doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.071

基于改进蛇鹭优化算法的 Delta 机器人精度补偿研究

陈久朋[1,2]　王紫燕[1]　伞红军[1,2]　何朝银[1]　张号彬[1]

(1.昆明理工大学机电工程学院,昆明 650500;2.云南省先进装备智能制造技术重点实验室,昆明 650500)

摘要:位姿精度对高速运动的并联机器人性能影响较大,建立有效的误差补偿模型是提升高速运动下机器人精度的重要手段。本文以标准节拍为 0.33 s 的高速 Delta 机器人为研究对象,在正逆运动学基础上建立了误差模型,探索了各误差源对位姿偏差的影响程度。在误差分析基础上,建立了基于运动学正解的补偿算法,采用改进的蛇鹭优化算法(Secretary bird optimization algorithm,SBOA)对误差函数进行寻优,得到了 Delta 机器人主动臂转动角补偿量。采用平均误差表示机器人实际位置与理想位置差异,建立了平均精度提升程度作为补偿效果评价指标。仿真结果表明,采用改进的 SBOA 算法补偿的机器人末端执行器位置精度提升程度为 75.44%,实验结果表明,Delta 机器人平均位置精度整体提升程度为 68.28%,证明所提误差分析和误差补偿算法对 Delta 机器人精度提升效果较为显著。

关键词:Delta 并联机器人;误差模型;蛇鹭优化算法;补偿算法;误差补偿

中图分类号:TP242;TH112　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0780-12　　**OSID**:

Accuracy Compensation of Delta Robot Based on Improved Secretary Bird Optimization Algorithm

CHEN Jiupeng[1,2]　WANG Ziyan[1]　SAN Hongjun[1,2]　HE Chaoyin[1]　ZHANG Haobin[1]

(1. *Faculty of Mechanical and Electrical Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Key Laboratory of Advanced Equipment Intelligent Manufacturing Technology of Yunnan Province*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Aiming to address the critical challenge of pose accuracy degradation in parallel robots under high-speed motion, which significantly impacted operational performance, an effective error compensation model was established as a key strategy for precision enhancement. Focusing on the high-speed Delta robot, renowned for its standard beat of 0.33 s. An error analysis model was developed based on forward and inverse kinematics to systematically investigate the influence of various error sources on end-effector pose deviation. Building upon this analysis, an error compensation algorithm utilizing the kinematic forward solution was proposed. The improved secretary bird optimization algorithm (SBOA) was employed to optimize the error function, yielding compensation values for the rotation angles of the robot's active arms. The average position error between the robot's actual and ideal positions was utilized as an intuitive accuracy metric, with the average accuracy improvement value serving as the key evaluation index for compensation effectiveness. Simulation results demonstrated that the proposed compensation approach, powered by the improved SBOA algorithm, achieved a substantial 75.44% improvement in the position accuracy of the robot's end effector. Furthermore, physical experiments confirmed an overall average position accuracy enhancement of 68.28% for the Delta robot. These findings validated the significant efficacy of the proposed error analysis methodology and compensation algorithm in substantially elevating the operational accuracy of high-speed Delta robots.

Key words: Delta parallel robot; error model; secretary bird optimization algorithm; compensation algorithm; error compensation

收稿日期:2024-07-06　修回日期:2024-08-02

基金项目:云南省基础研究计划项目(202301AU070059)

作者简介:陈久朋(1993—),男,讲师,博士,主要从事机器人技术及应用研究,E-mail:18314490225@163.com

通信作者:伞红军(1976—),男,副教授,博士,主要从事机器人技术及应用研究,E-mail:sanhjun@163.com

0　引言

相比于传统的串联工业机械臂，并联机器人因其精度高、结构稳定、承载能力高等特点被广泛应用于分拣、机床以及航空航天零件加工和医疗康复器械等领域[1-5]。在众多并联机器人中，Delta 并联机器人具有质量小、速度快、定位准确、结构简单等优点，受到业内广泛关注。尽管 Delta 机器人应用在多种场合，但受加工、变形等多种因素的影响，其动平台工作位姿与理论位姿之间存在一定偏差[6]，此类运动误差会使机器人在实际运动过程中达不到预期位置[7]，制约了 Delta 并联机器人在高速、高精度领域的应用。为了满足 Delta 并联机器人在高速、高精度领域的应用，对其进行误差辨识并提高精度显得尤为重要[8-10]。

目前对并联机器人精度提升方式包括提高制造和装配工艺水平和建立运动学模型进行校准[11-14]。因为系统误差是装配和制造环节导致的，对操作人员来说很难补偿，因此基于运动学的补偿是目前主要的误差补偿方式，其具有准确性高、成本低以及操作方便等优点。在基于运动学模型的补偿方面，文献[15]对 Delta 机器人刚-柔混合位置误差进行了补偿，取得了较好的误差补偿效果。文献[16]提出了一种基于李群李代数的方法来对重型机器人进行误差补偿。文献[17]提出了一种无模型运动学校准方法，即分割校准法，并且在 2 种不同的并联机器人上进行实验，发现该模型在其中一个并联机器人上补偿结果错误，但通过数值模拟解释了原因。

近年来，智能优化算法在机器人误差补偿中得到了广泛应用。文献[18-19]在 2TPR&2TPS 并联机器人误差辨识的基础上，使用粒子群算法对其进行误差补偿，取得了显著的效果。文献[20]使用改进的 GNDO 算法对 Stewart 平台进行位姿误差补偿，通过实验发现其补偿效果较好。将改进算法与现有算法比较，发现改进算法误差减少 1～2 个量级。文献[21]基于多目标粒子群优化(MOPSO)算法对 Staubli TX60 型工业机器人运动学参数进行精确辨识。与一些单目标优化算法进行了对比实验，验证了 MOPSO 算法在参数辨识和误差补偿方面表现较优。综上所述，传统的误差补偿方法不能普遍适用于多种并联机器人，需探索一种普适性强的误差标定方法。尽管并联机器人误差补偿已经得到了广泛研究，但对 Delta 并联机器人研究仍不够完善。本文在 Delta 机器人结构分析和运动学求解的基础上，分析机器人误差源，建立基于运动学正解的误差补偿方法，以实现 Delta 并联机器人精度提升。

1　Delta 机器人结构

D4－800A－Delta 型机器人三维模型如图 1 所示。其主要由定平台、动平台以及连接动、定平台 3 个呈 120°分布的支链组成。

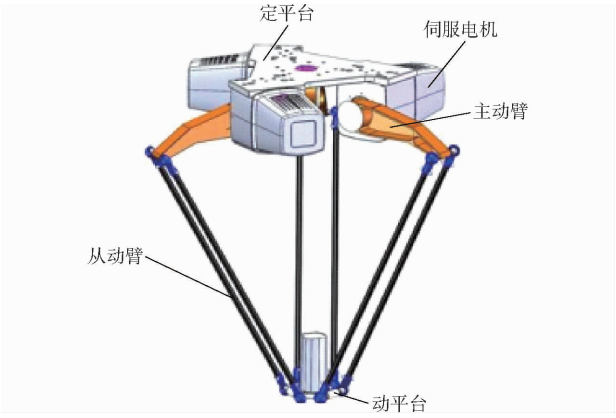


图 1　D4－800A－Delta 型机器人三维模型

Fig. 1　D4－800A－Delta robot 3D model

3 个伺服电机安装固定在定平台上，电机输出轴通过转动副与机器人主动臂连接，从动臂为平行四边形，其端点位置采用 4 个转动副或球副与主动臂和动平台相连。该机器人动平台没有姿态的变化，只具备 3 个移动自由度，能够实现空间任意位置运动，广泛用于分拣、抓取等相关领域，表 1 为 D4－800A－Delta 型机器人结构参数。

表 1　D4－800A－Delta 型机器人参数

Tab. 1　D4－800A－Delta robot parameters

参数	数值
定平台半径 R/mm	160
动平台半径 r/mm	60
主动臂铰链夹角 φ/(°)	120
主动臂臂长 L/mm	300
从动臂臂长 l/mm	800
主动臂转角 $\theta_i(i=1,2,3)$/(°)	－40～90

2　Delta 机器人运动学

图 2 为 Delta 机器人简化模型，在定平台中心 O 建立定坐标系 $Oxyz$，在动平台中心 P 处建立动坐标系 $Px_1y_1z_1$。$\triangle C_1C_2C_3$、$\triangle A_1A_2A_3$分别为圆 O 和圆 P 的内切等边三角形。点 C_1、C_2、C_3为主动臂与定平台连接点，点 A_1、A_2、A_3为从动臂与动平台连接点，点 B_1、B_2、B_3为主、从动臂之间连接点。

2.1　逆运动学

Delta 机器人逆运动学是已知末端动平台位移(x,y,z)，求解各主动臂转角 $\theta_i(i=1,2,3)$关系[22]。因为$\triangle C_1C_2C_3$为等边三角形，所以 3 个定平台铰链位置坐标为

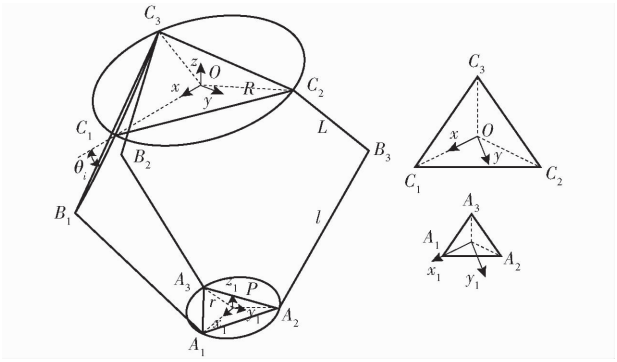


图 2 Delta 机器人结构简图

Fig. 2 Sketch of Delta robot structure

$$\boldsymbol{C}_i=\begin{bmatrix}x_i\\y_i\\z_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R\cos\varphi_i\\R\sin\varphi_i\\0\end{bmatrix}\quad(i=1,2,3)\tag{1}$$

3 个主动臂与定平台之间夹角为 $\theta_i(i=1,2,3)$,3 个主动臂铰链之间夹角为 φ。φ_i 为 OC_i 与基坐标系 x 轴正半轴的夹角,具体数值:$\varphi_1=0,\varphi_2=2\pi/3,\varphi_3=4\pi/3$。

主、从动臂连接铰链 B_i 位置为

$$\boldsymbol{B}_i=\begin{bmatrix}R\cos\varphi_i+L\cos\theta_i\cos\varphi_i\\R\sin\varphi_i+L\cos\theta\sin\varphi_i\\-L\sin\theta_i\end{bmatrix}\quad(i=1,2,3)\tag{2}$$

Delta 机器人只有 3 个移动自由度[23],其末端只能沿 x 轴、y 轴和 z 轴方向移动,设动平台中心相对于基坐标位置 $\boldsymbol{P}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$,动平台铰链相对于定坐标位置为

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}x_i\\y_i\\z_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r\cos\varphi_i+x\\r\sin\varphi_i+y\\z\end{bmatrix}\quad(i=1,2,3)\tag{3}$$

根据几何关系可得

$$\|\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{B}_i\|=l\tag{4}$$

求解可得

$$l^2=[r\cos\varphi_i+x-(R\cos\varphi_i+L\cos\theta_i\cos\varphi_i)]^2+[r\sin\varphi_i+y-(R\sin\varphi_i+L\cos\theta_i\sin\varphi_i)]^2+[z-(-L\sin\theta_i)]^2\tag{5}$$

由 $\sin^2\theta+\cos^2\theta=1$ 简化式(5)可得

$$l^2=(R-r)^2+L^2+x^2+y^2+z^2-2(x\cos\varphi_i+y\sin\varphi_i)\cdot(R-r)+2L(R-r-x\cos\varphi_i-y\sin\varphi_i)\cos\theta_i+2Lz\sin\theta_i\tag{6}$$

令

$$\begin{cases}A_i=2L(R-r-x\cos\varphi_i-y\sin\varphi_i)\\B_i=2Lz\\C_i=(R-r)^2+L^2+x^2+y^2+z^2-\\\qquad 2(x\cos\varphi_i+y\sin\varphi_i)(R-r)-l^2\end{cases}\tag{7}$$

式(6)可表示为

$$A_i\cos\theta_i+B_i\sin\theta_i+C_i=0\tag{8}$$

根据式(8)可得机器人逆运动学方程为

$$\theta_i=2\arctan\frac{-B_i-\sqrt{A_i^2+B_i^2-C_i^2}}{C_i-A_i}\quad(i=1,2,3)\tag{9}$$

2.2 正运动学

与机器人逆运动学方程求解过程相反,其正解为已知各主动臂转角 θ_i,求解动平台中心点(x,y,z)在基坐标系中的位置关系。采用空间几何学与矢量代数结合的方法进行机器人求解[24],建立 Delta 机器人等效运动学模型如图 3 所示。

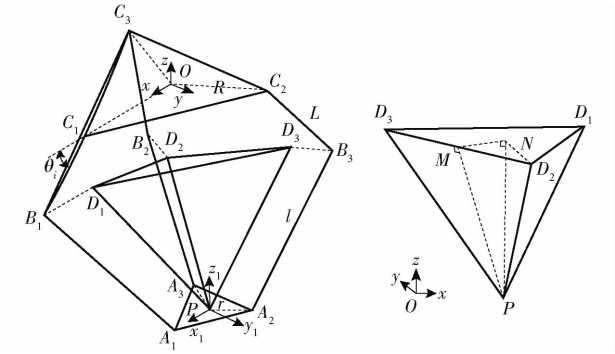


图 3 等效运动学模型

Fig. 3 Equivalent kinematic model

由于 θ_i 和定平台半径已知,B_i 位置与式(1)相同。将 A_iB_i 沿着 A_iP 平移 r 得到 D_iP,由 Delta 只有平移自由度可得

$$\boldsymbol{l}_{B_iD_i}=\boldsymbol{l}_{A_iP}=\begin{bmatrix}-r\cos\varphi_i\\-r\sin\varphi_i\\0\end{bmatrix}\quad(i=1,2,3)\tag{10}$$

由图 3 可知 $\boldsymbol{l}_{OD}=\boldsymbol{l}_{OB_i}+\boldsymbol{l}_{B_iD_i}$,$\boldsymbol{l}_{OD_i}$ 坐标可表示为

$$\boldsymbol{l}_{OD_i}=\begin{bmatrix}R\cos\varphi_i+L\cos\theta_i\cos\varphi_i-r\cos\varphi_i\\R\sin\varphi_i+L\cos\theta_i\sin\varphi_i-r\sin\varphi_i\\-L\sin\theta_i\end{bmatrix}\tag{11}$$

以上问题转换为三棱锥边长与 3 个点坐标已知,求解顶点坐标。图 3 中的三棱锥需要计算,PN 为三棱锥高($PN\perp$ 面 $D_1D_2D_3$),M 为 D_2D_3 的中点,因此可得 OM 坐标方程为

$$\boldsymbol{l}_{OM}=\frac{\boldsymbol{l}_{OD_2}+\boldsymbol{l}_{OD_3}}{2}=\begin{bmatrix}-\dfrac{2R+L(\cos\theta_2+\cos\theta_3)}{4}\\\dfrac{\sqrt{3}L(\cos\theta_2-\cos\theta_3)}{4}\\-\dfrac{L(\sin\theta_2+\sin\theta_3)}{2}\end{bmatrix}\tag{12}$$

$\boldsymbol{l}_{PD_1}=\boldsymbol{l}_{PD_2}=\boldsymbol{l}_{PD_3}=l$,所以 $MN\perp D_2D_3$,且 $\boldsymbol{l}_{ND_1}=\boldsymbol{l}_{ND_2}=\boldsymbol{l}_{ND_3}$,即 N 为 $\triangle D_1D_2D_3$ 的外接圆圆心,其半径为

$$|\boldsymbol{l}_{ND_2}| = \frac{abc}{4S} \tag{13}$$

式中　a、b、c——$\triangle D_1D_2D_3$3 条边长

S——$\triangle D_1D_2D_3$面积

由于向量可以表示为方向向量和向量的模的乘积，因此

$$\boldsymbol{l}_{MN} = \sqrt{|\boldsymbol{l}_{ND_2}|^2 - \frac{|\boldsymbol{l}_{D_1D_2}|}{2}\frac{\boldsymbol{l}_{D_2D_3}(\boldsymbol{l}_{D_1D_3}\boldsymbol{l}_{D_1D_2})}{|\boldsymbol{l}_{D_2D_3}(\boldsymbol{l}_{D_1D_3}\boldsymbol{l}_{D_1D_2})|}} \tag{14}$$

同理可得

$$\boldsymbol{l}_{NP} = \sqrt{l^2 - |\boldsymbol{l}_{ND_2}|^2}\frac{\boldsymbol{l}_{D_2D_3}\boldsymbol{l}_{D_1D_3}}{|\boldsymbol{l}_{D_2D_3}\boldsymbol{l}_{D_1D_3}|} \tag{15}$$

由式(12)、(14)、(15)可得

$$\boldsymbol{l}_{OP} = \boldsymbol{l}_{OM} + \boldsymbol{l}_{MN} + \boldsymbol{l}_{NP} \tag{16}$$

代入数据即可求得在主动臂转角已知的情况下，动平台中心点坐标。

2.3　工作空间求解

以表 1 参数作为机器人机构参数，采用数值搜索法[25-26]求出 Delta 机器人工作空间如图 4 所示。由图 4 可知，Delta 并联机器人工作空间整体呈 120°对称分布，形状近似一个倒置圆锥。Delta 机器人工作空间求解可为后续误差分析和实验点位选取奠定基础。

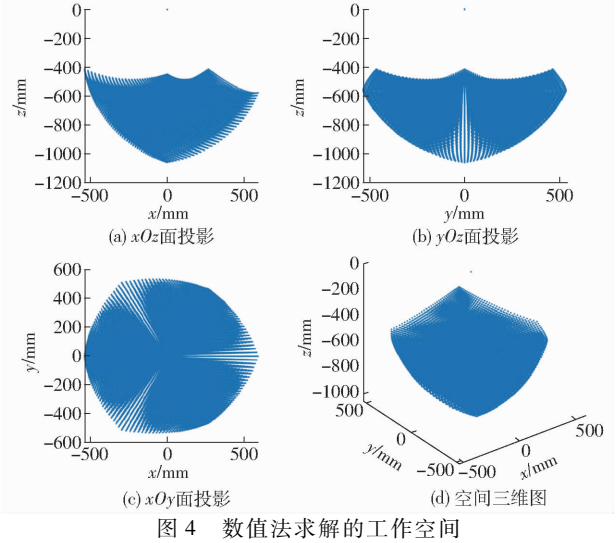


图 4　数值法求解的工作空间

Fig. 4　Workspace solved by numerical method

3　误差建模

3.1　误差来源

并联机器人误差分为动态误差和静态误差，动态误差是机器人运动过程中关节摩擦、材料形变等造成的。静态误差是由于加工中零件尺寸存在误差或关节装配时存在间隙。在并联机器人工作过程中，以上误差都会对机器人精度产生较大影响[27]。由运动学分析可以看出，对于 Delta 并联机器人最终误差影响较大的参数为主动臂臂长 L、从动臂臂长 l、动平台半径 r、定平台半径 R 和主动臂转角 θ_i。

基于机器人正逆运动学建立了机器人误差模型，得出机器人不同误差源在末端执行器位置偏差的映射，可看出各个误差源对机器人最终位置的影响程度，为后续机器人误差补偿打下基础。

3.2　基于正运动学模型的误差分析

随机选取 30 个主动臂转角 θ_1、θ_2和 θ_3，多次进行点位随机生成，保证 30 个点位能覆盖工作空间的各个方位。通过正解求出并联机器人动平台理想位置，然后选择 10 种误差存在的情况，分别计算得出 10 种误差情况对于最终动平台位置误差的影响。表达式为

$$\begin{cases}
(x,y,z) = f(R,r,L,l,\theta_1,\theta_2,\theta_3)\\
(x_1,y_1,z_1) = f(R+\Delta m,r,L,l,\theta_1,\theta_2,\theta_3)\\
\quad\vdots\\
(x_5,y_5,z_5) = f(R+\Delta m,r+\Delta m,L+\Delta m,\\
\qquad l+\Delta m,\theta_1,\theta_2,\theta_3)\\
\quad\vdots\\
(x_8,y_8,z_8) = f(R,r,L,l,\theta_1,\theta_2,\theta_3+\Delta\theta)\\
(x_9,y_9,z_9) = f(R,r,L,l,\theta_1+\Delta\theta,\theta_2+\Delta\theta,\theta_3+\Delta\theta)\\
(x_{10},y_{10},z_{10}) = f(R+\Delta m,r+\Delta m,L+\Delta m,l+\Delta m,\\
\qquad \theta_1+\Delta\theta,\theta_2+\Delta\theta,\theta_3+\Delta\theta)
\end{cases} \tag{17}$$

式中　f——Delta 并联机器人正解函数

Δm——杆长存在误差，取 1 mm

$\Delta\theta$——角度存在误差，取 1°

选取 10 种误差存在的情况，计算出各个情况下机器人末端位置与理想无误差情况下的差。

图 5 为不同情况下末端执行器位置误差。图中 $\mathrm{d}T\neq0$ 表示 θ_1、θ_2和 θ_3都存在 1 个单位误差的情况，$\mathrm{d}A\neq0$ 表示所有参数都不为零，即表示当参数 L、l、R、r、θ_1、θ_2和 θ_3都存在误差的情况下末端执行器位置误差。为了能较为准确地看出各个参数误差对于末端执行器位置误差影响程度，末端执行器位置误差取有误差情况下与理想无误差情况下位置坐标之差的绝对值。图中 $\mathrm{d}L\neq0$、$\mathrm{d}l\neq0$、$\mathrm{d}R\neq0$、$\mathrm{d}r\neq0$ 分别表示参数 L、l、R、r 存在误差的情况，由图 5c、5d 可知，当主动臂与从动臂存在误差即 $\mathrm{d}L\neq0$ 和 $\mathrm{d}l\neq0$ 对 z 方向动平台位置误差影响最大，其次为 y 方向，对于 x 方向的影响最小。图中 $\mathrm{d}T_1\neq0$、$\mathrm{d}T_2\neq0$ 和 $\mathrm{d}T_3\neq0$ 分别表示 θ_1、θ_2和 θ_3存在误差的情况，可以看出 θ_1存在误差对于 x 方向动平台位置误差影响最大，其次为 z 方向，y 方向最小。θ_2和 θ_3存在的误差对于 y 方向动平台位置误差影响最大，其次为 x 方向，z 方向最小。除以上单一参数对机构误差产生

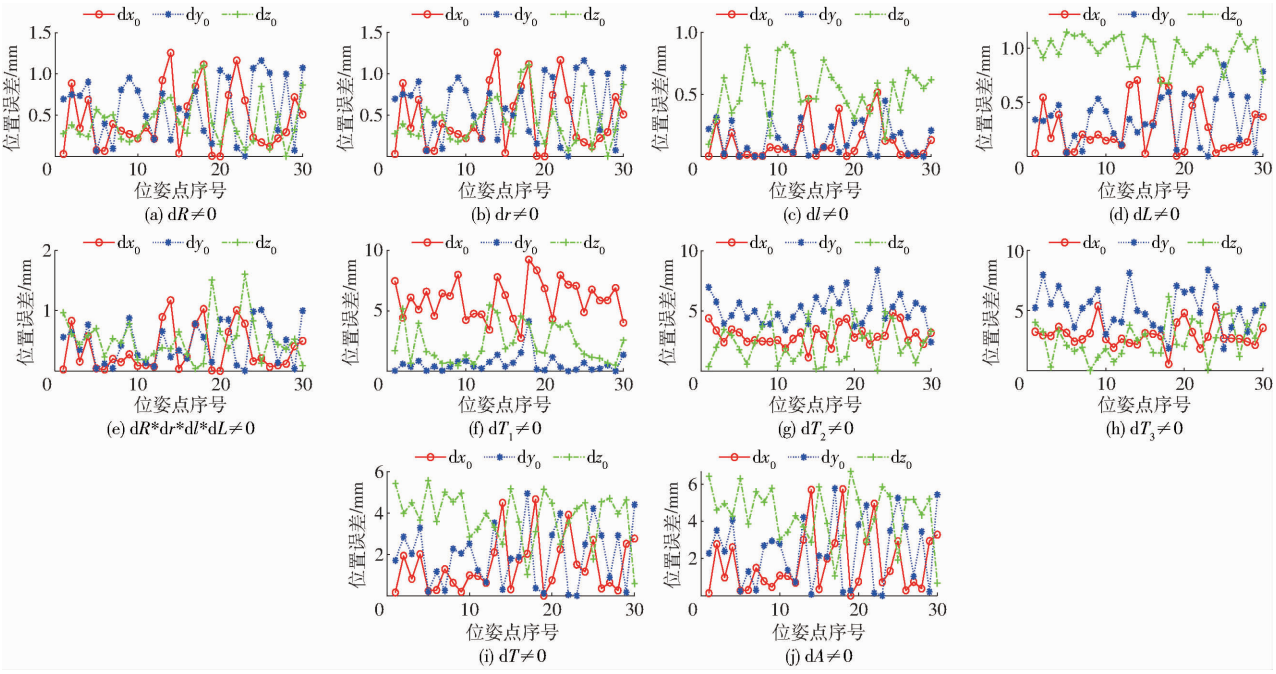


图 5 不同情况下末端执行器位置误差

Fig. 5 End-effector position error in different cases

影响外,本文还探究了参数之间的联合误差对于末端执行器位置误差的影响。图 5e 中 $dL*dl*dR*dr\neq0$ 表示参数 L、l、R、r 都存在 1 个单位误差的情况。在 $dT\neq0$ 的情况下对于末端执行器误差的影响也是 z 方向最大。由图 5 可看出,末端执行器到达的位置不同,各参数存在的误差对于末端位置误差的影响也不同且存在较大差距。

建立末端执行器存在的平均位置误差如图 6 所示。由图 6 可以看出,当参数 L、l、R、r 都存在误差对于末端执行器误差影响和参数 L、l、R、r 只有其中一个存在误差的情况相近,主动臂转角误差对于机器人末端执行器位置误差影响较大。

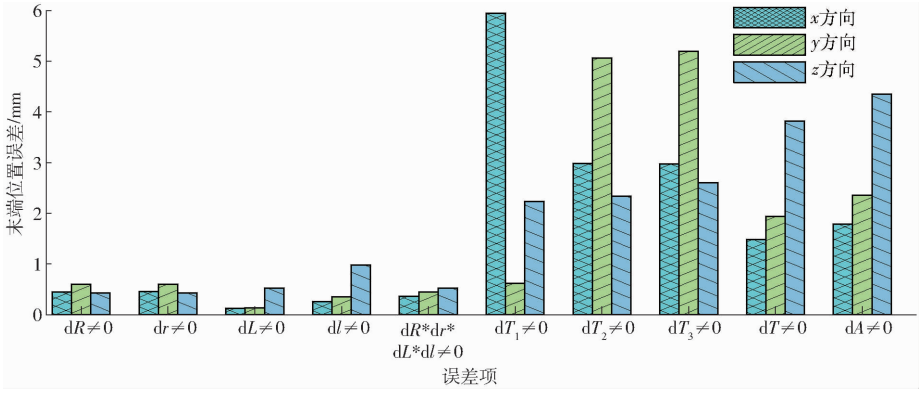


图 6 末端执行器平均位置误差

Fig. 6 Average position error of end-effector

为探究各个参数对末端执行器位置误差的影响程度,选取多个点位,基于正解模型来研究在相同点位情况下各个参数误差对于末端执行器误差的影响,选取 3 个相对典型的点位展示。图 7 为基于正解模型的各参数对于末端执行器位置误差的影响。结合机构正解模型可得各个参数误差与末端位置误差具有线性关系,但具体的相关关系受选取点位和参数等因素影响,并且对于不同末端位置方向(即 x、y、z 方向)的影响也不同,并且各个参数之间对于末端位置误差影响是独立的。

图 8 为基于正解的主动臂转角误差对末端执行器位置的影响。由图 8 可看出主动臂转角误差与末端执行器位置误差关系也近乎呈线性。可以看出其相关关系也受选取点位与参数等因素影响,并且对于不同末端位置方向(即 x、y、z 方向)的影响也不同,结合图 7 可得其受点位分布影响程度较小。

3.3 基于逆运动学模型的误差

图 9 为不同情况下主动臂转角误差,基于逆解模型求解各个参数对于主动臂转角误差的影响。

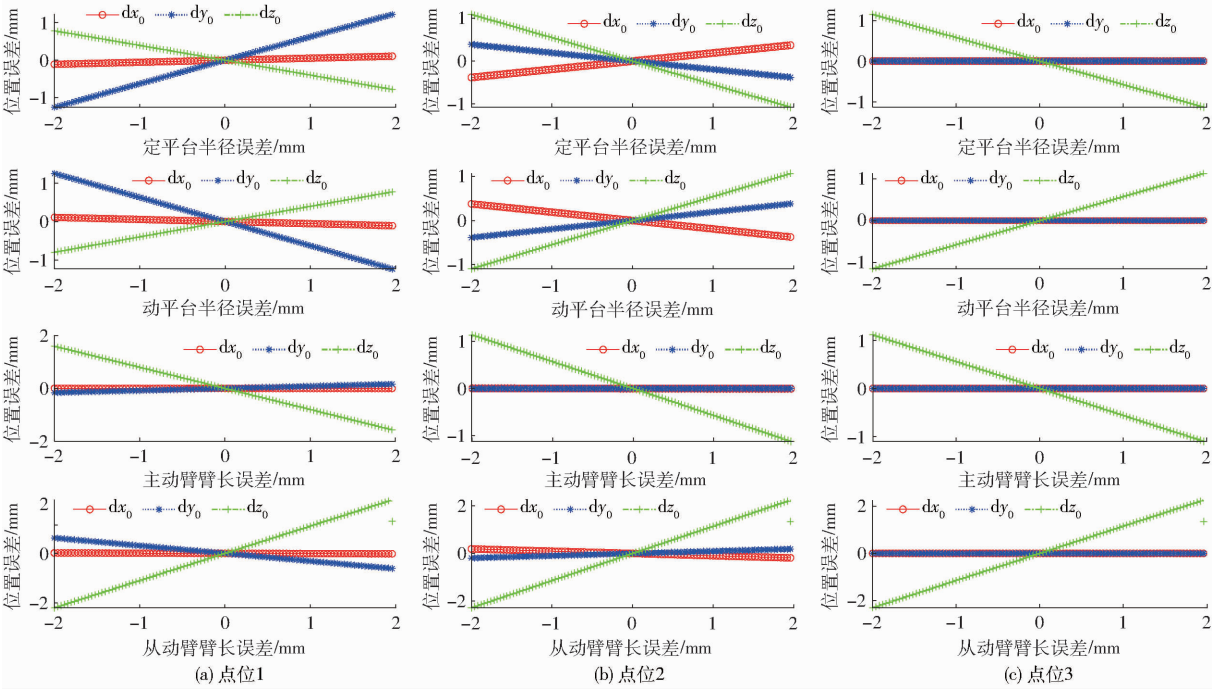


图 7　基于正解模型的各参数对末端执行器位置的影响

Fig. 7　Influence of each parameter on end-effector position based on a positive solution model

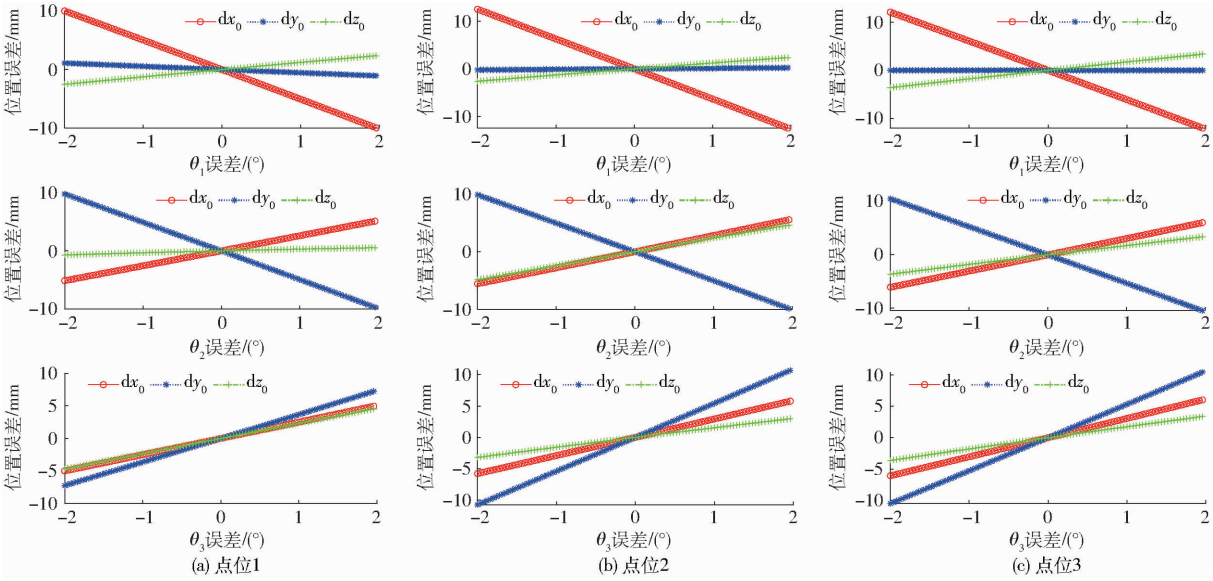


图 8　基于正解的主动臂转角误差对末端执行器位置的影响

Fig. 8　Effect of active arm angle error on end-effector position based on positive solution

$dL\neq0$、$dl\neq0$、$dR\neq0$、$dr\neq0$ 分别表示参数 L、l、R、r 存在误差的情况，$dL*dl*dR*dr\neq0$ 表示参数 L、l、R、r 都存在误差的情况。由图 9 可知，$dR\neq0$、$dr\neq0$、$dL\neq0$ 以及 $dl\neq0$ 对于机器人主动臂 3 个方向之间误差的影响差别较小。图 10 为主动臂转角平均位置误差，可以看出相比于单个参数存在误差，当参数 L、l、R、r 都存在误差时，主动臂转角误差较小。当 $dL\neq0$ 时，末端执行器 x 方向受到的影响较大。

图 11 为基于逆解的各参数对主动臂转角误差的影响。结合其逆解模型也可得出各个参数误差与主动臂误差具有线性关系。不同参数、不同点位、不同方向时，其影响也呈不同的趋势。结合逆解模型可看出，各参数之间同样不会相互产生影响。

4　参数误差补偿

为了提升机器人末端精度，需要提高加工精度以减少零件误差和装配误差。加工水平有限以及机器人工作一段时间后关节磨损加剧都可能会导致其精度达不到需求，在误差分析基础上，需对机器人进行误差补偿，以提高机器人运动精度。

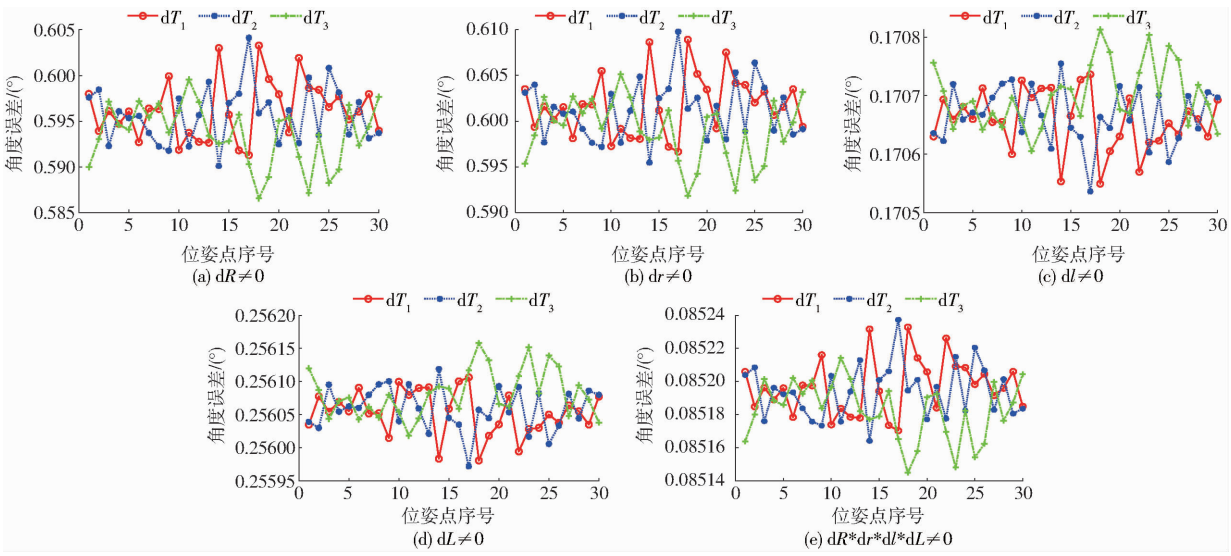


图 9 不同情况下主动臂转角误差

Fig. 9 Active arm angle error in different cases

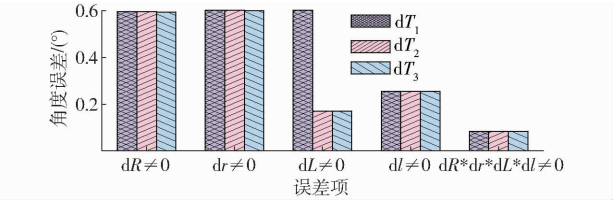


图 10 主动臂转角平均位置误差

Fig. 10 Average position error of end-effector

4.1 基于正解的误差补偿方法

通过机器人正解来建立误差补偿函数,选取 n 个 Delta 机器人理想位置点 P_i^*,由逆解模型求出理想位置对应的主动臂转角 θ_i^*。实验控制主动臂转角到达指定角度,使用激光跟踪仪测出机器人末端执行器实际位置 P_i,定义机器人补偿函数为

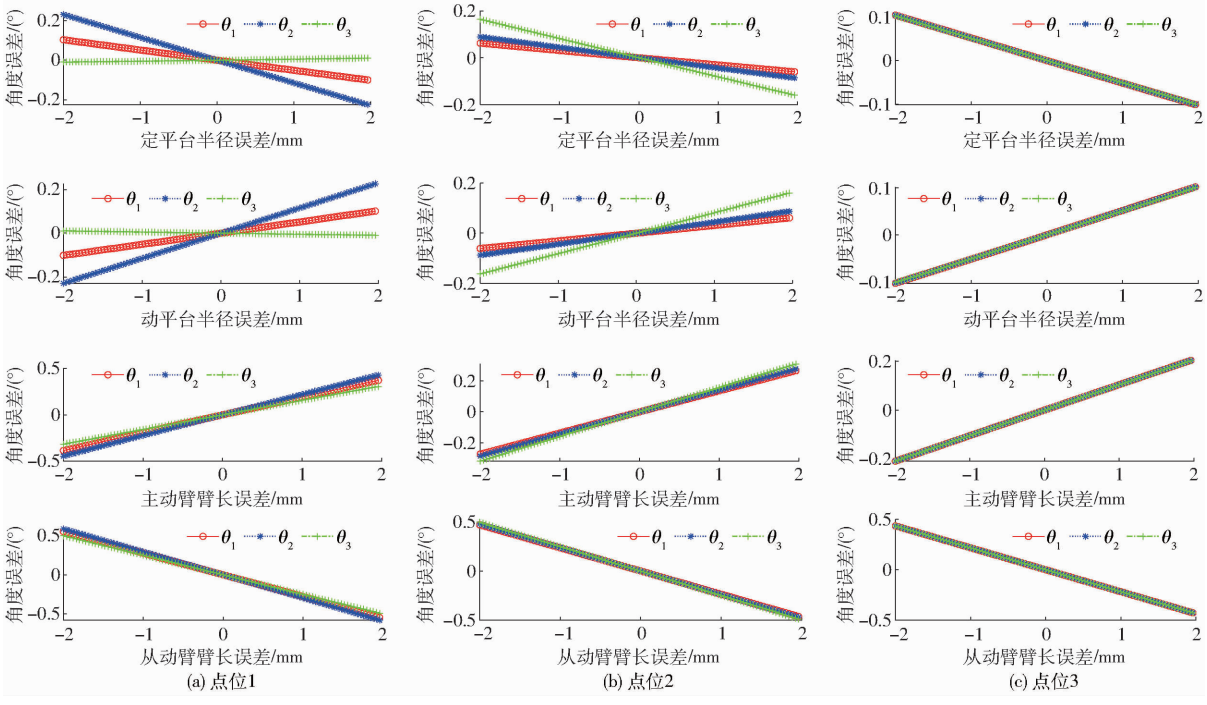


图 11 基于逆解模型的误差参数影响

Fig. 11 Effect of each parameter on active arm cornering error based on inverse solution

$$Y = \left(\sum_{i=1}^{n} \left| f(\theta_i^* + \mathrm{d}\theta) - P_i \right| \right) / n \qquad (18)$$

式中 $\mathrm{d}\theta$——主动臂转角补偿角

求解当补偿函数最小时补偿角 $\mathrm{d}\theta$,理想角度 θ_i^* 减去补偿角 $\mathrm{d}\theta$ 即为补偿后角度,在含误差的 Delta 并联机器人中使用补偿后转角控制机器人,即可得到补偿后位姿。

4.2 蛇鹭优化算法

蛇鹭优化算法(Secretary bird optimization algorithm,SBOA)为 FU 等[28]提出的元启发式优化

算法，其通过模拟其主动捕食和躲避捕食者行为来解决优化问题。采用蛇鹭优化算法首先需确定粒子数 n、待优化问题维数 D_{im}、搜索空间上下边界 l_b 和 u_b 以及总迭代次数 T。因 D4－800A－Delta 型机器人实际精度较高，需要的补偿角也较小，结合实际情况综合考虑在 ±2°内寻找最优补偿角度较为合适。设置参数为 $n=100$、$D_{im}=3$、$l_b=-2$、$u_b=2$、$T=100$。

算法可分为 3 个阶段，第 1 个阶段为初始化阶段，对空间中蛇鹭位置进行初始化，即

$$X_{i,j}=l_b+r(u_b-l_b)$$
$$(i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,D_{im}) \tag{19}$$

式中　$X_{i,j}$——秘书鸟初始位置

r——随机数，取 0 ~ 1

第 2 个阶段为探索阶段，该阶段模拟蛇鹭捕猎策略，其捕猎过程分为寻找猎物、消耗猎物和攻击猎物 3 个阶段，即

$$X_{i,j}^{new,P1}=x_{i,j}+(x_{random_1}-x_{random_2})R_1 \tag{20}$$

$$X_{i,j}^{new,P1}=x_{\text{best}}+e^{(t/T)^4(R_B-0.5)}(x_{\text{best}}-x_{i,j}) \tag{21}$$

$$X_{i,j}^{new,P1}=x_{\text{best}}+\left(1-\frac{t}{T}\right)^{2\frac{t}{T}}x_{i,j}RL \tag{22}$$

$$X_i=\begin{cases}X_i^{new,P1} & (F_i^{new,P1}<F_i)\\ X_i & (F_i^{new,P1}\geqslant F_i)\end{cases} \tag{23}$$

式中　$X_i^{new,P1}$——第 i 只秘书鸟新状态

x_{random_1}——第 1 阶段迭代随机候选解

x_{random_2}——第 2 阶段迭代随机候选解

R_1——区间[0,1]中随机生成的维数为 $1\times D_{im}$ 的数组

$X_{i,j}^{new,P1}$——第 j 维的值

$F_i^{new,P1}$——目标函数适应度

R_B——从标准正态分布中随机生成的维数为 $1\times D_{im}$ 的数组

x_{best}——当前最优值

当迭代次数小于总次数 1/3 时，采用式(20)、(23)进行迭代；当迭代次数大于总次数 1/3 小于 2/3 时采用式(21)、(23)进行迭代；大于 2/3 时采用式(22)、(23)进行迭代。第 3 个阶段为开发阶段，该阶段模拟蛇鹭逃生阶段，即

$$x_{i,j}^{\text{new},P2}=\begin{cases}x_{best}+(2R_B-1)\left(1-\frac{t}{T}\right)^2x_{i,j} & (r\leqslant r_i)\\ x_{i,j}+R_2(x_{random}-Kx_{i,j}) & (r>r_i)\end{cases} \tag{24}$$

$$X_i=\begin{cases}X_i^{new,P2} & (F_i^{new,P2}<F_i)\\ X_i & (F_i^{new,P2}\geqslant F)\end{cases} \tag{25}$$

式中　R_2——从正态分布中随机生成维度为 $(1\times D_{im})$ 的数组

x_{random}——当前迭代随机候选解

式(24)中，$r=0.5$，K 取 1 或 2。

4.3　算法改进与补偿流程

为了提高 SBOA 算法性能，需优化空间中粒子初始化的方式，其补偿过程如图 12 所示。

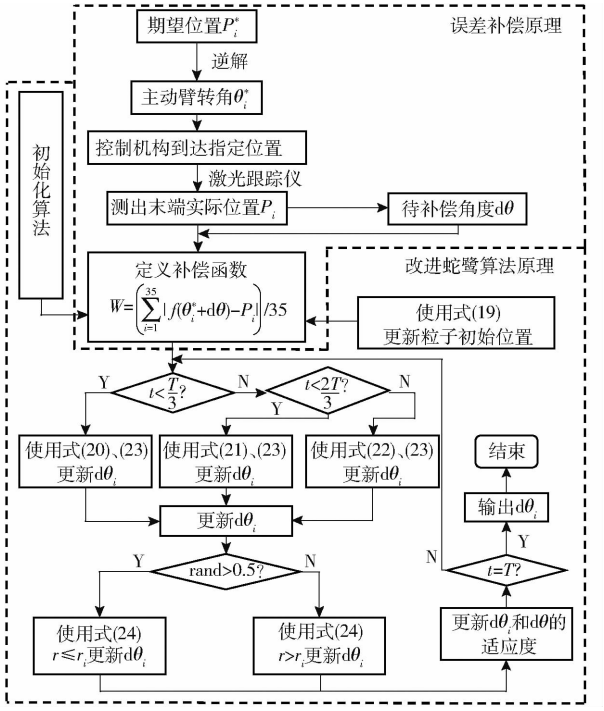


图 12　补偿原理流程图

Fig. 12　Compensation principal flowchart

采用一个 $n\times D_{im}$ 矩阵来模拟粒子初始位置[29]，并使用 $f([X_{n1},X_{n2},\cdots,X_{nDim}])$ 表示第 n 个个体适应度，种群适应度表示为

$$F=[f([X_{11},X_{12},\cdots,X_{1Dim}]);$$
$$f([X_{21},X_{22},\cdots,X_{2Dim}]);\cdots;$$
$$f([X_{n1},X_{n2},\cdots,X_{nDim}])] \tag{26}$$

从 0 到 1 准备 n 个随机数 $k_1,k_2,\cdots,k_n$，并初始化粒子位置

$$x_i=\sum_1^i k_i\Big/\sum_1^n k_i$$
$$X=l_b+x^*(u_b-l_b) \tag{27}$$

式中　x_i——均质化的 k_i

x_i^*——x 中的随机值

5　误差补偿实验

5.1　仿真实验

在 Delta 机器人期望工作空间内选取 30 个位置点进行仿真实验。选取的 30 个点位如表 2 所示。使用平均误差 dp 和平均精度提升程度 K 来准确直观地评估算法补偿效果，其计算式为

$$dp = \sum_{i=1}^{n} \frac{|dx_i| + |dy_i| + |dz_i|}{3n} \tag{28}$$

$$K = \frac{\left\{\sum_{i=1}^{n}\left[(|dx_i| + |dy_i| + |dz_i|) - (|dx_{1i}| + |dy_{1i}| + |dz_{1i}|)\right]/3\right\}\Big/n}{\left[\sum_{i=1}^{n}(|dx_i| + |dy_i| + |dz_i|)/3\right]\Big/n} \times 100\% \tag{29}$$

式中 dx_i、dy_i、dz_i——补偿前末端执行器 3 个方向上的误差

dx_{1i}、dy_{1i}、dz_{1i}——算法补偿后末端执行器在 3 个方向上的误差

表 2 实验点位选取

Tab. 2 Experimental site selection mm

位置点序号	x	y	z
1	100.000 9	-0.260 2	-692.844 0
2	0.000 5	-100.258 6	-692.808 6
3	1.088 8	-166.048 1	-619.288 9
⋮	⋮	⋮	⋮
29	-54.306 5	-52.095 6	-688.943 4
30	-0.003 5	-0.257 0	-698.106 1

为更直观地看出补偿效果，仿真和实验所有的误差均由绝对值描述。

选取 R、r、L、l 参数单独存在误差的情况和以上几个参数都存在误差情况进行分析。为符合实际情况，在 1 mm 内随机选取各个参数误差。图 13 为不同情况下各个点仿真实验补偿前后误差。由图 13 可以看出，不同情况下补偿都有明显效果，每个点位误差都有较大程度减少，精度有较大提升。

为了直观地表达不同情况下补偿效果，统计了不同情况下所有点位补偿前平均误差和平均精度提升程度如表 3 所示。结果表明动、定平台或者主动臂臂长单独存在误差时，使用 SBOA 算法进行对末端执行器误差补偿，补偿后平均精度提升程度分别为 58.82%、68.76%、56.29%。但当从动臂存在误差或者是以上几个参数均存在误差时，经过算法补偿后，其末端执行器平均精度提升程度为 96.67%。在 5 种不同情况下，机器人平均精度提升至 75.44%。

为了进一步验证本文算法性能，将 SBOA 与经典算法粒子群算法（Particle swarm optimization，

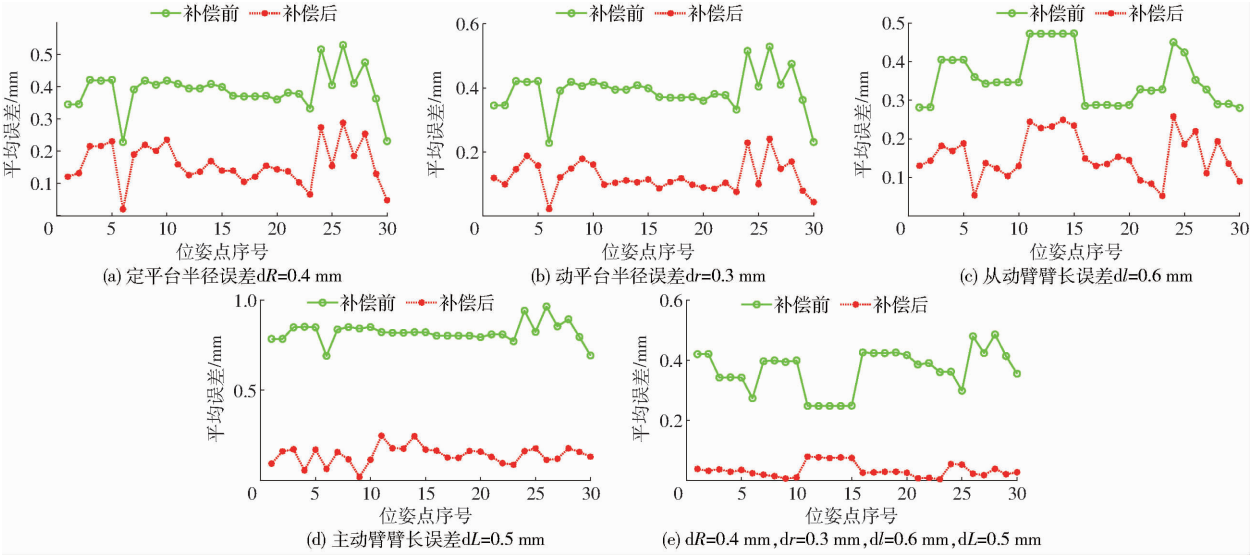


图 13 单个点仿真实验补偿前后误差

Fig. 13 Error before and after compensation of single point simulation experiment

表 3 并联机器人误差补偿仿真结果

Tab. 3 Simulation results of error compensation of parallel mechanism

dR/mm	dr/mm	dL/mm	dl/mm	补偿角度/(°)			补偿前平均误差/mm	平均精度提升程度/%
				$d\theta_1$	$d\theta_2$	$d\theta_3$		
0.4	0	0	0	0.047 42	0.048 87	0.050 24	0.389 4	58.82
0	0.3	0	0	-0.039 04	-0.036 59	-0.037 62	0.389 4	68.76
0	0	0.5	0	0.068 45	0.067 06	0.066 55	0.357 1	56.29
0	0	0	0.6	-0.151 20	-0.141 36	-0.141 55	0.821 5	96.67
0.4	0.3	0.5	0.6	-0.062 78	-0.062 24	-0.062 60	0.368 1	96.67

PSO）、灰狼优化算法（Grey wolf optimizer，GWO）、萤火虫算法（Firefly algorithm，FA）和波浪搜索算法（Wave search algorithm，WSA）进行对比。采用表 3 中 4 个参数都存在误差的情况进行仿真，各个算法

适应度曲线如图 14 所示。由图 14 可以看出选取的优化算法都可以较好地对误差实现补偿。基本上迭代 10 次以上都能寻得最优值。表 4 为各种算法具体性能对比，列举各个算法的运行时间和平均精度提升程度。由表 4 可看出，各类经典算法的运行速度较快但补偿后平均精度提升程度不如 SBOA 与 WSA，而 SBOA 寻优所花费时间比 WSA 少。

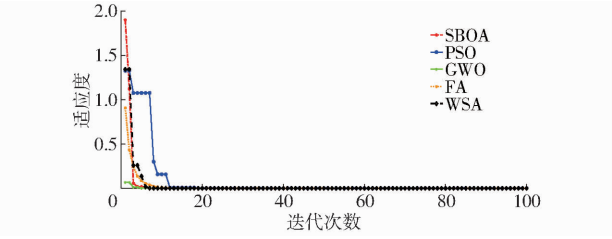


图 14　不同算法适应度曲线

Fig. 14　Fitness curves for different algorithms

表 4　算法性能对比

Tab. 4　Comparison of algorithm performance

算法	平均精度提升程度/%	运行时间/s
蛇鹭优化算法(SBOA)	96.67	3.25
粒子群算法(PSO)	92.89	1.96
灰狼优化算法(GWO)	95.48	1.64
萤火虫算法(FA)	93.96	1.57
波浪搜索算法(WSA)	96.67	5.29

5.2　实验

实验在实验室与深圳市金奥博科技股份有限公司联合搭建的 D4－800A－Delta 型并联机器人平台上进行，如图 15 所示。D4－800A－Delta 型机器人标准节拍高达 0.33 s，其使用 RapidMotion 运动控制器，属于高速高精度并联机器人，具有运动补偿功能。在使用过程中因磨损等因素其精度会有一定的下降，实验建立在有运动补偿功能的控制器控制情况下，其精度进一步补偿。所使用的测量工具为激光跟踪仪，其测量精度为 0.004～0.01 mm。

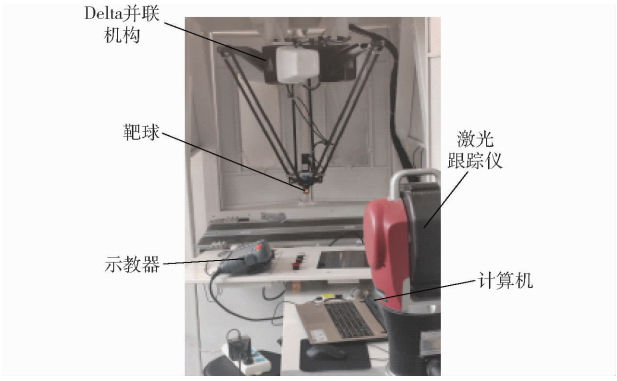


图 15　基于激光跟踪仪的末端位置测量实验平台

Fig. 15　Experimental platform for end position measurement based on laser tracker

在实际操作中，将靶球座通过胶枪粘贴到末端执行器中心位置，然后将靶球吸附在靶球座上来精确测量末端执行器位置。实体实验点位选择和仿真点位均选择表 2 中的数据进行。根据选取点位，控制机器人末端执行器到达指定位置后，使用激光跟踪仪测量机器人末端执行器位置。记录下末端执行器实际位置。使用算法求解补偿函数最小值，得出补偿角度 $d\theta$。控制机器人末端执行器到达补偿后的位置，再次使用激光跟踪仪测出补偿后位置。

图 16 为各个点位在 x、y、z 方向上的误差。由图 16 可以看出，所选取的点在补偿后各个方向上的误差都有较大程度的减少，说明每个点各个方向的精度都有较大程度提升。为了更切合实际补偿情况，采用统一补偿方法，即每个点补偿角度相同。在这个基础上，为了保证所选点位总体精度有效提升，可能会出现个别点位的在个别方向上补偿效果较差的情况。也会出现补偿后个别点位在个别方向误差变大的可能，但大部分误差都减少，且总误差也有极大程度减少。

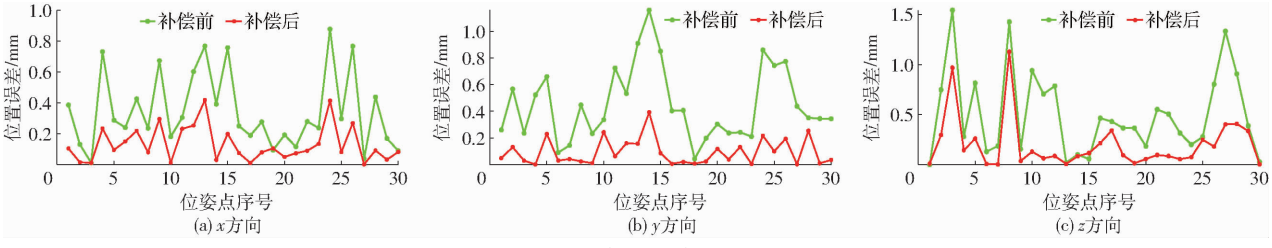


图 16　各个点位误差

Fig. 16　Errors at various points

图 17 为每个点位实验补偿前后误差，实验补偿前后误差为 3 个方向平均误差，结果表明每个点平均位置误差相比补偿前都有明显减少，由图 17 可知，Delta 机器人补偿后平均精度提升为 68.28%，证明了提出的补偿方法有效。对比仿真和实验结果可知，在同一参数下仿真效果优于实验效果，原因是实验中机器人可能还存在其他误差，如各个关节之间存在间隙、主动臂铰链夹角之间角度误差，实验过程中人为操作等问题都会导致实验补偿效果不如仿真效果明显。从补偿效果和补偿精度上看本文提出的

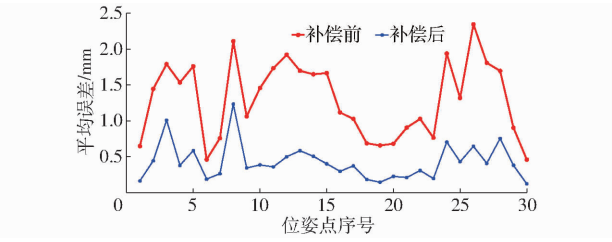


图 17 实验补偿前后 3 个方向平均误差

Fig. 17 Total error before and after experimental compensation

方法具有较好的补偿能力。

6 结论

(1)并联机器人的末端位置精度受多种误差源(几何误差与非几何误差)非线性耦合影响,其影响程度随具体误差参数和空间点位不同而显著变化,且难以通过特定数学模型直接解析求解补偿量。

(2)基于优化算法(SBOA)的补偿方法可以通过同时优化多空间点位的关节角度补偿量克服误差模型的非线性耦合难题,是一种更具工程实用性的高精度控制解决方案。

(3)仿真实验结果表明,当单一几何参数存在误差时,补偿效果显著;特别是当动平台半径存在误差或所有几何参数均存在误差时,补偿效果更为突出。仿真环境下,补偿后末端执行器整体平均位置精度提升幅度达到 75.44%。

(4)在 Delta 机器人物理平台上进行实验验证。实验结果表明,应用所提出的补偿算法后,机器人平均位置精度整体提升 68.28%。证明了本文所建立的误差分析模型和基于 SBOA 的误差补偿算法的有效性,能够显著提升 Delta 并联机器人在实际运行中的定位精度。

参 考 文 献

[1] ZAKARYA C, SAID A, SELMAN D. Comparative analysis of stiffness in redundant co-axial spherical parallel manipulator using matrix structural analysis and VJM method[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2023,47(4):2225 - 2241.

[2] 陈耀晖,蔡武斌,孙博瀚,等. 基于深度学习与 Delta 机器人的病损柑橘上料部位初筛系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(6):535 - 545.
CHEN Yaohui, CAI Wubin, SUN Bohan, et al. Design and experiment of defective citrus sieving system based on deep learning and Delta robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(6):535 - 545. (in Chinese)

[3] LI Yuntao, XU Zichun, YANG Xiaohang, et al. Identification and high-precision trajectory tracking control for space robotic manipulator[J]. Acta Astronautica,2024,214: 484 - 495.

[4] 张雷雨,常雅威,俞振东,等. 并联腕康复机器人的设计与运动学性能评价[J]. 机械工程学报, 2024,60(17): 123 - 132.
ZHANG Leiyu, CHANG Yawei, YU Zhendong, et al. Design and kinematic analysis of parallel wrist rehabilitation robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024,60(17): 123 - 132. (in Chinese)

[5] ZHANG Jianjun, YANG Shuai, LIU Chenglei, et al. Configuration and kinematics of a 3-dof generalized spherical parallel mechanism for ankle rehabilitation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2024,37(1): 24.

[6] WANG Zhiqiang, MASORY O. On the accuracy of a Stewart platform-part I: the effect of manufacturing tolerances[C]// IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 1993:114 - 120.

[7] WANG Ruizhou, ZHANG Xianmin. Parameters optimization and experiment of a planar parallel 3-DOF nanopositioning system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3):2388 - 2397.

[8] LUO Yuheng, GAO Jian, CHEN Disai, et al. Accurate error compensation method for multi-axis parallel machine via singularized Jacobi geometric parameter correction and coupling error evaluation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2024,89:102771.

[9] GAO Wei, SOICHI I, ALKAN M D, et al. Machine tool calibration: measurement, modeling, and compensation of machine tool errors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2023,187:104017.

[10] ZHANG Zhao, JIANG Feng, LUO Ming, et al. Geometric error measuring, modeling, and compensation for CNC machine tools: a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024,37(2):163 - 198.

[11] 孔令雨. 并联机器人的运动学误差建模及参数可辨识性分析[D]. 上海:上海交通大学,2018.
KONG Lingyu. Kinematic error modeling and parameter identifiability analysis of parallel mechanisms[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)

[12] LUO Xuan, XIE Fugui, LIU Xinjun. Kinematic calibration of the 3-degree-of-freedom redundantly actuated spatial parallel module of a five-axis hybrid machine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,2020, 234(9):1185 - 1197.

[13] ZENG Chendong, QIU Zhicheng, ZHANG Fenhua, et al. Error modelling and motion reliability analysis of a multi-DOF redundant parallel mechanism with hybrid uncertainties[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2023,235:109259.

[14] WU Haiyu, KONG Lingyu, LI Qinchuan, et al. A comparative study on kinematic calibration for a 3-DOF parallel manipulator

using the complete-minimal, inverse-kinematic and geometric-constraint error models[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023,36(1): 121 - 145.

[15] 郑坤明,张秋菊. Delta 机器人刚-柔混合位置误差建模与补偿分析[J]. 机械设计,2017,34(1): 52 - 61.
ZHENG Kunming, ZHANG Qiuju. Error modeling and compensation analysis of Delta robot rigid - flexible hybrid position[J]. Journal of Machine Design,2017,34(1): 52 - 61. (in Chinese)

[16] YANG Kun, YANG Wenyu, WANG Chunming. Inverse dynamic analysis and position error evaluation of the heavy-duty industrial robot with elastic joints: an efficient approach based on Lie group[J]. Nonlinear Dynamics, 2018,93(2):487 - 504.

[17] ZHAO Guohua, WANG Dan, LIU Liangbao, et al. Positioning error compensation for parallel mechanism with two kinematic calibration methods[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020,33(9):2472 - 2489.

[18] 陈明方,何朝银,黄良恩,等. 2TPR2TPS 并联机器人的位姿误差建模与补偿研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(11): 94 - 103.
CHEN Mingfang, HE Chaoyin, HUANG Liang'en, et al. Research on pose error modeling and compensation of 2TPR&2TPS parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11):94 - 103. (in Chinese)

[19] 陈明方,何朝银,张永霞,等. 2TPR2TPS 并联机器人结构参数辨识[J]. 农业机械学报,2023, 54(10):421 - 431.
CHEN Mingfang, HE Chaoyin, ZHANG Yongxia, et al. Structural parametric identification of 2TPR&2TPS parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10): 421 - 431. (in Chinese)

[20] 张建华,张斌,赵明伟,等. 基于改进型 GNDO 算法的 Stewart 平台位姿误差补偿[J/OL]. 控制工程(2024 - 05 - 14),1 - 11[2025 - 08 - 03]. https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230674.
ZHANG Jianhua, ZHANG Bin, ZHAO Mingwei, et al. Stewart platform pose error compensation based on improved GNDO algorithm[J/OL]. Control Engineering of China(2024 - 05 - 14),1 - 11[2025 - 08 - 03]. https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230674. (in Chinese)

[21] 乔贵方,蒋欣怡,高春晖,等. 基于多目标优化的工业机器人位置与姿态精度提升方法[J]. 仪器仪表学报,2023, 44(12):217 - 224.
QIAO Guifang, JIANG Xinyi, GAO Chunhui, et al. Method for improving position and attitude accuracy of industrial robots based on multi-objective optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(12):217 - 224. (in Chinese)

[22] 梁香宁,牛志刚. 三自由度 Delta 并联机器人运动学分析及工作空间求解[J]. 太原理工大学学报,2008,39(1):93 - 96.

[23] 黄真. 论机器人自由度:寻找了 150 年的自由度通用公式[M]. 北京:科学出版社, 2011:237 - 242.

[24] 赵杰,朱延河,蔡鹤皋. Delta 型并联机器人运动学正解几何解法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003,35(1): 25 - 27.
ZHAO Jie, ZHU Yanhe, CAI Hegao. Positive geometric solution method for kinematics of Delta-type parallel robots[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003,35(1):25 - 27. (in Chinese)

[25] 伞红军,杨晓园,陈久朋,等. Delta 并联机器人运动学性能分析与结构参数优化[J]. 农业机械学报,2024,55(8):446 - 458.
SAN Hongjun, YANG Xiaoyuan, CHEN Jiupeng, et al. Kinematic performance analysis and structural parameter optimization of Delta parallel robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(8):446 - 458. (in Chinese)

[26] 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)

[27] 李国江,张飞,李露,等. 基于多种群协同进化算法的绳索牵引并联机器人末端位置误差补偿[J]. 机器人,2021,43(1): 81 - 89.
LI Guojiang, ZHANG Fei, LI Lu, et al. Error compensation of end-effector position for the cable-driven parallel robot based on multi-group co-evolutionary algorithm[J]. Robot, 2021,43(1):81 - 89. (in Chinese)

[28] FU Youfa, LIU Dan, CHEN Jiadui, et al. Secretary bird optimization algorithm: a new metaheuristic for solving global optimization problems[J]. Artificial Intelligence Review 2024,57:123.

[29] ZHANG Haobin, SAN Hongjun, SUN Haijie, et al. A novel optimization method: wave search algorithm[J]. The Journal of Supercomputing,2024,80(12):16824 - 16859.