

Delta 并联机构正向运动学标定方法研究*

韩江义¹ 游有鹏² 虞启凯²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 为提高 Delta 操纵机构位置测量精度, 提出了一种离线参数辨识标定方法。根据机构结构和运动学模型, 对影响操作端精度的各项误差源进行分析, 建立了含误差参数的正向运动学模型; 通过分析各项误差源对操作端位置误差的影响, 发现 12 项装配误差对操作端的位置影响较大, 提出对运动学模型中的装配误差进行参数辨析, 以此修正正向运动学模型; 试验结果表明, 标定后的 Delta 机构提高了位置重复测量精度。

关键词: Delta 机构 位置测量 正向运动学标定

中图分类号: TP241.3; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0253-05

Forward Kinematic Calibration of Delta Parallel Mechanism

Han Jiangyi¹ You Youpeng² Yu Qikai²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A calibration method was presented by off-line parameters identification in order to enhance the position measuring accuracy of the Delta mechanism. Based on structure and kinematic model of mechanism, the error sources influenced accuracy of operation end were analyzed. A forward kinematic model contained errors sources was built. By analyzing the effect of error sources on position error of operation end, twelve assembling errors that made more effect on position of operation end were presented and solved, and the forward kinematic model was calibrated. The experiment results showed that the calibrated Delta mechanism improved the measurement accuracy of position.

Key words: Delta mechanism Position measurement Forward kinematic calibration

引言

并联机构装备的运动学标定是在制造和装配的基础上, 通过机构末端实测信息与理想输出之间的误差泛函, 辨识运动学模型的参数, 以此提高机构末端输出的精度^[1-3]。目前, 由于并联机构作为执行机构应用较多, 因此并联机构的标定研究主要集中在逆向运动学标定方面。当并联机构作为操控机构时, 需要根据正向运动学解测得机构操作端的位置, 例如在机械臂遥控作业中, 操作者操作并联机构操作端来控制远程机械臂, 并联机构通过正向运动学解测量并联机构的操作端位置, 以此

作为遥控系统控制远端机械臂的依据^[4-7]; 若对该并联机构进行正向运动学标定, 可提高机构操作端位置测量精度, 从而改善遥控操作中的控制性能。因此, 对并联机构的正向运动学标定研究显得格外重要。

本文以 Delta 并联机构为例研究正向运动学标定方法, 包括确定含标定参数的模型、测量操作端位置、参数辨识^[8]等, 以此修正正向运动学模型, 提高操作端位置的测量精度。

1 Delta 机构及正向运动学模型

Delta 机构^[4]如图 1 所示, 三支链与运动平台、

收稿日期: 2012-05-13 修回日期: 2012-08-28

* 国家自然科学基金资助项目(50975144)和江苏大学高级人才基金资助项目(11JDC044)

作者简介: 韩江义, 讲师, 博士, 主要从事机械电子工程和机构学研究, E-mail: hjy0306@163.com

通讯作者: 游有鹏, 教授, 博士生导师, 主要从事机械电子工程和微机电系统研究, E-mail: youy@163.com

固定平台之间通过转动副联接,联接位置均布;支链中上臂为平行四边形机构,各杆件均通过转动副联接,将运动平台的中心作为操作端的测量位置。Delta 机构作为操控机构使用时,操作端位置是测量参数,根据各支链下臂的角位移(图 1 所示的角位移传感器测得),由正向运动学模型计算出操作端坐标。

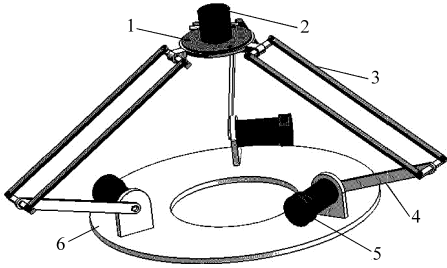


图 1 Delta 机构模型

Fig.1 Model of Delta mechanism

- 1. 运动平台 2. 操作端 3. 上臂 4. 下臂 5. 角位移传感器
- 6. 固定平台

图 2 是 Delta 机构的第 i 个支链简图。以固定平台中心为原点,建立 $OXYZ$ 体坐标系, P 点是运动平台中心,也是操作端测量位置。其中, OA_i 是第 i 支链下臂与固定平台铰接点在 $OXYZ$ 的矢量,相应地, A_iB_i 、 B_iE_i 、 E_iD_i 、 H_iG_i 、 G_iC_i 、 D_iC_i 及 P_iC_i 为第 i 个支链各杆件在 $OXYZ$ 中的矢量,可得 i 支链矢量闭环方程为

$$OA_i + A_iB_i + B_iE_i = OE_i \quad (1)$$

$$OP_i + P_iC_i + C_iD_i = OD_i \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得

$$|OD_i - OE_i| = |D_iE_i| \quad (3)$$

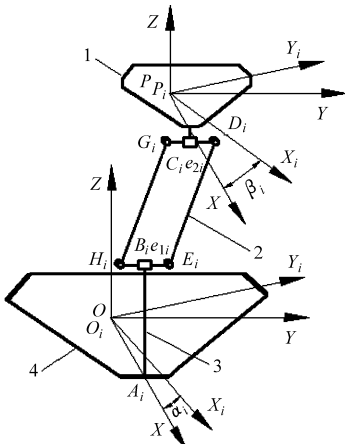


图 2 第 i 个支链简图

Fig.2 Scheme of i th chain

- 1. 运动平台 2. 上臂 3. 下臂 4. 固定平台

由机构正向运动学可知,给定下臂的输入角 θ_i ,根据式(3)列出 $i=1,2,3$ 时的方程,可得到 P 点在体坐标系的理论位置解^[9]。

2 含误差项的运动学模型

式(3)中,由于 Delta 机构各项误差源没有被考虑,因此通过式(3)得到操作端位置必然与实际位置产生误差。Delta 机构标定研究,从文献[8~13]的分析看出,影响机构末端位置精度有动态误差(重力导致的变形量和温度导致的运动副间隙)和静态误差(尺寸加工误差和装配定位误差),但标定主要针对静态误差参数的辨识。因此,分析对机构操作端位置精度有影响的各项静态误差,建立含误差参数的正向运动学模型是标定的基础。

2.1 运动模型参数的静态误差源

机构运动学模型中的静态误差主要为零部件的加工误差和装配误差,设图 3 所示 OA_i 、 A_iB_i 、 E_iD_i 、 PC_i 的几何尺寸分别为 r_o 、 l 、 m 、 r_p ,其加工误差分别为 r_{oi} 、 l_i 、 m_i 、 r_{pi} ;装配误差为:下臂铰接处 A_i 在固定平台的均布安装角为 α ($\alpha = 120^\circ$),上臂铰接处 C_i 在运动平台的均布定位角为 β ($\beta = 120^\circ$),对应装配误差为 α_i 和 β_i ; B_i 、 C_i 在杆件 G_iD_i 、 H_iE_i 上的定位尺寸为 e_1 和 e_2 ,对应装配误差为 e_{1i} 和 e_{2i} 。因此,Delta 机构中共有 24 项静态误差源。

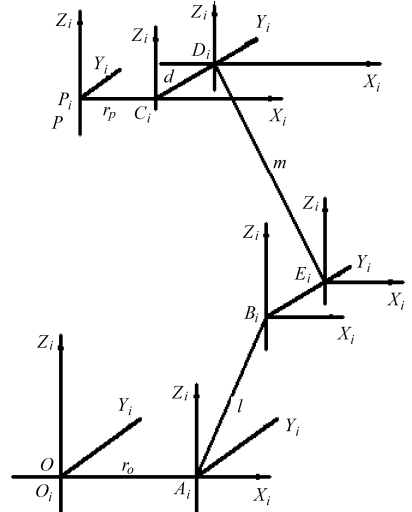


图 3 某一支链机构的坐标系示意图

Fig.3 Coordinate frame diagram of one chain mechanism

2.2 含误差项的运动学模型

以 Delta 机构第 i 个支链为研究对象,建立含各项误差源的运动学模型。如图 3 所示, O 为固定平台的中心,设 O_i 点与 O 点重合,以 O_i 为原点建立动坐标系 O_iXYZ , O_iX 轴通过支链的 A_i 点,以 A_i 、 B_i 为原点分别建立动坐标系 A_iXYZ 和 B_iXYZ ,其中, B_i 点是下臂与杆 E_iH_i 的铰接点。

根据 D-H 法^[14],机构某点矢量在相邻坐标系之间转换可由相邻坐标系的 Z 轴夹角 (ϕ)、 Z 轴距离 (v)、 X 轴夹角 (ψ) 和 X 轴距离 (w) 确定,如表 1

所示。

表 1 相邻坐标系的转换参数

Tab. 1 Transformation parameters of adjacent coordinate systems

参数	坐标系		
	$OXYZ$ 与 O_iXYZ	O_iXYZ 与 A_iXYZ	A_iXYZ 与 B_iXYZ
ϕ	0	0	0
v	0	$r_o + r_{oi}$	$(l + l_i) \cos \theta_i$
ψ	$120(i-1) + \alpha_i$	0	0
w	0	0	$(l + l_i) \sin \theta_i$

通过表 1 的参数,可获得点矢量在相邻坐标系之间的坐标转换矩阵 $R_o^{O_i}$ 、 $R_{O_i}^{A_i}$ 和 $R_{A_i}^{B_i}$ 分别为

$$R_o^{O_i} = \begin{bmatrix} \cos(120(i-1) + \alpha_i) & -\sin(120(i-1) + \alpha_i) & 0 & 0 \\ \sin(120(i-1) + \alpha_i) & \cos(120(i-1) + \alpha_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{O_i}^{A_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_o + \Delta r_{oi} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_{A_i}^{B_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (l + l_i) \cos \theta_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (l + l_i) \sin \theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

显然,在 $OXYZ$ 坐标系中

$$OE_i = R_o^{O_i} \cdot R_{O_i}^{A_i} \cdot R_{A_i}^{B_i} \cdot E_i^{B_i} \quad (4)$$

其中, $E_i^{B_i}$ 为 E_i 点在 B_iXYZ 坐标系的点矢量, E_i 点是上臂 D_iE_i 与横杆 C_iE_i 的铰接点。

同理,图 3 中,设 P 点在 $OXYZ$ 坐标系的点矢量为 $[x_p \ y_p \ z_p \ 1]^T$,以 P 点为原点建立动坐标系 $PXYZ$, P_i 点与 P 点重合,以 P_i 、 C_i 为原点建立坐标系, C_i 是运动平台与杆 G_iD_i 的铰接点;根据 D-H 法^[9],机构某点矢量在相邻坐标系之间转换由表 2 参数确定。

表 2 相邻坐标系的位置参数

Tab. 2 Position parameters of adjacent coordinate systems

参数	坐标系	
	$PXYZ$ 与 P_iXYZ	P_iXYZ 与 C_iXYZ
ϕ	0	0
v	0	$r_p + r_{pi}$
ψ	$120(i-1) + \beta_i$	0
w	0	0

通过表 2 获得相邻坐标系之间点坐标的转换矩阵 $R_p^{P_i}$ 和 $R_{P_i}^{C_i}$ 为

$$R_p^{P_i} = \begin{bmatrix} \cos(120(i-1) + \beta_i) & -\sin(120(i-1) + \beta_i) & 0 & 0 \\ \sin(120(i-1) + \beta_i) & \cos(120(i-1) + \beta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{P_i}^{C_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_p + r_{pi} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

此外, $PXYZ$ 到 $OXYZ$ 的坐标转换矩阵为

$$R_o^P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 & y_p \\ 0 & 0 & 1 & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

显然,在 $OXYZ$ 坐标系中

$$OD_i = R_o^P \cdot R_p^{P_i} \cdot R_{P_i}^{C_i} \cdot D_i^{C_i} \quad (5)$$

其中, $D_i^{C_i}$ 为 D_i 点在 C_iXYZ 坐标系的点矢量。

根据式(4)和式(5)可得

$$|OD_i - OE_i| = |D_iE_i| \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

式(6)为含有误差项的机构正向运动学模型,若各误差项可知,式(6)为修正后的机构正向运动学模型。

3 机构各误差项对操作端误差的影响分析

分析机构各项误差对操作端误差的影响程度,一方面可针对影响较大的误差项进行解算,以便减小误差参数解算难度;另一方面可为机构零部件加工装配时精度设定提供依据。采取仿真进行分析:首先,将同等级精度下的尺寸加工公差量和装配公差量作为各项误差量;其次,给定机构操作端工作空间范围内各支链下臂位置角 θ_i ,每给定一组 θ_i ($i=1,2,3$),将其代入式(3)获得对应操作端 P 点的理想坐标,再将该组 θ_i 代入含误差项的式(6)中,获得对应的操作端 P 点坐标,将前后获得的 P 点位置的距离作为操作端误差量^[15];最后,对各项误差对操作端位置误差的影响程度进行比较分析。

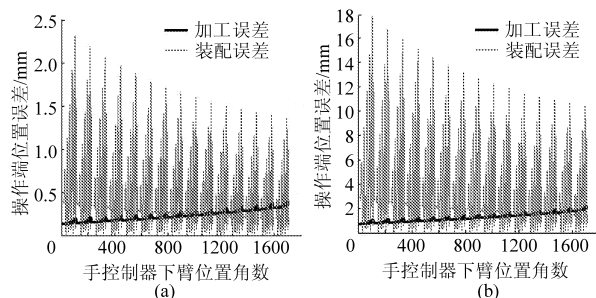


图 4 加工误差和装配误差的影响

Fig. 4 Effect of machining error and assembling error

分析发现机构装配误差对操作端误差的影响程度远大于加工误差对操作端误差的影响。如图 4 所示,纵坐标表示操作端 P 点位置误差,横坐标表示手控制器下臂位置角 θ_i 数,考虑到操作端工作空间的整体性, θ_i 在工作范围内均匀取值。图 4a 是在 IT8

级精度下的尺寸公差量和装配的公差量对操作端 P 点位置误差的影响;图 4b 是在 IT12 级精度下的尺寸公差量和装配公差量对操作端 P 点位置误差的影响。从图中可看出,装配误差带来的误差影响远大于尺寸误差的误差影响。因此,考虑到装配误差的影响程度大和减小式(6)中误差项的解算难度,

$$\begin{cases} r_p \cos(120(i-1) + \beta_i) - (e + e_{2i}) \sin(120(i-1) + \beta_i) + x_p \\ - (l \cos \theta_i + r_o) \cos(120(i-1) + a_i) + (e + e_{2i}) \sin(120(i-1) + a_i) \\ r_p \sin(120(i-1) + \beta_i) + (e + e_{1i}) \cos(120(i-1) + \beta_i) + y_p \\ - (l \cos \theta_i + r_o) \sin(120(i-1) + a_i) - (e + e_{1i}) \cos(120(i-1) + a_i) \\ z_p - l \sin \theta_i \end{cases} = m \quad (7)$$

式(7)中 m 为杆 $D_i E_i$ 的长度,当已知机构操作端位置 (x_p, y_p, z_p) 和机构下臂位置角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 时,式(7)就为以误差项 $\alpha_i, \beta_i, e_{1i}, e_{2i}$ ($i = 1, 2, 3$) 为未知量的方程组,可望通过求解方程组完成误差项解算。具体做法:给定多个 Delta 机构操作端 P 点位置 (x_p, y_p, z_p) ,同时测量手控器下臂位置角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$,将其分别代入式(7),对各误差项的求解。

实施和测量方案如图 5a 所示。将 Delta 机构固定平台固定在三坐标数控系统工作台上(CK1430, 重复定位精度 0.001 mm),机构的操作端与数控主轴刚性联接,通过调节数控主轴的位置,使得机构下臂位置角为 0° ,此时操作端的 P 点位置为数控三坐标的参考原点;接着,操纵数控主轴带动操作端移动,使 P 点到达预定的给定点,如图 5b 所示,该数控系统显示的给定点的坐标为操作端 P 点的标准坐标;同时,利用角度传感器测得下臂位置角 θ_i ,结果如表 3 所示。

据 P 点的标准坐标和 θ_i 参数,利用 Matlab 工具箱的遗传算法对式(7)中各误差项求解。算法中的适应度函数为

$$f = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |P^j - P_1^j| \quad (8)$$

式中 n ——给定点的个数

P^j ——操作端 P 点第 j 个标准位置

P_1^j ——根据 θ_i 和正向运动模型式(7)计算出的操作端 P 点第 j 个位置

因此,适应度函数 f 表示操作端 P 点的标准位置与计算位置的平均距离;求解 $f \rightarrow \min$ 时式(7)中各误差项 $\alpha_i, \beta_i, e_{1i}, e_{2i}$ 的数值,以此作为式(7)中各误差项的近似解,结果如表 4 所示,将各误差项近似解代入式(7),修正正向运动学模型。

将 12 项装配误差项设为解算目标,即 $\alpha_i, \beta_i, e_{1i}, e_{2i}$ ($i = 1, 2, 3$)。

4 误差项解算

将需解算的装配误差项 $\alpha_i, \beta_i, e_{1i}, e_{2i}$ ($i = 1, 2, 3$) 代入式(6),得方程组

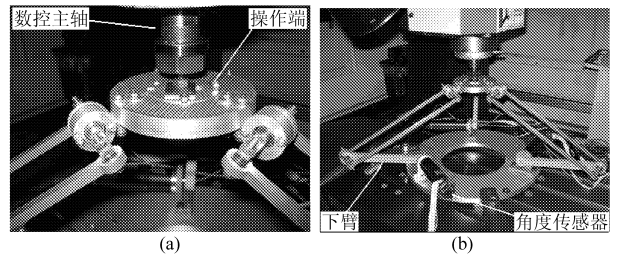


图 5 标定中测量现场

Fig. 5 Measure spot of calibration process

表 3 操作端 P 点标准坐标和下臂位置角

Tab. 3 Standard coordinate of operation end P and angle of lower arm

序号	P 点标准坐标/mm			下臂位置角 $\theta_i / (^\circ)$		
	x_p	y_p	z_p	θ_1	θ_2	θ_3
1	0	0	150	15.408	15.231	15.250
2	25	25	150	6.727	13.295	29.122
3	-25	-25	150	25.915	19.488	2.751
4	0	0	170	18.978	18.822	18.839
5	50	-50	170	5.115	43.844	16.717
6	-50	50	170	39.258	-1.472	29.306
7	0	0	200	24.216	24.083	24.097
8	50	50	200	12.862	23.166	45.529
9	-50	-50	200	41.250	32.392	6.822
10	0	0	220	27.701	27.580	27.593
11	-75	75	220	53.278	5.991	42.819
12	75	-75	220	14.003	57.703	28.168
13	0	0	250	33.014	32.907	32.919
14	100	100	250	20.947	39.326	69.401
15	-100	100	250	65.776	10.193	55.205
16	0	0	300	42.410	42.320	42.330
17	-100	-100	300	70.786	61.687	23.892
18	100	100	300	33.477	49.614	74.408

5 标定结果分析

为检验 Delta 机构标定的效果,在若干测试点

表4 各项误差近似解

Tab.4 Approximate solution of errors

α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{21}	e_{22}	e_{23}
0.003	1.501	-0.876	1.205	1.07	1.5	-0.564	0.813	1.378	1.097	-0.379	-0.907

位置,做标定前后机构对操作端位置测量的对比试验。利用图5所示的试验平台,以数控系统确定的机构操作端位置 P 为标准坐标,在正向运动学模型修正前和修正后条件下,机构分别测量操作端位置坐标为 P_1 、 P_2 ,以两者位置与标准位置的距离表示误差量^[15],即 $|P - P_1|$ 和 $|P - P_2|$,得到机构操作端位置测量的标定效果图,如图6所示。

由图6可看出,经过标定后的Delta机构操作端

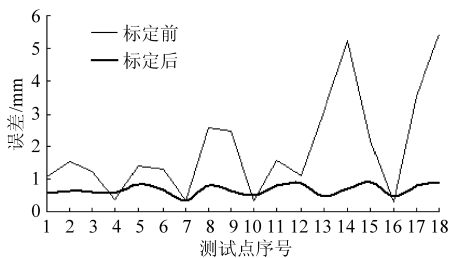


图6 标定效果

Fig.6 Calibration effect

位置测量误差明显减小,尤其是减小了操作端位置的粗大误差量,测试点的最大误差由5.467 mm,降低到0.901 mm,精度提高了近5倍,标定后的机构重复测量精度小于1 mm(最大为0.901 mm),因此,对机构正向运动学标定采用的方法是有效的。

6 结束语

针对Delta作为操纵机构的位置测量标定问题,提出了一种离线参数辨识标定方法,分析了标定中的误差参数,含误差参数运动学的模型,以及机构操作端位置的外部测量方法及误差参数解算。其中,通过分析机构各项静态误差源对操作端误差的影响程度,提出对机构末端误差较大影响的12项装配误差项进行辨析;试验结果表明标定提高了Delta机构对操作端位置的重复测量精度,验证了采用的正向运动学标定方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 Wisama Khalil, S'ebastien Besnard. Self calibration of Stewart-gough parallel robots without extra sensors[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999,15(6):1116~1121.
- 2 郑辉,唐国宝. Delta 并联机械手几何误差建模及灵敏度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(7):252~255.
Zheng Hui, Tang Guobao. Error modeling and sensitivity analysis of Delta robot[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,41(7):252~255. (in Chinese)
- 3 Joubair Ahmed, Slamani Mohamed, Bonev Ilian. Kinematic calibration of a 3-DOF parallel robot[J]. Industrial Robot, 2012, 39(4):392~400.
- 4 邓乐,赵丁选,倪涛. 基于 Stewart 平台的6自由度力反馈手控器[J]. 农业机械学报,2005,36(7):118~121.
Deng Le, Zhao Dingxuan, Ni Tao. Design of a manual controller of 6-DOF force feedback based on Stewart platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7):118~121. (in Chinese)
- 5 Arata Jumpei, Ikedo Norio, Fujimoto Hideo. New multi-DOF haptic device using a parallel mechanism with a wide rotational working area[J]. Advanced Robotics,2012,26(1):121~135.
- 6 虞启凯,游有鹏,韩江义. 3 UrSR 6 自由度并联机构位置分析[J]. 农业机械学报,2011,42(12):215~219.
Yu Qikai, You Youpeng, Han Jiangyi. Position analysis of 3 UrSR parallel mechanism with 6-DOF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):215~219. (in Chinese)
- 7 Yoon Jung Won, Ryu Jeha, Yoon Jung Won. Optimum design of 6-DOF parallel manipulator with translational/rotational workspaces for haptic device application [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010,24(5):1151~1162.
- 8 Peter Vischer, Raymond Clavel. Kinematic calibration of the parallel Delta robot[J]. Robotica, 1998,16(2):207~218.
- 9 Lung-Wen Tsai, Gregory C. Kinematics of a novel three DOF translational platform [C] // Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota, USA,1996:3446~3451.
- 10 Dominique Deblaise, Patrick Maur. Effective geometrical calibration of a Delta parallel robot used in neurosurgery[C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005:1313~1318.
- 11 唐国宝,黄田. Delta 并联机构精度标定方法研究[J]. 机械工程学报,2003,39(8):55~60.
- 12 朱延河,赵杰,蔡鹤皋. Delta 机构的闭环自标定方法研究[J]. 西安交通大学学报,2005,39(2):134~137.
- 13 Gael Ecorchard, Patrick Maurine. Self-calibration of Delta parallel robots with elastic deformation compensation[C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005:462~467.
- 14 谢存禧,郑时雄,林怡青. 空间机构设计[M]. 上海:上海科学技术出版社,1996:62.
- 15 Deblaise D, Baradat C, Maurine P, et al. Improvement of positioning accuracy of delta parallel robot[C] // Proceedings of the ICTAM 2004, Varsovie, Pologne, 2004:15~21.