

数学

Delta 并联机器人装配误差分析与补偿

潘 华<sup>1,2,3</sup> 邱继红<sup>1,3</sup> 刘 林<sup>3</sup>

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室<sup>1</sup>, 沈阳 110016; 中国科学院大学<sup>2</sup>, 北京 100049;  
沈阳新松机器人自动化股份有限公司<sup>3</sup>, 沈阳 110168)

**摘 要** 针对工业应用中并联机器人运动规划与控制的精度需求,提出一种基于多样性反馈的自适应粒子群优化算法(APSO)来提高并联机器人精度。利用机器人机构闭环矢量关系得到运动学正逆解;并应用基于多样性反馈的自适应粒子群优化算法将结构参数优化问题转化为非线性系统优化问题。通过对机器人驱动电机转角进行优化,使得机器人在工作空间内具有理想的工作精度。以 SRBD 型号 Delta 型并联机器人进行试验验证,仿真结果可达到 10<sup>-3</sup> 毫米级别,验证了方法的有效性用。

**关键词** 并联机器人 装配误差 粒子群优化算法 误差补偿

**中图法分类号** 0242; **文献标志码** A

随着智能装备的发展,机器人在工业制造中的优势越来越显著。Delta 并联机器人以其精度高、速度快、承载能力强等特点而广泛应用自动化生产领域。通过运动规划与控制机器人能够快速准确完成规划动作,大大改变包装、分拣、装配等劳动密集型产业的生产方式<sup>[1-3]</sup>。

Delta 机器人作为一种空间闭环机构,目前重复定位精度已达到 ±0.01 mm 水平。但在实际应用过程中,由于存在机构零件加工、部件装配以及负载变化导致的形变等误差因素,Delta 并联机器人绝对定位精度与理论可达精度相差较大,进而限制了其应用<sup>[4,5]</sup>。通过提高零件加工精度,开发更为有效的控制算法等途径可以保证机器人性能,但限于成本高昂难以推广。目前改善机器人精度的普遍方法是通过运动学标定得到机构误差,然后通过修改控制器模型参数加以补偿<sup>[6]</sup>。但 Delta 机器人由于其空间多闭环、强耦合的特点,传统的标定补偿方法效果不甚理想。

本文以 Delta 并联机器人为对象,在机器人正、逆解运动学模型基础上,综合考虑装配误差,利用改进粒子群优化算法全局优化能力强的特点将非线性

运动学模型参数优化问题进行简化,直接对驱动杆关节角位移进行补偿,从而提高机器人定位精度。最后通过对 SRBD 型 Delta 机器人进行试验验证了方法的有效性。

1 机构运动学分析

Delta 并联机构由定平台、动平台、3 条沿定平台均匀分布的支链组成;在各支链中,主动臂在伺服电机驱动下绕定平台转动较转动;从动臂两端分别与主动臂及动平台经球铰连接,且从动臂为由 2 条等长的杆件组成的平行四边形结构。理想情况下动平台相对于定平台实现三维平动。以定平台 B<sub>1</sub>B<sub>2</sub>B<sub>3</sub> 几何中心 O 为原点,建立坐标系 O-XYZ, X 轴过 B<sub>1</sub> 点, Y 轴平行于 B<sub>2</sub>B<sub>3</sub>。动平台 A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>3</sub> 几何中心点 P 坐标为 (x, y, z), 以 P 为原点建立动平台坐标系 p-xyz。定平台与动平台外接圆半径分别为 R、r。因为从动臂始终保持平行四边形结构,故引入虚拟杆将其简化为单杆加以分析。图 1 为引入虚拟杆的机构运动学模型。

1.1 运动学逆解模型

根据机构矢量闭环 OPA<sub>i</sub>E<sub>i</sub>B<sub>i</sub>O, 存在以下矢量关系:

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OB_i} + \overrightarrow{B_iE_i} + \overrightarrow{E_iA_i} + \overrightarrow{A_iP} \tag{1}$$

式(1)中: $\overrightarrow{OP} = (x, y, z)^T$ ;  $\overrightarrow{OB_i} = (R\cos\eta_i \ R\sin\eta_i \ 0)^T$ ;  $\overrightarrow{PA_i} = (r\cos\eta_i \ r\sin\eta_i \ 0)^T$ ;  $\overrightarrow{B_iE_i} = L \mathbf{u}_1$ ,  $\overrightarrow{E_iA_i} = l \mathbf{v}_i$ 。其中:  $\mathbf{u}_1$  为主动臂单位向量;  $\mathbf{v}_i$  为从动臂单位向量;  $\eta_i = 2(i-1)\pi/3, i = 1, 2, 3$ 。

依据几何关系可得:

$$l^2 = [(R + L\cos\theta_i - r) \cos\eta_i - x]^2 + [(R +$$

2016 年 1 月 3 日收到  
沈阳市信息产品制造业  
发展专项资金(Z201401001)资助  
第一作者简介:潘 华(1992—),硕士研究生。研究方向:并联机器人。E-mail:13889308152@163.com。  
引用格式:潘 华,邱继红,刘 林. Delta 并联机器人装配误差分析与补偿[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 1—5  
Pan Hua, Qiu Jihong, Liu Lin. Delta parallel robot assembly error analysis and calibration[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 1—5

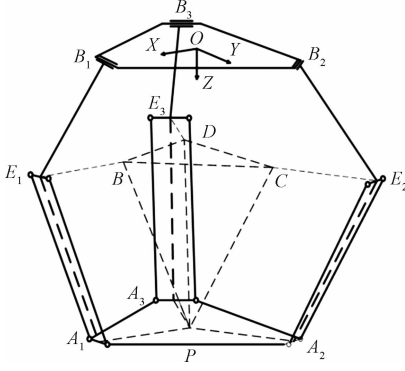


图1 引入虚拟杆的运动学模型

Fig. 1 Kinematic model with virtual rod

$$L\cos\theta_i - r) \sin\eta_i - x]^2 + (L\sin\theta_i + z)^2 \quad (2)$$

化简得:  $A\sin\theta_i + B\cos\theta_i = C$ 。式中:  $A = -2zL$ ;

$$B = 2L[(R-r) - x\cos\eta_i - y\sin\eta_i]; C = -x^2 - y^2 - z^2 - L^2 + l^2 - (R-r)^2 + 2(R-r)(x\cos\eta_i + y\sin\eta_i)。$$

可得到Delta并联机器人运动学反解:

$$\theta_i = \arctan \frac{\pm C}{\sqrt{A^2 + B^2 - C^2}} - \arctan \frac{B}{A} \quad (3)$$

## 1.2 运动学正解模型

根据式(2)可得:

$$l^2 = [(R + L\cos\theta_i - r) \cos\eta_i - x]^2 + [(R + L\cos\theta_i - r) \sin\eta_i - x]^2 + (L\sin\theta_i + z)^2 \quad (4)$$

可以得到关于机器人末端位置  $P(x, y, z)$  的三元一次方程组, 利用MATLAB软件通过数值解法求解方程组中3个变量, 即可得到Delta机器人运动学正解。

## 2 误差建模

为了利用空间矢量链构造Delta机器人误差模型, 在图1的基础上建立支链的局部坐标系<sup>[7]</sup>, 如图2所示。 $C_i$ 、 $D_i$ 、 $F_i$ 、 $G_i$ 分别为从动臂两端的4个球铰中心,  $C_iF_i$ 、 $D_iG_i$ 分别为从动臂的两条从动杆。建立机器人支链局部坐标系  $B_i-x_iy_iz_i$ ,  $y_i$  与支链主动臂理想转动轴轴线重合,  $x_i$  轴与定平台平面平行, 原点  $B_i$  为  $E_i$  到  $y_i$  轴的交点; 建立局部坐标系  $E_i-x_iy_iz_i$ ,  $y_i$  轴沿  $CD$  连线,  $x_i$  轴平行于定平台平面,  $z_i$  轴向下, 同时与  $E_i-x_iy_iz_i$  各轴平行的建立坐标系  $A_i-x_iy_iz_i$ 。

在图示坐标系下, 式(1)可改写为

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OB_i} + \mathbf{R}_{OB_i}[L_i \mathbf{u}_i + (-1)^j \mathbf{R}_{B_i E_i} c_{ij} \mathbf{n}] + l_i \mathbf{v}_i - \mathbf{R}_{OP} \overrightarrow{A_i P} - \mathbf{R}_{OP} \mathbf{R}_{P A_i}[(-1)^j d_{ij} \mathbf{n}] \quad (5)$$

式(5)中,  $\mathbf{n} = [0 \ 1 \ 0]^T$ ;  $L$ 、 $\mathbf{u}_i$ 、 $l$ 、 $\mathbf{v}_i$  分别为主动臂和从动臂的名义杆长和单位向量;  $c_{ij}(d_{ij})(j = 1, 2)$  为  $E_i(A_i)$  到相邻球铰中心的距离, 名义值为

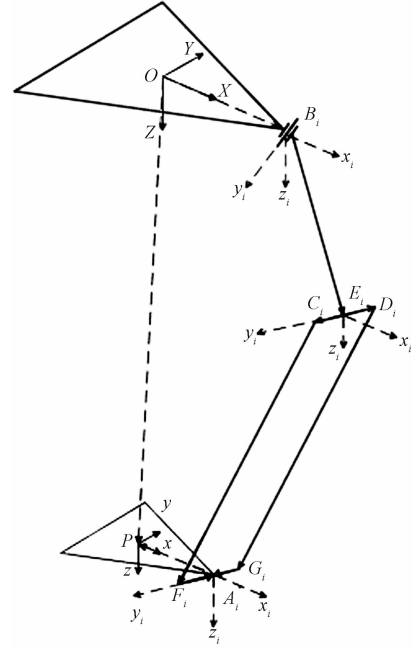


图2 Delta机器人支链坐标系

Fig. 2 Coordinate of Delta robot

$e$ , 负号表示与  $y_i$  轴正方向相反;  $\mathbf{R}$  表示坐标系间变换矩阵。

分析机构误差来源<sup>[8]</sup>包括: 支链  $x_i$  中点  $B_i$  在  $\{O\}$  系下位置矢量误差  $\Delta \overrightarrow{OB_i}$  以及  $A_i$  在系  $\{P\}$  下位置矢量误差  $\Delta \overrightarrow{A_i P}$ ; 主动臂单位矢量误差  $\Delta \mathbf{u}_i$  以及长度误差  $\Delta L_i$ ; 从动臂单位矢量误差  $\Delta \mathbf{v}_{ij}$  以及两条从动杆长度误差  $\Delta l_{ij}(j = 1, 2)$ ;  $E_i(A_i)$  到相邻球铰中心的距离误差  $\Delta c_i$  和  $\Delta d_i$ ; 系  $\{P\}$  到系  $\{O\}$  的姿态误差矢量为  $\boldsymbol{\theta}$ 。

对式(5)作线性摄动得到:

$$\Delta \overrightarrow{OP} = \Delta \overrightarrow{OB_i} + \mathbf{R}_i \{ \boldsymbol{\theta}_{B_i} [L_i \mathbf{u}_i + (-1)^j \mathbf{e}_n] + \Delta L_i \mathbf{u}_i + \boldsymbol{\theta}_{C_i} [(-1)^j \mathbf{e}_n] + (-1)^j \Delta c_i \mathbf{n} \times (\Delta l_{ij} \mathbf{v}_i + l \Delta \mathbf{v}_{ij}) - \boldsymbol{\theta}_{R_i} (\overrightarrow{A_i P}) - \mathbf{R}_i (\Delta \overrightarrow{A_i P}) - \mathbf{R}_i \{ [(-1)^j \Delta d_i \mathbf{n}] + \boldsymbol{\theta}_{A_i} [(-1)^j \mathbf{e}_n] \} \} \quad (6)$$

式(6)中,  $\mathbf{R}_i$  为  $\{B_i\}$  系相对  $\{O\}$  系的姿态矩阵;  $\boldsymbol{\theta}_{B_i}$ 、 $\boldsymbol{\theta}_{C_i}$ 、 $\boldsymbol{\theta}_{A_i}$  分别为  $\{B_i\}$  系相对  $\{O\}$  系、 $\{E_i\}$  系相对  $\{B_i\}$  系、 $\{A_i\}$  系相对  $\{P\}$  系的姿态误差矢量。

记:  $\Delta \mathbf{e}_i = \Delta \overrightarrow{OB_i} - \Delta \overrightarrow{A_i P}$ ;  $\boldsymbol{\psi}_i = \boldsymbol{\theta}_{B_i} + \boldsymbol{\theta}_{C_i} - \boldsymbol{\theta}_{A_i}$ ;  $\Delta g_i = 2(\Delta c_i - \Delta d_i)$ ;  $\Delta l_{di} = \Delta l_{i2} - \Delta l_{i1}$ ;  $\Delta l_{ai} = (\Delta l_{i2} + \Delta l_{i1})/2$ 。得到机器人姿态误差模型:

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}_\theta \boldsymbol{\varepsilon}_\theta \quad (7)$$

式(7)中:  $\mathbf{J}_\theta = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$ ;  $\mathbf{A} = 2\mathbf{e}[\mathbf{R}_1 n \mathbf{v}_1 \ \mathbf{R}_2 n \mathbf{v}_2 \ \mathbf{R}_3 n \mathbf{v}_3]^T$ ;  $\mathbf{B} = \text{diag}[\mathbf{B}_i]$ ;  $\mathbf{B}_i = [1 \ \mathbf{v}_i^T \mathbf{R}_i \mathbf{n} \ 2\mathbf{e}(\mathbf{R}_i n \mathbf{v}_i)^T \mathbf{R}_i]^T$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon}_\theta = [\boldsymbol{\varepsilon}_{\theta 1}^T \ \boldsymbol{\varepsilon}_{\theta 2}^T \ \boldsymbol{\varepsilon}_{\theta 3}^T]^T$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon}_{\theta i} = [\Delta l_{di} \ \Delta g_i \ \boldsymbol{\psi}_i^T]^T$ 。

机器人位置误差模型:

$$\Delta \vec{OP} = J_r \varepsilon = [J_{rr} \quad J_{r\theta}] \begin{bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中:  $J_{rr} = C^{-1}D$ ;  $J_{r\theta} = C^{-1}EJ_{\theta}$ ;  $C = [v_1 \quad v_2 \quad v_3]^T$ ;  $D = \text{diag}[D_i]$ ;  $D_i = [1 \quad v_i^T R_i u_i \quad v_i^T R_i \quad L(R_i u_i \times v_i)^T R_i]$ ;  $E = -[R_1 \vec{A_i P} \times v_1 \quad R_2 \vec{A_i P} \times v_2 \quad R_3 \vec{A_i P} \times v_3]^T$ ;  $\varepsilon_{rr} = [\varepsilon_{r1} \quad \varepsilon_{r2} \quad \varepsilon_{r3}]^T$ ;  $\varepsilon_{\theta} = [\Delta L_i \quad \Delta L_i \quad \Delta e_i^T \quad \theta_{B_i}^T]^T$ 。

影响 Delta 机器人末端位姿精度的误差源最终可归纳为 36 项几何参数,其中可通过运动学补偿的参数 24 项,进而提高机器人位置精度;剩余 12 项参数影响机器人姿态精度,可通过提高制造装配精度来减小,属于不可控误差。

### 3 粒子群优化算法误差补偿

粒子群优化算法(PSO)算法作为群智能算法中应用较广泛的一种算法,是一种基于迭代的优化算法,具有如下优点:第一,算法简单,易于工程实现和操作;第二,收敛速度快,且可有效避免陷入局部最优;第三,算法参数少,且如何选择参数的理论较多。

在标准 PSO 算法基础之上进行改进,引进基于熵的粒子多样性评价机制<sup>[4]</sup>,提出基于多样性反馈的自适应粒子群优化算法(APSO),以改善算法收敛速度,同时防止陷入局部最优解。

并联机器人 3 个驱动杆对应 PSO 算法中三维搜索空间。种群  $X$  由  $m$  个粒子组成,其中,粒子  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$  表示第  $i$  个粒子位置,是问题的一组潜在解。粒子特性由位置、速度和适应度三项指标表征,适应度函数确定粒子适应度值,本文中取采样点误差值:

$$f = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} \quad (9)$$

#### 3.1 标准粒子群优化算法

标准 PSO 算法为

$$\begin{cases} v_{ij}^{k+1} = \omega v_{ij}^k + c_1 r_1 (p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 r_2 (p_{gj}^k - x_{ij}^k) \\ x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, 3$ ;  $\omega$  为粒子的惯性权重,  $k$  为当前迭代步数,粒子  $i$  的位置和速度分别表示为  $x_{ij}$  和  $v_{ij}$ ,并由粒子的位置极值  $x_{\max}$  和速度极值  $v_{\max}$  限制,即  $|x_{ij}| \leq x_{\max}$ ,  $|v_{ij}| \leq v_{\max}$ ,  $p_{ij}$  和  $p_{gj}$  分别为粒子  $i$  的个体历史最优位置和种群的历史最优位置;  $c_1$  和  $c_2$  满足  $c_1 \geq 0$ ,  $c_2 \geq 0$ ,表示加速度因子;  $r_1$  和  $r_2$  为分布于  $[0, 1]$  区间的随机数。

#### 3.2 改进粒子群优化算法

为提高算法收敛速度,弥补标准 PSO 算法易陷入局部最优的缺陷,引进基于熵的粒子多样性评价机制<sup>[9]</sup>,提出基于多样性反馈的自适应粒子群优化算法(APSO),具体描述如下。

(1)设置 PSO 初始参数,在三维搜索空间内,  $m$  个粒子集合为

$$X = \{x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m\} \quad (11)$$

设粒子群在群体分布空间内对角线最长距离为  $d(x_i, x_j) = L$ ,粒子  $x_i$  和  $x_j$  连线的方向矢量为  $w$ 。

(2)计算除  $x_i$  和  $x_j$  外每个粒子在方向为  $w$  的直线上的投影,得到由  $m$  个一维样本组成的集合  $y_m$ ,规则如下:

$$y_i = w^T x_i; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

(3)将  $x_i$  和  $x_j$  的连线等距离划分为  $m$  个子区域,统计每个子区域内样本  $y_i$  的数目  $h_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,且  $\sum_{i=1}^m h_i = m$ 。

(4)按式(13)计算种群分布熵:

$$E(t) = - \sum_{i=1}^m q_i \ln q_i; \quad q_i = h_i / m \quad (13)$$

(5)依种群熵提供的信息调整惯性权值  $\omega$ ,具体方式为

$$\omega[E(t)] = \frac{1}{1 + 1.5e^{-2.6E(t)}}; \quad E(t) \in [0, 1] \quad (14)$$

可见,通过粒子多样性评价机制的引入,  $\omega$  由随时间做单调变化改为随  $E$  单调变化。因此将  $\omega$  的变化与搜索过程表现出的粒子群多样性相关联以同时兼顾搜索的广度与深度。显然,种群多样性丰富时  $E$  有较大值,  $\omega$  随之增大使得算法的全局勘探能力增强;而种群多样性减小时  $E$  较小,对应减小的  $\omega$  使算法局部开发能力得到强化,从而具有较好的开发性。APSO 算法的优化过程如图 3 所示。

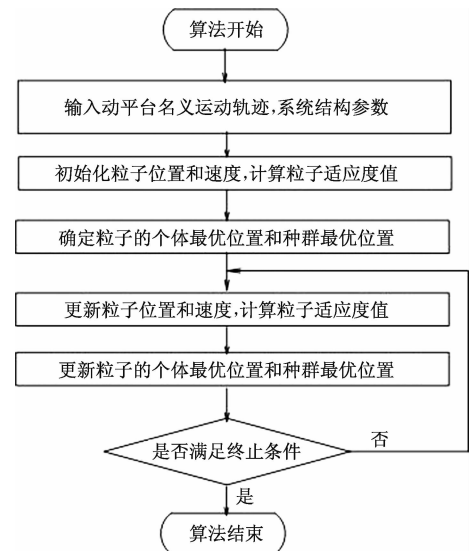


图3 APSO 流程图

Fig.3 Flow chart of APSO

4 实验与仿真

为验证上述方法的有效性,以 SRBD 型 Delta 机器人进行实验。图 4 为 SRBD 型 Delta 机器人整体设计图,机构设计尺寸如表 1。



图 4 SRBD 型 Delta 机器人  
Fig. 4 SRBD Delta robot

表 1 机器人参数  
Table 1 Robot parameter

| 参数 | $R/\text{mm}$ | $r/\text{mm}$ | $l_1/\text{mm}$ | $l_2/\text{mm}$ |
|----|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 尺寸 | 200           | 55            | 320             | 850             |

4.1 样机测试与分析

测试样机装配完成未标定前精度指标。依据《工业机器人标准测试大纲》中的测试方案与评判标准<sup>[10]</sup>对该型号并联机器人位置准确度及重复性、距离准确度及重复性、轨迹精度进行测试。测试项目如表 2。

表 2 机器人测试项目  
Table 2 Robot test item

| 序号 | 测试项目      | 循环次数 |
|----|-----------|------|
| 1  | 位置准确度及重复性 | 25   |
| 2  | 距离准确度及重复性 | 30   |
| 3  | 直线轨迹精度    | 3    |
| 4  | 圆弧轨迹精度    | 3    |

使用激光跟踪仪完成数据测试,最终结论如下。

- (1)位置准确度及重复性基本不随速度变化,最大误差分别为 0.862 mm 和 0.021 mm。
- (2)距离准确度及重复性几乎不随速度变化,最大误差分别为 0.695 8 mm 和 0.019 5 mm。
- (3)轨迹准确度及轨迹直线度和圆弧度随着速度的提高误差增大。

测试中机器人直线测试轨迹方程为

$$\begin{cases} x = -y \\ z = -711 \end{cases}; \quad x, y \in (-450, 450) \quad (15)$$

取机器人运行在 50% 最大速度时实验数据做统计分析结果如表 3,误差分布如图 5。

表 3 机器人测试统计结果

Table 3 Robot test statistics result

| 最大误差/mm | 平均误差/mm | 3std/mm | 1 + 3std/mm |
|---------|---------|---------|-------------|
| 3.305   | 0.803   | 2.086   | 3.338       |

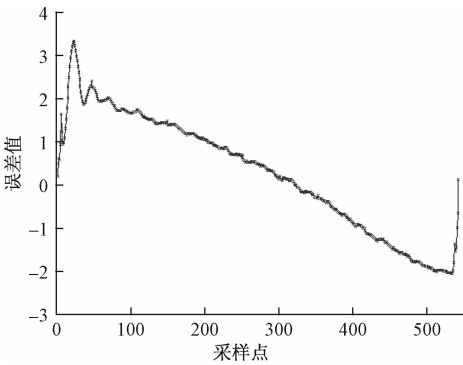


图 5 未补偿时误差分布

Fig. 5 Error distribution without compensation

方跃法等<sup>[11]</sup>提出误差敏感系数的指标,指出并联机器人操作精度在其工作空间并非均匀分布,位置点离中心轴距离越远则误差越大。由图 5 可得,在半径 900 mm 的工作平面内机器人精度随离中心轴距离增大而增大。故机器人采用传统的误差标定再补偿的方法并不能保证机器人在整个工作空间内都具有良好性能。

4.2 仿真实验

根据前文提出的方法编写改进粒子群优化算法 MATLAB 仿真程序,分析该方法对提高机器人精度的有效性,仿真结果如图 6。

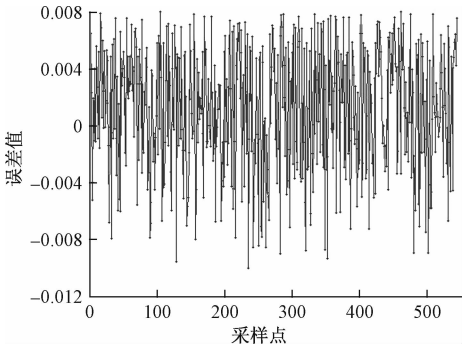


图 6 补偿后误差分布

Fig. 6 Error distribution after compensation

由图 6 可见,经优化后直线轨迹误差精度提高了 3 个数量级达到微米级,补偿仿真效果理想,并且误差在工作平面内分布较均匀,可有效提高机器人整体的性能,同时减少机器人工作过程中抖动等情况的出现。

5 结论

- (1)针对 Delta 并联机器人结构复杂,装配完成

后机构参数测量标定难度大的问题,利用 Delta 并联机器人机构空间矢量关系建立正逆解运动学模型以及误差映射模型,并在标准粒子群优化算法基础上引入基于多样性反馈机制以兼顾算法搜索广度与深度,通过对机器人驱动关节角度寻优实现运动学误差补偿,改善了机器人精度。

(2)针对 Delta 并联机器人工程应用中的精度需求以及标定补偿难得问题,将 Delta 机器人建模理论与粒子群优化算法的优点相结合,有效地改善了机器人精度,实测机器人误差为毫米级,补偿后机器人精度达到微米级,误差精度提高三个数量级。

(3)通过 SRBD 型 Delta 机器人验证了该方法的有效性,为 Delta 机器人在自动化生产中的运动规划与控制等工程应用提供了理论指导,对于其他并联机构的应用实践也具有参考意义。

### 参 考 文 献

- 1 黄 真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京:机械工业出版社,1991:36—38  
Huang Zhen, Kong Lingfu, Fang Yuefa. Theory and control of parallel robot mechanism. Beijing: China Machine Press, 1991: 36—38
- 2 黄 真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学. 北京:高等教育出版社,2006:151—156  
Huang Zhen, Zhao Yongsheng, Zhao Tieshi. Higher space mechanism. Beijing: Higher Education Press, 2006: 151—156
- 3 Der-Ming K. Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism. Mechanism and Machine Theory, 1991; 34(3): 453—465
- 4 郭 阳,房立金,董 滨,等. 新型4自由度并联机器人位姿误差分析. 机械科学与技术, 2001; 29(6): 869—871  
Guo yang, Fang Lijin, Dong Bin, *et al.* Position and pose error analysis of a new type of parallel robot with 4 degrees of freedom. Mechanical Science and Technology, 2001; 29(6): 869—871
- 5 王 波,张大鹏,李小满. 三自由度平面机器人误差分析. 江苏科技大学学报, 2009; 23(2): 138—141  
Wang Bo, Zhang Dapeng, Li Xiaoman. Error analysis of planar robot with three degrees of freedom. Journal of Jiang su Science and Technology University, 2009; 23(2): 138—141
- 6 阮远强,李开明. 6-THRT 并联机器人的误差模型研究. 机械制造与自动化, 2014; 43(4): 135—139  
Ruan Yuanqiang, Li Kaiming. Error model research on 6-THRT parallel manipulator. Machine Building and Automation, 2009; 23(2): 138—141
- 7 张文昌,梅江平,刘 艺,等. 基于激光跟踪仪的 Delta 并联机构运动学误差标定. 天津大学学报, 2013; 46(3): 257—262  
Zhang Wenchang, Mei Jiangping, Liu Yi, *et al.* Calibration of delta parallel robot kinematic errors based on laser tracker. Journal of Tianjin University, 2013; 46(3): 257—262
- 8 唐国宝,黄 田. Delta 并联机构精度标定方法研究. 机械工程学报, 2003; 39(8): 55—60  
Tang Guobao, Huang Tian. Research on precision calibration method of delta parallel mechanism. Journal of Mechanical Engineering, 2003; 39(8): 55—60
- 9 汤可宗,杨静宇. 群智能优化方法及应用. 北京:科学出版社, 2015: 86—89  
Tang Kezong, Yang Jingyu. Swarm intelligence optimization method and its application. Beijing: Science Publishing Company, 2015: 86—89
- 10 工业机器人标准测试大纲. GB/T 12645—2001; 北京:中国标准出版社,2001  
Standard test outline of industrial robot. GB/T 12645—2001; Beijing: Standards Press of China, 2001
- 11 方跃法,房海蓉,牟建斌. 并联机器人误差敏感系数及其在工作空间内的分布. 北方交通大学学报, 2000; 24(4): 38—42  
Fang Yuefa, Fang Hairong, Mu Jianbin. Error sensitive index of parallel robots and its distribution in workspace. Journal of Northern Jiaotong University, 2000; 24(4): 38—42

## Delta Parallel Robot Assembly Error Analysis and Calibration

PAN Hua<sup>1,2,3</sup>, QIU Ji-hong<sup>1,3</sup>, LIU Lin<sup>3</sup>

(State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences<sup>1</sup>,  
Shenyang 110016, P. R. China; University of Chinese Academy of Sciences<sup>2</sup>, Beijing 100049, P. R. China;  
Shenyang SIASUN Robot & Automation Co. LTD<sup>3</sup>, Shenyang 110168, P. R. China)

**[Abstract]** For the accuracy requirement of the motion planning and control in the industrial application of parallel robot, an particle swarm optimization algorithm based was proposed on adaptive diversity feedback (APSO) to improve the accuracy of parallel robots. Use the closed loop vector to calculate the robot's kinematics solution, and the application of APSO turn the structure parameters optimization problem into an optimization problem of nonlinear system, by calibrate the robot drive motor rotation, the machine get an ideal accuracy in the working space. Test on SRBD Delta parallel robot, and the simulation results can reach the level of  $10^{-3}$  mm, the validity of the method is verified.

**[Key words]** parallel robot assembly error particle swarm optimization algorithm error calibration