

文章编号 1004-924X(2013)07-1727-07

光笔式视觉测量系统中的测头中心自标定

刘书桂, 董英华*, 姜珍珠

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:考虑光笔式视觉测量系统的测量精度与测头中心位置的准确性相关,本文提出一种基于系统测量模型的测头中心自标定方法。该方法利用每幅光笔图像上的控制点信息,根据位置不变原理建立目标优化函数;利用非线性方程组最小二乘解的广义逆法对目标函数进行优化求解,获得测头中心在光笔坐标系下的位置。最后,借助参考标准锥完成标定,并结合平均思想改善收敛稳定性和速度来实验验证本方法的实用性。实验结果显示,测头中心坐标 x 、 y 、 z 轴的稳定性可分别达到 0.033 mm, 0.030 mm 和 0.043 mm,且具有满意的收敛速度。另外,对测量工件圆孔直径与参考值进行比较表明:测头中心标定后,系统的测量精度可满足中等精度的工业测量要求。

关键词:坐标测量系统;测头中心标定;光笔;位置不变原理;标准锥;广义逆法

中图分类号:TH72;TP242.62 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1727

Self-calibration of probe tip center for 3D vision coordinate measuring system in portable light pen

LIU Shu-gui, DONG Ying-hua*, JIANG Zhen-zhu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: yhdong@tju.edu.cn

Abstract: As the measuring accuracy of a light open 3D vision coordinate measuring system depends on the accurate center position of a probe tip, this paper proposed a novel and simple approach based on the model of measuring system for calibrating the center position of probe tip for the light pen. Based on position invariant principle, the objective function was established according to the control point information of every image. Then, the general inverse method for least square solution of nonlinear multivariable equations was employed to solve the object function and to obtain the center position of probe tip. Finally, average theory was used to improve the stability and convergence speed and to implement the calibration with a reference standard cone. The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed approach. Under a satisfied convergence speed, the repeatability of the system reaches 0.033, 0.030 and 0.043 mm in x , y and z axes, respectively. A comparison on the measured circle diameter of a workpiece and a reference shows that the system measurement accuracy has met medium precision industrial measurement requirements with the calibrated probe tip center.

Key words: coordinate measuring system; probe tip center calibration; light pen; position invariant principle; reference standard cone; general inverse method

收稿日期:2013-01-29;修订日期:2013-03-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51005165)

1 引言

三维坐标测量是现代工程测量特别是逆向工程中最为通用和普及的测量技术^[1]。近年来,随着机床、机械、汽车、航空航天等大型工业生产规模的日益扩大,对三维坐标检测手段、检测速度和精度都提出了更高的要求,便携、快速、高精度、大尺寸测量成为现代测量技术的一个重要发展方向^[2-5]。传统三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)由于体积重、局限于笛卡尔正交坐标系和测量范围受限等,不能适应现场大工件的快速测量。自 20 世纪 90 年代,一种新型的光笔式便携测量系统受到广泛重视和应用,如挪威 Metronor 公司的 solo/duo (单目/双目)光笔式视觉测量系统,瑞士 Leica 公司的 T-probe 激光跟踪仪等。国内多个高校也研究了基于单相机或者双相机光笔式视觉测量系统^[6-8],并取得一些成果。

测头中心在光笔坐标系下的位置精度直接影响系统的测量精度。为满足不同的测量要求,特别是深孔和隐藏点等难测点,需要更换不同形状的测头以完成测量。即使使用同一测头在重复安装时,由于安装力度不同也无法保证其测头位置不变,因此测头中心标定是测量前的必要准备工作。现有的光笔式视觉测量系统特别是国内研发的几种系统中,其测头中心位置多采用光笔理论设计值,由于光笔的加工误差,测头中心位置与理论值有较大差别,导致测量系统的精度不佳。

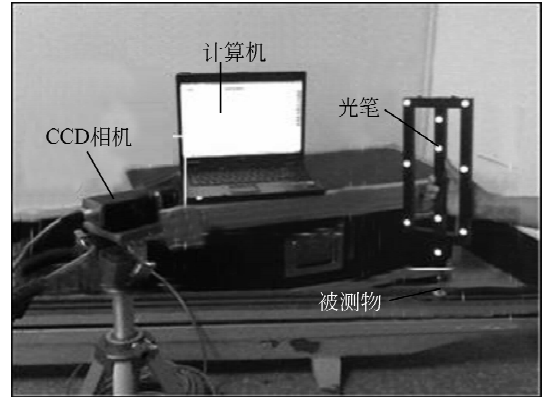
本文提出了一种基于系统测量模型和位置不变原理的测头中心标定算法。该算法使用一个参考标准锥,手持光笔使测头固定在锥孔中,晃动光笔上半部分,CCD 相机采集不同位姿的光笔图像,通过计算每个姿态下光笔坐标系和相机坐标系之间旋转平移关系,建立基于最小二乘准则的目标函数。利用非线性方程组最小二乘解的广义逆法对目标函数进行优化求解,从而获得测头中心在光笔坐标系下的实际位置。

2 测头中心自标定方法

2.1 光笔式视觉坐标测量系统模型与测量原理

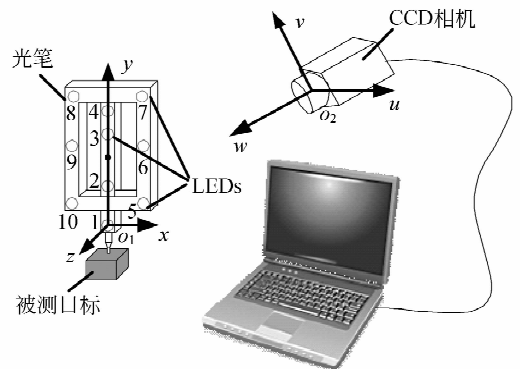
文献[6]介绍了一种三点共线式光笔测量系

统,同时分析了多个控制点的情况,由于三点测量模型对 3 个 LED 控制点在光笔坐标系下的位置要求很高,虽然文献[9]对系统的结构参数进行了标定,但其鲁棒性和精度仍达不到工业要求。本文在此基础上对光笔进行改进,目前采用的是 10LED 圆形控制点光笔,如图 1(b)中的光笔简图,测头采用 Metronor 公司的可拆卸红宝石球形测头,其形状误差小于 0.1%。



(a) 测量系统组成

(a) Establishment of measurement system



(b) 测量系统的坐标系建立

(b) Establishment of coordinate systems

图 1 光笔式视觉坐标测量系统

Fig. 1 Light pen 3D vision coordinate measuring system

由于光笔的加工存在误差,从而使控制点在光笔坐标系下的位置与理论设计有偏差。使用影像测量仪对各控制点在 $x_{O_1}y$ 平面上的位置进行精确测量,利用 CMM 测量两平面间的距离作为各点 z 轴坐标。

系统测量原理基于计算机视觉和接触式测量方法。测量时,将被测目标置于 CCD 相机视场内,光笔测头接触到被测目标表面,按下触发开关点亮控制点,相机摄取控制点图像,实时传输到计

算机经过软件处理,即可以得到测头中心位置在相机坐标系下的坐标。其中已知量包括经过标定的相机内部参数^[10]、测头中心在光笔坐标系下的位置,以及控制点中心在像平面上的坐标,这些坐标可以利用图像处理算法获得^[11]。

2.2 建立标定模型

按照图 1(a)搭建好测量装置,其中被测物换为标准锥固定在防震台上,调整相机位置使光笔图像尽量充满相机视场。图 2 所示为不同位姿的光笔图像采集示意图,手持光笔将测头固定于锥孔中,前后左右缓慢晃动光笔上端。CCD 相机获得不同姿态的光笔控制点图像实时传输到计算机并进行处理。

如图 1(b)所示,光笔改进后的视觉坐标测量系统系统包含 3 个坐标系:

(1)光笔坐标系 o_1-xyz :以第一个控制点的中心为坐标原点,以前 4 个点所在直线为 y 轴,以前的平面为基准平面,在平面上做垂直于 y 轴的垂线为 x 轴,根据右手法则确定 z 轴;

(2)相机坐标系 o_2-uvw :以相机光学中心为原点, u 轴和 v 轴分别平行于像平面的水平和垂直方向, w 轴为光轴方向;

(3)像平面坐标系 $O-X_mY_m$:以像平面中心为坐标原点, X_m 轴和 Y_m 轴分别与 CCD 相机横向扫描和纵向扫描方向平行,且与 uo_2v 平面两轴对应平行。

假设测头中心在光笔和相机坐标系下的位置分别为 $(x_0, y_0, z_0)^T$ 和 $(u_0, v_0, w_0)^T$,由于相机和测头中心位置在整个标定过程中都不变,且光笔为刚性物体,因此尽管光笔位姿不同,这两个坐标理论上都为固定常量,即位置不变原理。

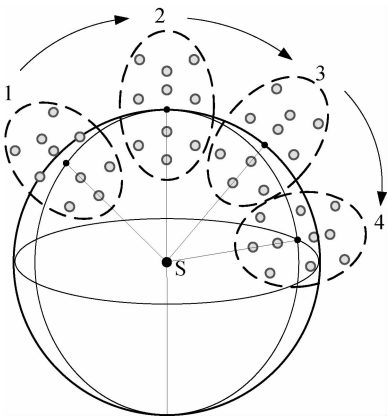


图 2 不同位姿的光笔图像采集示意图

Fig. 2 Image collection in different postures

对于图像 i ,设测头中心在相机坐标系下的实际位置为 $(u_i, v_i, w_i)^T$,则有:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1i} & r_{2i} & r_{3i} & t_{xi} \\ r_{4i} & r_{5i} & r_{6i} & t_{yi} \\ r_{7i} & r_{8i} & r_{9i} & t_{zi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中旋转矩阵和平移矩阵 R_i, T_i 可以利用已知的 10 个控制点的光笔坐标系和对应像点位置求解。

根据最小二乘思想计算测头中心在相机坐标系下实际和理想位置的偏差:

$$f_i(x_0, y_0, z_0, u_0, v_0, w_0) = \sqrt{(u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2 + (w_i - w_0)^2}. \quad (2)$$

目标函数可以表示为:

$$g(X) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n (f_i)^2 \right\}, \quad (3)$$

其中: X 为待求未知参数 $(x_0, y_0, z_0, u_0, v_0, w_0)^T$,对于测头中心自标定方法,仅需要得到测头中心在光笔坐标系下的位置 $(x_0, y_0, z_0)^T$,为方便,同时对 $(u_0, v_0, w_0)^T$ 进行求解。

2.3 参数求解两步法

(1)求解图像 i 下的旋转平移矩阵 R_i 和 T_i 。

假设 10LED 控制点中心在光笔坐标系下的位置为 (x_j, y_j, z_j) ,经图像处理得到对应像点位置为 $(X_{uj}, Y_{uj}), j=1, 2, \dots, 10$,根据透视投影知:

$$S_i \cdot \begin{bmatrix} X_{ui} \\ Y_{ui} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fr_{1i} & fr_{2i} & fr_{3i} & ft_{xi} \\ fr_{4i} & fr_{5i} & fr_{6i} & ft_{yi} \\ fr_{7i} & fr_{8i} & fr_{9i} & ft_{zi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: f 为相机镜头焦距。

令:

$$\begin{bmatrix} fr_{1i} & fr_{2i} & fr_{3i} & ft_{xi} \\ fr_{4i} & fr_{5i} & fr_{6i} & ft_{yi} \\ fr_{7i} & fr_{8i} & fr_{9i} & ft_{zi} \end{bmatrix} = t_{zi} \cdot \begin{bmatrix} a_{1i} & a_{2i} & a_{3i} & a_{4i} \\ a_{5i} & a_{6i} & a_{7i} & a_{8i} \\ a_{9i} & a_{10i} & a_{11i} & 1 \end{bmatrix},$$

$s_i = t_{zi}(a_{9i}x_j + a_{10i}y_j + a_{11i}z_j + 1) = t_{zi}\zeta_i$,则式(4)等价于:

$$\zeta_i \cdot \begin{bmatrix} X_{ui} \\ Y_{ui} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1i} & a_{2i} & a_{3i} & a_{4i} \\ a_{5i} & a_{6i} & a_{7i} & a_{8i} \\ a_{9i} & a_{10i} & a_{11i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(5)中含有 11 个未知数,10 个控制点图像可以得到 20 个线性方程,因此利用高斯-牛顿^[12]求解线性方程组。由于 \mathbf{R} 的正交性,根据式(6)进行参数分解可以得到 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i 。

$$\begin{bmatrix} r_{1i} & r_{2i} & r_{3i} & t_{xi} \\ r_{4i} & r_{5i} & r_{6i} & t_{yi} \\ r_{7i} & r_{8i} & r_{9i} & t_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{1i}t_{zi}}{f} & \frac{a_{2i}t_{zi}}{f} & \frac{a_{3i}t_{zi}}{f} & \frac{a_{4i}t_{zi}}{f} \\ \frac{a_{5i}t_{zi}}{f} & \frac{a_{6i}t_{zi}}{f} & \frac{a_{7i}t_{zi}}{f} & \frac{a_{8i}t_{zi}}{f} \\ a_{9i}t_{zi} & a_{10i}t_{zi} & a_{11i}t_{zi} & \frac{1}{\sqrt{a_{9i}^2 + a_{10i}^2 + a_{11i}^2}} \end{bmatrix} \cdot \quad (6)$$

将 \mathbf{R}_i 和 \mathbf{T}_i 代入式(1)可计算 $(u_i, v_i, w_i)^T$, 继而根据式(2)推导出每幅图像下测头中心在相机坐标系下实际和理想位置的偏差,对于 n 幅图像按照式(3)建立最优化目标函数。

(2) 优化目标函数

对于非线性方程组 $f_i (i=1, 2, \dots, n)$, 利用非线性方程最小二乘解的广义逆法求解^[13]。方程组含有 6 个未知参数,利用 6 幅以上图像可以确定方程组的解。为了能够得到较正确的初始解,实际标定中可以采用更多的图像,例如 50 幅,且光笔姿态尽量覆盖前后左右中间等几个重要方位。

在实际标定中采用上述标定方法发现最终标定结果不够稳定,但围绕设计的理论值前后晃动,因此在标定过程中加入平均思想,使得标定过程能够较快速且稳定的收敛,一般情况下,采集约 150 幅图像即可达到收敛。标定流程如下:

(1) 利用 50 幅图像计算初始值记为 X_0 ;

(2) 再次采集一幅图像并参与计算后依次记为 $X_i (i=1, 2, 3 \dots, n)$;

(3) 当 $n > 50$ 即总图像数目达到 100 时,开始将以上所有 X_i 取平均后作为一个测头的中心位置,即: $Y_i = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n X_i$, 如果 n 增加 1, j 也增加 1, 依次得到 $Y_j (j=1, 2, 3 \dots m), (m=n-50)$;

(4) 设定算法的终止条件为最后两次得到的测头中心在光笔坐标系下的距离 $|Y_j - Y_{j-1}|$ 小于一个给定值时,认为算法收敛,坐标达到稳定值;

(5) 输出测头中心在光笔坐标系下的位置。

3 标定实验与结果

3.1 测头中心稳定性实验

按照上述方法进行测头中心标定实验,CCD 相机获得不同姿态的光笔控制点图像实时传输到计算机并进行处理,根据实际测量精度的要求设定的终止条件为 $|Y_j - Y_{j-1}| < 0.001 \text{ mm}$ 。对同一个测头进行了 50 次标定实验,其测头中心位置的部分数据以及 50 个坐标的平均值和均方根误差如表 1 所示。

数据表明使用上述自标定方法得到的测头中心稳定性在 x, y, z 轴可分别达到 0.033, 0.030 和 0.043 mm,其精度能够满足工业需求。

表 1 测头中心标定结果

Tab. 1 Results of probe tip calibration (mm)

测量次数	x 轴	y 轴	z 轴
1	-1.278	-90.429	-23.903
2	-1.329	-90.388	-23.754
3	-1.339	-90.401	-23.842
...
48	-1.343	-90.333	-23.866
49	-1.311	-90.383	-23.890
50	-1.330	-90.372	-23.877
Mean	-1.318 2	-90.409 5	-23.854 8
RMS	0.033	0.030	0.043

3.2 系统测量实验

3.2.1 单点重复性验证

利用标定测头中心 $(-1.318 2, -90.409 5, -23.854 8)$ 和设计理论值 $(0, -90, -23)$ 分别对位置固定的标准锥孔进行单点三坐标测量。20 次测量的部分结果和均方根误差如表 2 所示。

可以看出采用标定的测头中心测量锥孔位置 20 次的各轴坐标均方根误差均明显低于采用理论值测量的结果,验证了测头中心标定算法的有效性以及测头中心位置的准确性。

表2 单点重复性测量结果

Tab. 2 Results of single point measurement

(mm)

测量次数	使用标定值			使用理论值		
	u -轴	v -轴	w -轴	u -轴	v -轴	w -轴
1	-38.801	244.829	1 089.108	-38.031	244.326	1 088.141
2	-38.762	244.828	1 089.115	-37.758	244.381	1 088.176
3	-38.774	244.827	1 089.103	-37.988	244.263	1 088.148
...
18	-38.793	244.776	1 088.948	-37.746	244.037	1 087.967
19	-38.791	244.788	1 088.972	-37.742	244.015	1 087.945
20	-38.766	244.780	1 088.969	-37.704	243.978	1 087.976
RMS	0.014	0.022	0.054	0.115	0.108	0.135

3.2.2 工件形状测量实验

图3所示的工件中间最大孔向底面的投影为一个圆,分别用传统CMM和光笔式测量系统对被测圆进行8次测量,每次采集20个点进行最小二乘圆拟合获得圆的半径。

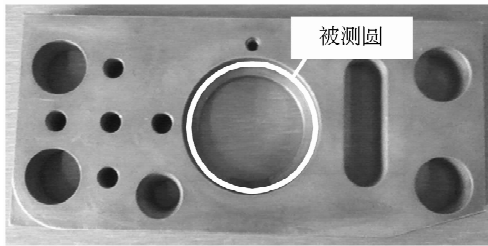


图3 被测工件

Fig. 3 Measured workpiece

表3 圆形工件测量结果

Tab. 3 Results of circle measurement (mm)

测量次数	测量值	绝对误差	相对误差($\times 10^{-4}$)
1	31.763	0.012	3.8
2	31.773	0.022	6.9
3	31.776	0.025	7.9
4	31.767	0.016	5.0
5	31.757	0.006	1.9
6	31.758	0.007	2.2
7	31.772	0.021	6.6
8	31.776	0.025	7.9
Mean	31.768	0.017	5.4

CMM测量的半径平均值为31.751 mm,此值作为参考值。使用光笔式测量系统测量的结果相对于CMM测量结果的绝对和相对误差如表3所示。

可以看出,与CMM测量结果相比,每次的测量相对误差均在 8×10^{-4} 之内,表明使用标定后的测头中心,系统具有良好的实际测量效果。

4 结 论

研究了一种适用于大工件现场检测的视觉三坐标测量系统,对其光笔测头中心的标定算法进行了详细介绍。标定时借助于标准锥对不同位姿的光笔图像进行连续采集,利用每幅图像上的控制点信息建立相机坐标系和光笔坐标系的旋转平移关系并求解,根据最小二乘思想建立目标函数,利用非线性方程最小二乘解的广义逆法对目标函数进行优化求解,同时结合平均思想改善标定过程,获得测头中心在光笔坐标系下的位置。实际标定实验表明: x 、 y 、 z 轴的标定重复性精度分别能够达到0.033, 0.030和0.043 mm。另外利用标定值和理论值分别对标准锥锥孔的位置进行测量,测量时光笔取不同姿态,采用标定值测量的稳定性明显高于采用理论值测量的稳定性,说明了标定结果的准确性。另外测量工件圆孔直径并和参考值进行比较,说明测头中心标定后系统的测量精度基本满足中等精度的测量要求。

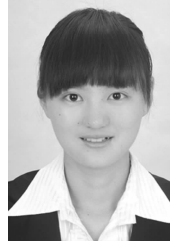
参考文献:

- [1] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999, 1-17.
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999, 1-17. (in Chinese)
- [2] CHEN J, WU X J, WANG M Y, *et al.*. 3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 414-423.
- [3] 孔林, 王栋, 金光, 等. 大型空间反射镜发射率测量及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 2014-2020.
KONG L, WANG D, JIN G, *et al.*. Emissivity measurement and error analysis of large space reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2014-2020. (in Chinese)
- [4] 王俊, 朱战霞, 贾国华, 等. 多介质下空间目标的视觉测量[J]. *计算机应用*, 2011, 31(5): 1431-1434.
WANG J, ZHU ZH X, JIA G H, *et al.*. Multi-medium space target visual measurement [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(5): 1431-1434. (in Chinese)
- [5] 郑路遥, 黄劼, 刘勇, 等. 基于非接触测量的大型锻件测控一体化方案[J]. *中国测试*, 2009, 35(1): 100-103.
ZHENG L Y, HUANG J, LIU Y, *et al.*. Integrative measurement and control project for large forgings based on non-contacted measurement [J]. *China Measurement and Test*, 2009, 35(1): 100-103. (in Chinese)
- [6] 彭凯, 张雪飞, 刘书桂, 等. 点阵测头成像视觉坐标测量系统的研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(7): 1635-1638.
PENG K, ZHANG X F, LIU SH G, *et al.*. The research of vision coordinates measurement system using N-Point probe [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(7): 1635-1638. (in Chinese)
- [7] 谢则晓, 孙洪磊, 王晓敏. 光笔式双摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. *光学技术*, 2012, 38(4): 459-464.
XIE Z X, SUN H L, WANG X M. Study of the two-light pen-camera type 3D-coordinate measuring system [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(4): 459-464. (in Chinese)
- [8] 秦大辉, 毛婷, 刘建军. 基于双目立体视觉的手持式光笔三坐标测量系统[J]. *制造技术与机床*, 2011, 8: 133-136.
QIN D H, MAO T, LIU J J. Study on 3D-coordinate measurement technology using handheld light-pen based on binocular stereoscopic vision system [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2011, 8: 133-136. (in Chinese)
- [9] 黄凤山, 刘书桂, 彭凯, 等. 光笔视觉测量系统结构参数的自标定与仿真[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(6): 705-708.
HUANG F SH, LIU SH G, PENG K, *et al.*. Self-calibration and simulation of the structure parameters in a light-pen vision measurement system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(6): 705-708. (in Chinese)
- [10] RAHMAN T, KROUGLICOF N. An efficient camera calibration technique offering robustness and accuracy over a wide range of lens distortion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(2): 626-637.
- [11] 刘书桂, 李蓬, 那永林. 基于最小二乘原理的平面任意位置椭圆的评价[J]. *计量学报*, 2002, 23(4): 245-247.
LIU SH G, LI P, NA Y L. Evaluation of the form error of ellipse based on least square method [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, 23(4): 245-247. (in Chinese)
- [12] YUAN J. A general photogrammetric method for determining object position and orientation [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(2): 129-142.
- [13] 钟海燕. 非线性最小二乘广义迭代算法及收敛性证明[J]. *广东工学院学报*, 1990, 7(1): 14-23.
ZHONG H Y. An iteration algorithm of generalized inverse matrix for nonlinear least-square problem and its proof of convergence [J]. *Journal of Guangdong Institute of Technology*, 1990, 7(1): 14-23. (in Chinese)

作者简介:



刘书桂(1954—),男,湖南华容人,教授,博士生导师,1982年于陕西机械学院获学士学位,1988年于日本东京工业大学获得博士学位,主要从事智能坐标测量、自动测量与控制、传感与信息处理等方面的研究。E-mail: sgliu@tju.edu.cn



姜珍珠(1989—),女,云南大理人,硕士研究生,2011年于四川大学获学士学位,主要从事坐标测量与控制、三维图形建模方面的研究。E-mail: zhenzhujiang@tju.edu.cn



董英华(1988—),女,河北沧州人,硕士研究生,2010年于燕山大学获学士学位,主要从事机器视觉、大尺寸坐标测量方面的研究。E-mail: yhdong@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)