

关节臂式坐标测量机参数标定方法

王学影 王 华 陆 艺 张培培

(中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 采用对称点法对关节臂式坐标测量机的各参数进行标定。该标定方法把各参数分离,使标定过程更简单。首先,在D-H参数建模法的基础上,利用基于准球坐标系的建模方法,建立了关节臂式坐标测量机的数学模型,使关节间各个参数正交,进而推导了运动学方程。借助设计的固紧装置,在ROMER Infinite 2.0型关节臂式坐标测量机上运用该方法进行了标定实验,得出了坐标测量机的结构参数,验证了参数标定方法的可行性和实验结果的准确性,为进一步提高关节臂式坐标测量机的测量精度奠定了基础。

关键词: 关节臂式坐标测量机; 参数标定; 对称点法

中图分类号: TH721 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0408-05

Parameter Calibration Method of Articulated Arm Coordinate Measuring Machine

Wang Xueying Wang Hua Lu Yi Zhang Peipei

(Institute of Precision Measurement and Control, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The parameters calibration of the articulated arm coordinate measuring machine is the key to ensure the working accuracy of the measuring machine. The disadvantages in the process of the parameters calibration for articulated arm coordinate measuring machine are as follows: complex calibration method and algorithms, poor operability and costly calibration tools production. To solve this problem, the symmetry point method was used to calibrate the parameters of the articulated arm coordinate measuring machine. This calibration method can separate the parameters and make the calibration process more simply. Firstly, the mathematical model of the articulated arm coordinate measuring machine was established based on the quasi spherical coordinate system. The quasi spherical coordinate system was proposed based on the D-H method. This mathematical model can be used to make the parameters orthogonal between the joints. Then, the kinematics equation was deduced. The fixing device was designed according to the requirement of experiment. The experiment was performed on the ROMER Infinite 2.0 articulated arm coordinate measuring machine. The standard ball with a diameter of 15.875 4 mm was used to test the accuracy of the calibration parameters. The experimental results were as follows: $a_5 = 78.312$ mm, $a_7 = 25.962$ mm, $b_3 = 747.489$ mm, $b_5 = 531.880$ mm, $b_7 = 178.383$ mm, $d_7 = 176.484$ mm. Through experiments, the relative error of the standard ball diameter was 0.383 6%. The results of the experiments showed that this symmetry point method was feasibility and the experimental results were accurate. It establishes the foundation for improving the measuring accuracy of the articulated arm coordinate measuring machine.

Key words: articulated arm coordinate measuring machine; parameter calibration; symmetry point method

引言

关节臂式坐标测量机作为一种便携的测量仪器在工业生产中的应用越来越广泛^[1-2]。关节臂式坐标测量机参数的标定,直接影响着测量精度,从而影响到整个工业的生产过程^[3-5]。目前国外对关节臂式坐标测量机在参数标定方面的研究较多且深入。KOVAC 等^[6]设计了一种专用量具结合商业化软件对关节臂式坐标测量机进行标定;FURUTANI 等^[7]利用装有多个标准球的金属板对关节臂式坐标测量机进行标定;SANTOLARIA 等^[8]使用拥有 14 个球的球形量规,建立基于傅里叶多项式的误差模型对关节臂式坐标测量机的参数误差进行了估计辨识;ACERO 等^[9]利用激光跟踪仪进行实验。国内对参数标定这方面的研究相对较少。主要方法有根据高精度正交三坐标测量机提供的标准,运用最小二乘参数辨识法对关节臂式坐标测量机进行标定^[10];使用单点锥窝,运用模拟退火算法实现关节臂式坐标测量机的参数辨识^[11];基于遗传算法对关节臂式坐标测量机的标定^[12]。这些标定方法有些需要自制标准件而成本较高,有些需要使用复杂算法而计算量较大。因此本文采用更简单的对称点标定方法进行标定。

1 关节臂式坐标测量机运动学模型的建立

数学模型的建立是对关节臂式坐标测量机进行参数标定研究的基础^[13-14]。关节臂式坐标测量机的各参数需在一定的参考坐标系中才可以计算,因此需要建立适当的坐标系。

1.1 关节臂式坐标测量机的测量原理

关节臂式坐标测量机是一种多自由度非笛卡尔式坐标测量系统,它根据仿生学的原理,模拟人身体的四肢和躯干的运动而构成^[15-16]。其实物如图 1 所示,图中 1~6 为 6 个关节的位置。



图 1 关节臂式坐标测量机实物图

1.2 关节臂式坐标测量机数学模型的构建

关节臂式坐标测量机的数学模型采用的建模方法是根据 D-H 模型改进以后的准球坐标系建模方法^[17-18]。该方法可以简化关节臂式坐标测量机数学模型中包含的参数,其坐标示意图如图 2 所示。图中 P 为测头中心点, $\theta_1 \sim \theta_6$ 为各关节角度, a_3, a_5, a_7 为关节臂的横向偏置, d_7 为测头端臂长的纵向偏置, b_3, b_5 为关节 3 和 5 的臂长。

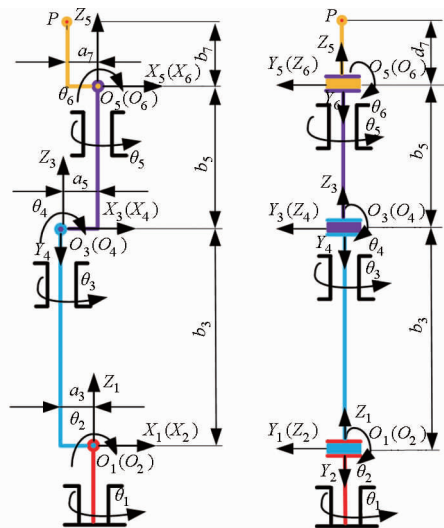


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system

如图 2 所示,在基准位姿中设定所有坐标的 X 轴同向,每个 Z 轴正向均符合由低一级旋转轴指向高一级旋转轴, Y 轴方向遵从右手定则, α_{i-1} 是从 Z_{i-1} 轴转到 Z_i 轴绕 X_{i-1} 轴转过的夹角; a_{i-1} 是从 Z_{i-1} 轴到 Z_i 轴绕 X_{i-1} 轴测量的距离; d_i 是从 X_{i-1} 轴到 X_i 轴沿 Z_{i-1} 轴测量的距离; θ_i 是从 X_{i-1} 轴到 X_i 轴绕 Z_i 轴转过的角度^[19-20]。将连杆 i 对连杆 $i-1$ 相对位置的齐次变换矩阵连乘得到 $A_{i,i+1}$ 矩阵^[21-22]

$$A_{i,i+1} = \text{Rot}(Z_i, \theta_i) \text{Trans}(Z_i, d_{i+1}) \text{Trans}(Y_i, b_{i+1}) \cdot \text{Trans}(X_i, \alpha_{i+1}) \text{Rot}(X_i, \alpha_{i+1}) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i+1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i+1} & a_{i+1} \cos\theta_i - b_{i+1} \sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_{i+1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i+1} & a_{i+1} \sin\theta_i + b_{i+1} \cos\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i+1} & \cos\alpha_{i+1} & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

该矩阵给出了关节臂式坐标测量机各关节角度变量与其末端测头端的位置坐标之间的关系,是研究参数辨识的基础。由式(1)所示的坐标变换矩阵可以得出关节臂式坐标测量机理想的运动学方程模型为

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} = A_{12} A_{23} A_{34} A_{45} A_{56} \begin{bmatrix} x_{67} & y_{67} & z_{67} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 (x_{67}, y_{67}, z_{67}) 是测头点 P 在 $\{O_6 X_6 Y_6 Z_6\}$ 坐标系

下的坐标值表达式,该表达式为

$$\begin{bmatrix} x_{67} \\ y_{67} \\ z_{67} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_7 \cos \theta_6 - b_7 \sin \theta_6 \\ a_7 \sin \theta_6 + b_7 \sin \theta_6 \\ d_7 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 系统参数标定实验原理

利用对称点法的基本思想,设计了一整套关节臂式坐标测量机参数标定的实验。对称点法标定关节臂式坐标测量机参数方法的关键是使系统中的其他参数对标定结果基本上没有影响,即在一次实验中其他参数的标定误差对被标定参数的影响仅为二次误差^[23]。

2.1 测头端的臂长 b_7 和偏置 d_7 、 a_7 的标定

关节臂式坐标测量机测头端参数的标定是后面各参数标定的基础。为了标定关节臂式坐标测量机系统测头端的3个参数 b_7 、 a_7 和 d_7 ,需要确定关节6处 Z_6 的零位位置。在不考虑垂直度误差的前提下,将关节1~4固定在一起,转动关节5,测量测头端中心点 P 在 X_5 方向上的位置变化,绕 Z_6 轴微微转动关节6,直到转动关节5时,测头端中心点 P 在坐标轴 X_5 方向上的位置变化最小,这一位置即为 Z_6 零位位置。在此基础上,固定关节1~5,转动关节6,测头中心点 P 的运动轨迹是一个半圆,测量该运动过程中的多点坐标值,然后利用最小二乘法拟合出该圆的半径 R ,即为测头中心点到 O_6 的距离 b_7 ,如图3所示。

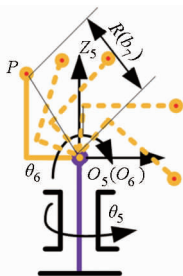


图3 臂长 b_7 的标定

Fig.3 Calibration of arm length b_7

为了标定 d_7 ,需要先将关节臂式坐标测量机的关节1~4固定在一起,在 $\theta_6 = 180^\circ$ 的姿态下,将关节5和6固定在一起。转动关节5使关节5和6绕 Z_5 轴转动 180° ,如图4所示,关节臂转动前后,测头中心点位置 P 的变化记为 l_{PP_1} , PP_1 的距离即为偏置 d_7 的2倍,由此可得

$$d_7 = l_{PP_1} / 2 \quad (4)$$

为了标定 a_7 ,需要先将关节臂式坐标测量机关节1~4固定在一起,在 $\theta_6 = 0^\circ$ 的姿态下,将关节5和6固定在一起。转动关节5使关节5和6绕 Z_5 轴转动 180° ,如图5所示,关节臂转动前后,测头的中

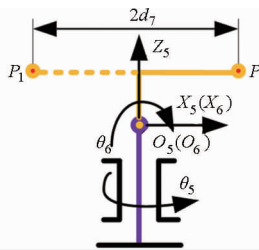


图4 偏置 d_7 的标定

Fig.4 Calibration of bias d_7

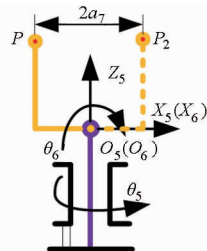


图5 偏置 a_7 的标定

Fig.5 Calibration of bias a_7

心点 P 位置的变化记为 l_{PP_2} , PP_2 的距离即为偏置 a_7 的2倍,由此可得

$$a_7 = l_{PP_2} / 2 \quad (5)$$

2.2 偏置 a_5 的标定

为了标定偏置 a_5 ,需要先确定关节4的零位位置,在不考虑垂直度误差的条件下,关节4的零位处即 $\theta_4 = 0^\circ$, Z_5 坐标轴与 X_3 坐标轴垂直。然后在 $\theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0^\circ$ 状态下,固定关节3~6。转动关节3使关节4~6绕 Z_3 轴旋转 180° ,如图6所示,关节臂转动前后,测头中心点 P 的位置变化记为 l_{PP_3} 得到

$$a_5 = l_{PP_3} / 2 + a_7 \quad (6)$$

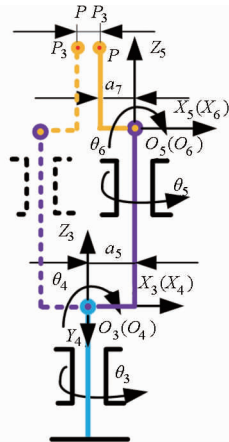


图6 偏置 a_5 的标定

Fig.6 Calibration of bias a_5

2.3 臂长 b_5 和 b_3 的标定

为了测量臂长 b_5 ,需要先确定关节4的零位位置,前面标定偏置 a_5 时已找到了关节4的零位位置,在此基础上,将关节1~3固定,在 $\theta_4 = 90^\circ$, $\theta_6 = 90^\circ$ 的姿态下,将关节4~6固定在一起。转动关节

3 使关节 4~6 绕 Z_3 轴转动 180° , 如图 7 所示, 关节臂转动前后, 测头中心点的位置 P 变化的距离记为 l_{PP_4} , 得到

$$b_5 = l_{PP_4}/2 - a_7 \quad (7)$$

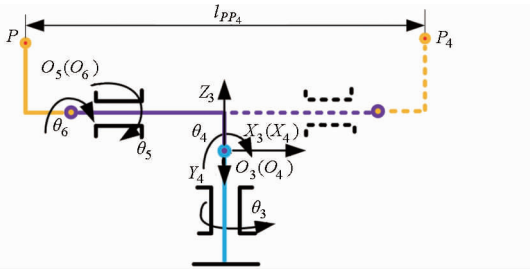


图 7 臂长 b_5 的标定

Fig. 7 Calibration of arm length b_5

为了标定臂长 b_3 , 需要借助关节 2 的零位位置, 在不考虑垂直度误差的前提下, 当 Z_3 坐标轴和 X_1 坐标轴的垂直时, 关节 2 即处在零位姿态。在此基础上, 在 $\theta_2 = 90^\circ$ 的姿态下将关节 1 和 2 固定, 在 $\theta_4 = 90^\circ, \theta_5 = 180^\circ, \theta_6 = 90^\circ$ 的姿态下, 将关节 3~6 固定在一起。转动关节 1 和 2, 使关节 3~6 绕 Z_1 轴转动 180° , 如图 8 所示, 关节臂转动前后, 测头中心点的位置变化为 l_{PP_5} , 由此得到

$$b_3 = l_{PP_5}/2 + d_7 - a_5 \quad (8)$$

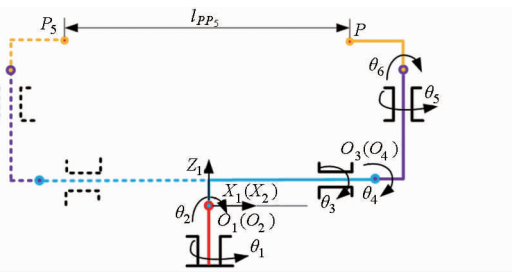


图 8 臂长 b_3 的标定

Fig. 8 Calibration of arm length b_3

3 实验验证

3.1 实验数据

在 ROMER Infinite 2.0 型关节臂式坐标测量机上, 借助 Brown & Sharpe Global Classic 9158 正交式三标测量机进行了标定实验。由于实验原理相似, 此处仅给出了标定偏置 a_7 的实物图, 如图 9 所示。

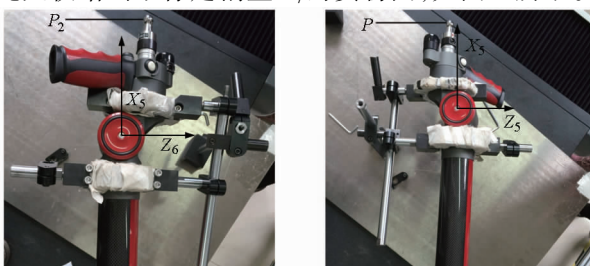


图 9 标定偏置 a_7 实物图

Fig. 9 Calibration bias a_7 physical map

实验中经过多次重复测量得到结果如表 1、2 所示。

表 1 测量数据

Tab. 1 Measured data		mm
参数	数值	
l_{PP_1}	352.968	
l_{PP_2}	51.924	
l_{PP_3}	104.070	
l_{PP_4}	1 115.683	
l_{PP_5}	1 298.633	
R	178.383	

表 2 计算结果

Tab. 2 Calculation result		mm
参数	数值	
a_5	78.312	
a_7	25.962	
b_3	747.489	
b_5	531.880	
b_7	178.383	
d_7	176.484	

3.2 实验准确性评估

为了验证标定实验结果的准确性, 借助实验室直径为 15.875 4 mm 的标准球进行了验证实验。利用关节臂式坐标测量机测量标准球上的点, 在 PCIDIMS 软件中读出测量每一个点时, 关节臂的 6 个关节的关节角度变量 θ , 将读取的角度变量 θ 和通过对称点法标定实验得到的关节臂式坐标测量机的各结构参数代入运动学方程 (2) 中, 求解出点的坐标值, 然后通过最小二乘法利用求得的坐标值拟合出该被测标准球的直径为 15.814 5 mm。测得值和标准值的相对误差记为 δ , 即

$$\delta = \frac{|15.814 5 - 15.875 4|}{15.875 4} \times 100\% = 0.383 6\% \quad (9)$$

通过实验结果得出利用标定得到的结构参数求解的标准球直径的值与标称值的相对误差为 0.383 6%, 存在一定的误差, 该误差可能是由于没有进行温度补偿造成的。

4 结束语

通过建立关节臂式坐标测量机的数学模型, 得出在不考虑垂直度误差下, 各关节的零位位置, 从而得出运动学方程。在此基础上用本文的对称点法对关节臂式坐标测量机的参数进行了标定实验。通过实验得出了待标定参数的准确值。实验结果表明运用该方法可以很好地实现参数标定, 操作简单, 可行性高。

参 考 文 献

- 1 汪平平, 费业泰, 林慎旺. 柔性三坐标测量臂的标定技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3):284-288.
WANG Pingping, FEI Yetai, LIN Shenwang. Research on calibration technology of flexible three coordinate measuring arm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3):284-288. (in Chinese)
- 2 田海波, 马宏伟, 魏娟. 串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):196-201.
TIAN Haibo, MA Hongwei, WEI Juan. Research on working space and structure parameters of serial robot manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):196-201. (in Chinese)
- 3 郑大腾, 肖忠跃, 周燕辉. 提高关节臂式坐标测量机测量精度的关键技术[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(1):20-23.
ZHENG Dateng, XIAO Zhongyue, ZHOU Yanhui. Key techniques to improve the measurement accuracy of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(1):20-23. (in Chinese)
- 4 徐卫, 马履中, 郭宗和, 等. 三平移并联机器人坐标测量机精度研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5):122-124.
XU Wei, MA Luzhong, GUO Zonghe, et al. Research of precision on CMM of 3-DOF translational parallel robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):122-124. (in Chinese)
- 5 奚思, 于连栋. 关节式坐标测量机结构参数标定优化采样策略[J]. 电子科技, 2012, 25(8):132-134.
XI Si, YU Liandong. Optimized sampling strategy of parameters calibration for PCMM [J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(8):132-134. (in Chinese)
- 6 KAVAC I, KLEIN A. Apparatus and a procedure to calibrate coordinate measuring arms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 48(1):17-32.
- 7 FURUTANI R, SHIMOJIMA K, TAKAMASU K. Parameter calibration for non-cartesian CMM [C] // VDI Berichte 1860, 2004: 317-326.
- 8 SANTOLARIA J, AGUILAR J J, YAGUE J A, et al. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines [J]. Precision Engineering, 2008, 32(4):251-268.
- 9 ACERO R, BRAU A, SANTOLARIA J, et al. Verification of an articulated arm coordinate measuring machine using a laser tracker as reference equipment and an indexed metrology platform [J]. Measurement, 2015, 69:52-63.
- 10 汪平平, 费业泰, 尚平, 等. 柔性坐标测量机参数辨识方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7):129-132.
WANG Pingping, FEI Yetai, SHANG Ping, et al. Parameter identification method of flexible coordinate measuring machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7):129-132. (in Chinese)
- 11 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 应用改进模拟退火算法实现关节臂式坐标测量机的参数辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10):2499-2505.
GAO Guanbin, WANG Wen, LIN Keng, et al. Parameter identification of articulated arm coordinate measuring machine based on improved simulated annealing algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10):2499-2505. (in Chinese)
- 12 王学影, 刘书桂, 张国雄, 等. 多关节柔性三坐标测量系统标定技术研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(9):1439-1442.
WANG Xueying, LIU Shugui, ZHANG Guoxiong, et al. Calibration technique of multi joint flexible three coordinate measuring system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(9):1439-1442. (in Chinese)
- 13 OSTROWSKA K, GASKA A, SŁADEK J. Determining the uncertainty of measurement with the use of a virtual coordinate measuring arm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4):529-537.
- 14 黄奎, 莫健华, 余立华, 等. 柔性测量臂运动学建模及参数标定方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8):122-126.
HUANG Kui, MO Jianhua, YU Lihua, et al. Kinematic model and parameter calibration for flexible articulated coordinate measuring arm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8):122-126. (in Chinese)
- 15 张国雄. 三坐标测量机 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999:1-3.
- 16 赵磊, 赵新华, 王收军, 等. 柔性测量臂的 RPY 建模与误差标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):365-371.
ZHAO Lei, ZHAO Xinhua, WANG Shoujun, et al. RPY modeling and error calibration of flexible measuring arm [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2):365-371. (in Chinese)
- 17 王学影. 关节臂式坐标测量机系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
WANG Xueying. Research on the articulated arm coordinate measuring machine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 18 刘志忠, 柳洪义, 罗忠, 等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):230-235.
LIU Zhizhong, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Improved Monte Carlo method for solving robot working space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):230-235. (in Chinese)
- 19 ZHAO Shuang, ZHU Lianqing, CHEN Qingshan, et al. A kinematic parameter calibration method for articulated arm coordinate measuring machine [C] // Proceedings of SPIE, 2013, 8916:891611-891611-8.
- 20 王学影, 刘书桂, 张洪涛, 等. 多关节柔性三坐标测量系统误差分析研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2):435-438
WANG Xueying, LIU Shugui, ZHANG Hongtao, et al. Error analysis of multi joint flexible three coordinate measuring system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(2):435-438. (in Chinese)
- 21 UNAI Mutilba, GORKA Kortaberria, AITOR Olarra, et al. Performance calibration of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Procedia Engineering, 2013, 63:720-727.
- 22 SANTOLARIA J, AGUILAR J J, YAGÜE J A, et al. Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines [J]. Precision Engineering, 2008, 32(4):251-268.
- 23 裘祖荣, 陈波, 李杏华. 基于反转法的平行双关节坐标测量机的标定[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, 47(6):512-517.
QIU Zurong, CHEN Bo, LI Xinghua. Calibration of parallel double joint coordinate measuring machine based on inversion method [J]. Journal of Tianjin University: Natural Science and Engineering Technology, 2014, 47(6):512-517. (in Chinese)