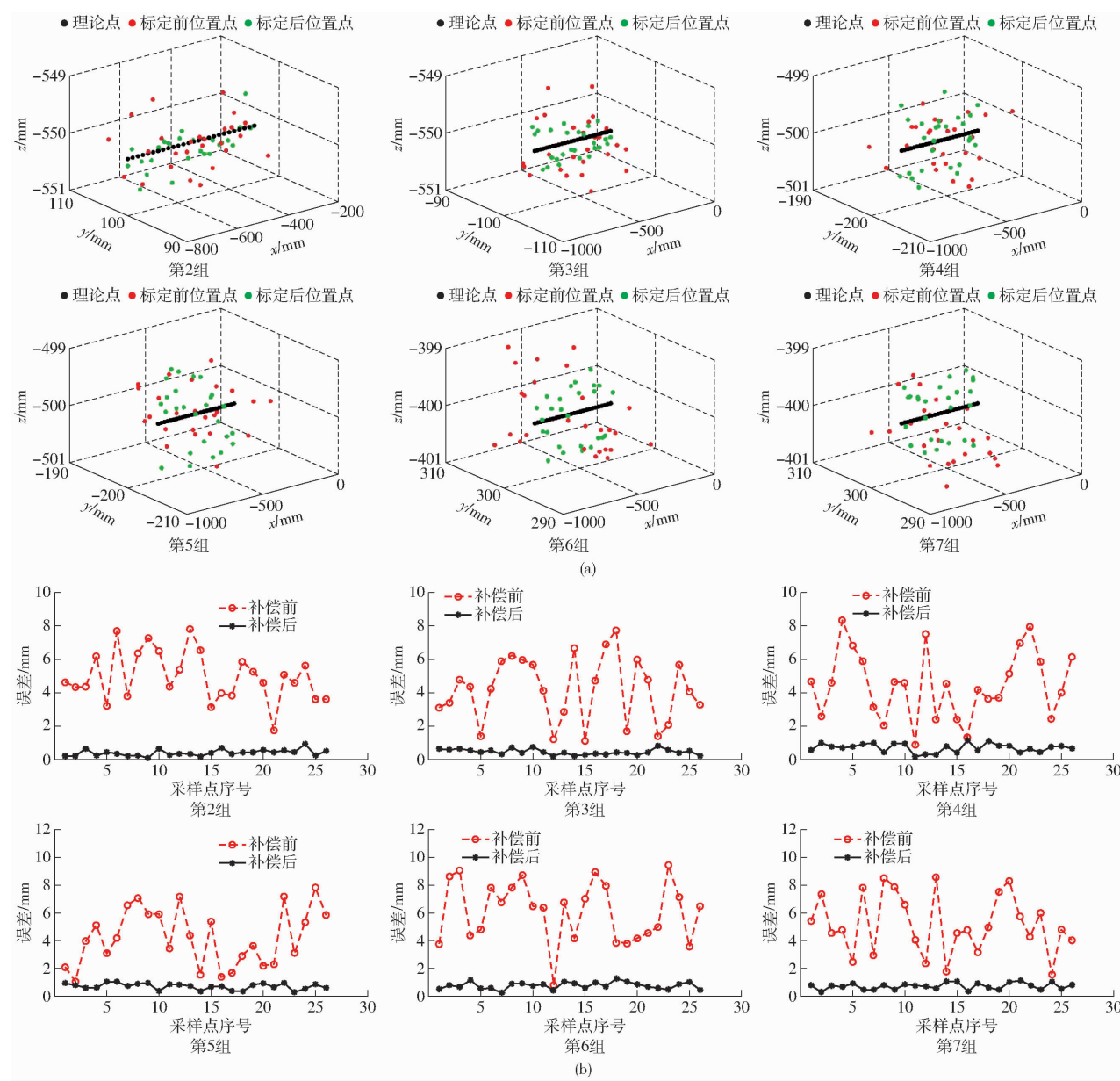


图 10 其余 6 组标定前后机器人采样点分布和误差曲线

Fig. 10 Distribution and error curves of other six groups sampling points before and after calibration

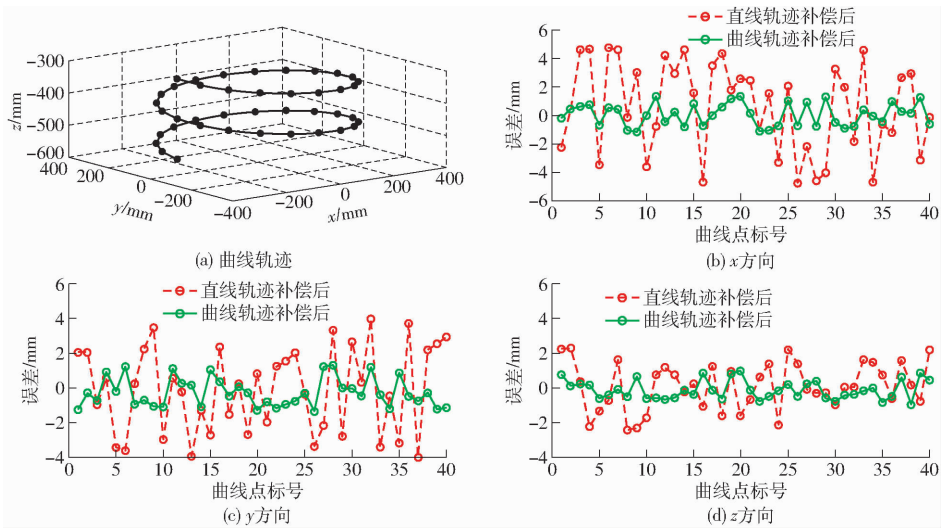


图 11 两种标定方式下对螺旋轨迹误差补偿曲线

Fig. 11 Error compensation curves of spiral trajectory based on two different calibrations

表 6 曲线轨迹误差标定结果

Tab.6 Error calibration result of curve track

参数	$\Delta\theta_{11}/\text{rad}$	$\Delta\theta_{21}/\text{rad}$	$\Delta\theta_{31}/\text{rad}$	$\Delta L_{11}/\text{mm}$	$\Delta L_{12}/\text{mm}$	$\Delta L_{13}/\text{mm}$	$\Delta L_{21}/\text{mm}$
误差	0.016 2	-0.014 3	0.020 1	0.221 1	0.195 6	-0.161 2	0.221 1
参数	$\Delta L_{22}/\text{mm}$	$\Delta L_{23}/\text{mm}$	$\Delta L_{31}/\text{mm}$	$\Delta L_{32}/\text{mm}$	$\Delta L_{33}/\text{mm}$	$\Delta R/\text{mm}$	$\Delta r/\text{mm}$
误差	0.195 6	-0.161 2	0.221 1	0.195 6	-0.161 2	-1.124 8	1.675 2

对比表 5 和表 6 可知,直线标定不涉及曲线加减速和插值计算,动平台因间隙产生的微小晃动不明显,故表 5 中驱动角误差相对较小,动平台半径加工误差仅为 0.886 5 mm;然而,曲线轨迹运动中存在大量的小距离插补计算,更真实反映出驱动角存在的实际误差。因此,驱动角误差标定结果相差很大。此外,两种标定方式下所得到的连杆加工误差几乎一致,说明对线性误差标定效果良好。另动平台误差标定结果相差较大的主要原因是各支链均通过一

个虎克铰与动平台连接,虎克铰中两个转动副存在间隙耦合效应,当进行曲线加减速运动时,由于惯性导致动平台产生的间隙晃动严重,故该误差项包含了虎克铰的间隙因素,故动平台半径加工误差为 1.675 2 mm。

为验证曲线标定结果的有效性和通用性,对第 2~7 组直线轨迹进行误差补偿,6 组直线轨迹的整体误差控制在 0.08~1.12 mm,优于直线标定补偿后的 0.14~1.34 mm,如图 12 所示。

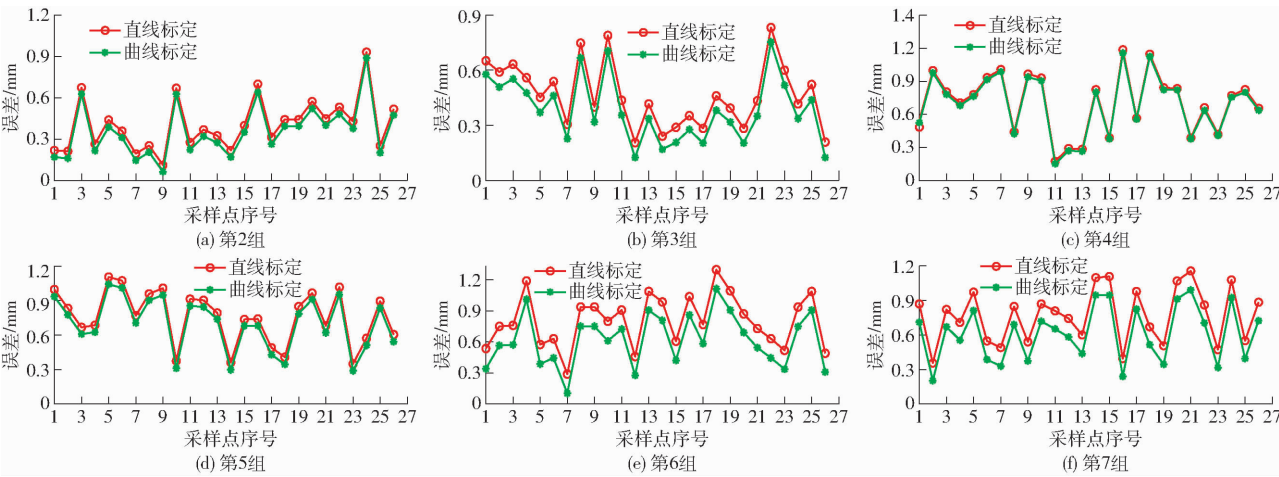


图 12 两种标定方式对直线轨迹误差补偿曲线

Fig. 12 Error compensation curves of line trajectory based on two different calibrations

由图 12 可知,拥有对称支链结构的并联机器人在中心区域附近即第 1~3 组直线轨迹的精度较好,边界区域明显较差。

4 结论

- (1) 拥有对称支链结构的 3-RRRU 并联机器人在工作空间的中心区域具有较好的工作精度,边界区域精度低。
- (2) 该标定方法仅需 1 台激光跟踪仪即可实现对拥有大量关节并联机器人的误差自动化标定工作,为结构更为复杂的并联机器人误差标定工作提

供了重要的理论基础,解决了目前单步标定方法存在的效率低、操作繁琐和标定成本高的难题。

(3) 直线轨迹标定方式仅适用于直线路径的误差补偿,存在一定局限性;而曲线标定可实现直线和曲线轨迹的误差补偿,通用性强,对直线轨迹补偿后的误差控制在 0.08~1.12 mm,优于直线标定补偿后的 0.14~1.34 mm。

(4) 由于忽略了关节间隙和晃动等因素,虽然补偿精度相对较低,但可广泛用于工业生产线的分拣和搬运工作,充分利用并联机器人的高速和高负载特性,大幅提高生产效率。

参 考 文 献

[1] NGUYEN H N, ZHOU J, KANG H J. A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network[J]. Neurocomputing, 2015, 151:996-1005.

[2] 赵磊,赵新华,周海波,等. 并联测量机柔性动力学建模与误差耦合[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):2471-2479.

ZHAO Lei, ZHAO Xinhua, ZHOU Haibo, et al. Flexible dynamic modeling and error coupling of parallel measuring machine [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10):2471-2479. (in Chinese)

- [3] JOUBAIR A, BONEV I A. Kinematic calibration of a six-axis serial robot using distance and sphere constraints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1):515-523.
- [4] 余跃庆, 田浩. 运动副间隙引起的并联机器人误差及其补偿[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5):1331-1339.
YU Yueqing, TIAN Hao. Error and compensation of parallel robot with joint clearances[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5):1331-1339. (in Chinese)
- [5] 李仕华, 黄真. 新型三维移动 3-RRUR 并联平台机构及其位置分析[J]. 机械设计, 2005, 22(8):39-42.
LI Shihua, HUANG Zhen. New typed 3D transformational 3-RRUR parallel platform mechanism and its positional analysis[J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(8):39-42. (in Chinese)
- [6] 杨启志, 孙梦涛, 蔡静, 等. 温室穴盘苗并联高速移栽机器人运动误差分析与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3):18-27.
YANG Qizhi, SUN Mengtao, CAI Jing, et al. Kinematic error analysis and test of high-speed plug seeding transplanting machine for green house based on parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):18-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180302&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.002. (in Chinese)
- [7] 赵新华, 栾倩倩, 赵磊, 等. 3-RRRU 并联机器人运动学建模与误差分析[J]. 机械设计与制造, 2020(1):274-280.
ZHAO Xinhua, LUAN Qianqian, ZHAO Lei, et al. Kinematics modeling and error analysis of 3-RRRU parallel manipulator[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(1):274-280. (in Chinese)
- [8] 沈惠平, 赵一楠, 许正骁, 等. 低耦合度半对称三平移并联机构拓扑设计与运动学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3):404-412.
SHEN Huiping, ZHAO Yi'nan, XU Zhengxiao, et al. Topological design and kinematics analysis of novel asymmetric 3-translation parallel manipulator with low coupling degree[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):404-412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190346&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.046. (in Chinese)
- [9] 任瑜, 张丰, 郭志敏, 等. 一种通用的工业机器人位姿检测方法[J]. 计量学报, 2018, 39(5):615-621.
REN Yu, ZHANG Feng, GUO Zhimin, et al. A general pose testing method of industrial robot[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5):615-621. (in Chinese)
- [10] 栾倩倩. 3-RRRU 并联机器人运动学误差建模及自标定方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
LUAN Qianqian. Research on kinematics error modeling and self-calibration technology of 3-RRRU parallel manipulator[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] 赵磊, 范梦然, 赵新华, 等. 柔性并联机器人非线性摩擦动力学建模与速度规划[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6):390-396.
ZHAO Lei, FAN Mengran, ZHAO Xinhua, et al. Nonlinear friction dynamic modeling and velocity planning of flexible parallel robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):390-396. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170550&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.050. (in Chinese)
- [12] MAHMOOD M, MOSTAFA T. Kinematic analysis and design of a 3-DOF translational parallel robot[J]. International Journal of Automation and Computing, 2017, 14(4):432-441.
- [13] 陆艺, 于丽梅, 郭斌. 基于封闭尺寸链的工业机器人结构参数标定[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2):38-46.
LU Yi, YU Limei, GUO Bin. Calibration of industrial robot structure parameters based on closed dimensional chain[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2):38-46. (in Chinese)
- [14] KONG Lingyu, CHEN Genliang, ZHANG Zhuang, et al. Kinematic calibration and investigation of the influence of universal joint errors on accuracy improvement for a 3-DOF parallel manipulator[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2018, 49:388-397.
- [15] 刘志海, 薛媛, 周晨, 等. 基于遗传算法的机器人路径规划的种群初始化改进[J]. 机床与液压, 2019, 47(21):5-8.
LIU Zhihai, XUE Yuan, ZHOU Chen, et al. Population initialization improvement of robot path planning based on genetic algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(21):5-8. (in Chinese)
- [16] 刘文帅, 姚小敏, 李超群, 等. 基于响应面和遗传算法的尾座式无人机结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):88-95.
LIU Wenshuai, YAO Xiaomin, LI Chaoqun, et al. Optimization of configuration parameters of tail-sitter UAV based on response surface and genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):88-95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190510&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.010. (in Chinese)
- [17] MAHDI K, MOHAMMAD K D. A genetic algorithm for selecting cooperative or direct communications between nodes in wireless sensor networks[J]. Iran Journal of Computer Science, 2020, 3(12):25-33.
- [18] WANG S M, JIAN G P, XIAO J, et al. Optimization investigation on configuration parameters of spiral-wound heat exchanger using genetic aggregation response surface and multi-objective genetic algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2017,

119(3): 603 – 609.

[19] AMMAR A, BENNACEUR H, CHAARI I, et al. Relaxed Dijkstra and A* with linear complexity for robot path planning problems in large-scale grid environments[J]. Soft Computing, 2016, 20(10): 4149 – 4171.

[20] HAN J H, CHOI D J, PARK S U, et al. Hyper parameter optimization using a genetic algorithm considering verification time in a convolutional neural network[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(2): 721 – 726.

[21] SEONGGI L, SEJONG O, SEONGWOOK C, et al. Numerical analysis on aerodynamic performances and characteristics of quad tilt rotor during forward flight[J]. Journal of the Korean Society Aeronautical and Space Sciences, 2018, 46(3): 197 – 209.

[22] 王雷, 石鑫. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(6): 700 – 707.
WANG Lei, SHI Xin. Dynamic path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(6): 700 – 707. (in Chinese)

[23] 孙波, 姜平, 周根荣, 等. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(17): 162 – 168.
SUN Bo, JIANG Ping, ZHOU Genrong, et al. Application of improved genetic algorithm in path planning of mobile robots[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(17): 162 – 168. (in Chinese)

(上接第 322 页)

[26] 袁念念, 黄介生, 谢华, 等. 暗管控制排水棉田氮素流失规律试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 8 – 13.
YUAN Niannian, HUANG Jiesheng, XIE Hua, et al. Experimental study of nitrogen leaching pattern in controlled pipe-drainage cotton field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 8 – 13. (in Chinese)

[27] APARICIO V, COSTA J L, ZAMORA M. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(12): 1 361 – 1 372.

[28] 高世凯, 俞双恩, 王梅, 等. 旱涝交替下控制灌溉对稻田节水及氮磷减排的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 122 – 128.
GAO Shikai, YU Shuang'en, WANG Mei, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on saving water and reducing nitrogen and phosphorus loss in paddy field under alternate drought and flooding condition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 122 – 128. (in Chinese)

[29] NG H Y F, TAN C S, DRURY C F, et al. Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, 90(1): 81 – 88.

[30] SUNOHARA M D, GOTTSCHALL N, CRAIOVAN E, et al. Controlling tile drainage during the growing season in Eastern Canada to reduce nitrogen, phosphorus, and bacteria loading to surface water[J]. Agricultural Water Management, 2016, 178(1): 159 – 170.

[31] WESSTRÖM I, JOEL A, MESSING I. Controlled drainage and subirrigation—a water management option to reduce non-point source pollution from agricultural land[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 198(3–4): 74 – 82.

[32] NEGM L M, YOUSSEF M A, JAYNES D B. Evaluation of DRAINMOD – DSSAT simulated effects of controlled drainage on crop yield, water balance, and water quality for a corn-soybean cropping system in central Iowa[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 57 – 68.

[33] SUNOHARA M D, CRAIOVAN E, TOPP E, et al. Comprehensive nitrogen budgets for controlled tile drainage fields in eastern Ontario, Canada[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(2): 617 – 630.