

文章编号 1004-924X(2013)11-2877-07

多传感器测量系统的联合标定

李醒飞^{1*}, 姚 旺¹, 赵新华², 谭文斌¹, 王 星³

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300191; 3. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要:将坐标测量机与单目视觉测量系统组合起来, 提出了一种触发式测头与视觉测头联合标定的方法。选用内孔径为 4 mm 的光面环规作为标定件, 并利用转台、精密滑台配合视觉系统进行环规成像面的调整; 然后, 利用视觉测量系统提取环规内孔圆心图像坐标, 包括设置图像的感兴趣区(ROI)、二值化、形态学去噪、亚像素边缘检测和利用最小二乘法提取圆心的图像坐标。通过拟合内孔圆柱面找到轴线, 并利用接触传感系统提取相同位置圆心仪器坐标下坐标; 最后, 采用最小二乘法求解相关方程, 完成联合标定。试验验证显示, 该标定方法的标定精度高于 $6\ \mu\text{m}$, 优于已有的标定方法, 能够满足测量系统联合测量的精度需要。

关键词:单目视觉测量系统; 触发式测头; 多传感器; 联合标定; 坐标测量机

中图分类号: TP391; TP212.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2877

Joint calibration of multi-sensor measurement system

LI Xing-fei^{1*}, YAO Wang¹, ZHAO Xin-hua², TAN Wen-bin¹, WANG Xing³

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
2. *College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjing 300191, China;*
3. *Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100074, China*)
* *Corresponding author, E-mail: yaowang@tju.edu.cn*

Abstract: In combination of a coordinate measuring machine and a monocular vision measuring system, a multi-sensor joint calibration method was proposed by a flip-over probe and a vision probe. A 4 mm smooth ring gauge was used as a calibration part and a rotary table, a precise sliding table and a vision system were taken to adjust the imaging plane of the gauge. Then, the vision measurement system was used to extract the inner hole center image coordinate of the ring gauge, involving in setting the Region of Interest(ROI), binarization, morphologic denoising, sub-pixel edge detection and the extraction of cycle center image coordinates by the least square method. Furthermore, by fitting the inner cylinder of the ring gauge to obtain an axis line, the coordinate under the instrument coordinates of the same point was extracted by a trigger probe. Finally, joint calibration was completed by solving the equation using least square method. The experiment results show that calibration error is within 6

收稿日期: 2013-06-18; 修订日期: 2013-07-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975206)

μm , which is better than that of existed other calibration methods and can meet the need of joint measurement for measuring accuracy.

Key words: monocular vision measurement system; touch trigger probe; multi-sensor; joint calibration; Coordinate Measuring Machine(CMM)

1 引言

精密测试技术决定了一个国家加工制造水平的高低。坐标测量技术和机器视觉检测技术作为两种重要的测试技术在几何量的测试领域得到了广泛的应用,两者各有所长。坐标测量机的优点是测量精度高,而视觉检测由于计算机处理速度的加快,有着很高的测量速度。测试领域现在亟需一些兼具测量精度高和测量速度快的测量系统。

为了实现这一目标,许多光学传感器发展起来,比较常见的是激光三角法测头、结构光测头等。西班牙萨拉戈萨大学的 Santolaria J、Pastor J J 和天津大学的刘书桂教授将激光三角法测头替代了原有的触发式电气测头并实现了标定^[1]。韩国光州科学院的 Son Seokbae 和 Park Hyun-pung 将结构光测头成功地运用于检测自由曲面和逆向工程中^[2]。但这些光学传感器均是被安装在坐标测量机上作为测头使用,至今很少有将光学部分作为单独的测量系统与坐标测量机集成的先例。波兰的克拉科夫工业大学的坐标计量实验室的 Jerzy Sładek 和 Paweł M. Błaszczyk 和重庆大学的张湘伟教授将结构光测量系统与坐标测量机结合起来,结构光在系统中起到引导测量机测头实现被测件数字化的过程^[3]。哈尔滨工业大学的陈刚教授将双目视觉测量系统与坐标测量机结合起来,并进行了测量系统的联合标定,标定误差在 $50\ \mu\text{m}$ 以内^[4]。

本文将坐标测量机与单目视觉测量系统组合起来,并提出了一种触发式测头与视觉测头的联合标定的方法。标定件采用光面环规,通过单目视觉测量系统对环规侧面进行采集和处理,提取内孔中心的图像坐标值,并利用坐标测量机对环规内壁进行探测得到的环规孔心在机器坐标系中的坐标值。通过后续的处理,计算出标定系数,并用实验对标定精度进行验证。

2 系统结构

单目视觉测量系统在移动桥式的三坐标机上搭建,触发式测头可以沿 x 、 y 、 z 3 个方向移动,位置由光栅尺反馈到计算机,定位精度达 $3\ \mu\text{m}$ 。线性模组带动视觉测量系统沿 x 、 y 、 z 做直线移动,位置由编码器反馈回计算机,移动定位精度达 $3\ \mu\text{m}$ 。视觉测量系统由图像采集系统和光源系统组成并固定于视觉支架上,固定部分可微调,调节光源部分和图像采集系统的光轴,使其尽量一致并平行于测量机 x 轴,系统结构如图 1 所示。

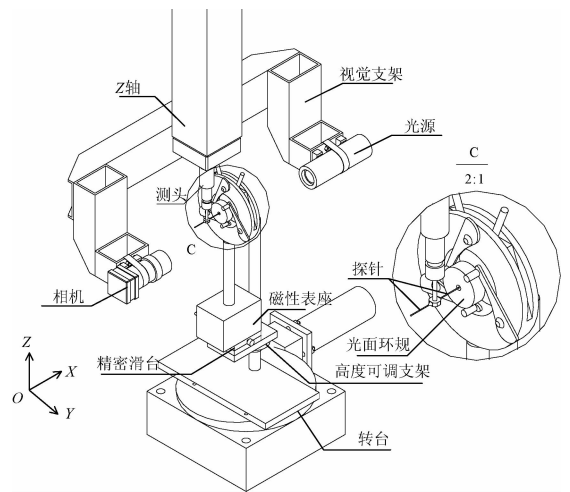


图 1 系统结构

Fig. 1 System construction

标定件选用上海松新量具厂的 $\varphi 4$ 的光面环规,经上海计量部门鉴定,环规实际尺寸 $4.000\ \text{mm}$,误差小于一个微米。环规固定在一个自定心夹持器上,经磁性表座放置于一个二维精密滑台上,滑台行程 $13\ \text{mm}$,灵敏度为 $0.002\ \text{mm}$ 。滑台可沿 X 、 Y 方向微调,也可沿高度可调支架在 Z 方向平移。整个标定装置位于转台上,转台用于环规平面法矢的调整。

3 标定原理与数学模型

进行联合标定之前首先标定每个传感器本身,即传感器的内部标定。视觉测头的标定,采用主动视觉的标定方法,目的是为了确定摄像机模型参数,包括旋转矩阵的 3 个欧拉角,有效焦距,畸变系数等参数^[5-6]。而触发式测头的标定,采用美国国家标准研究院(ANSI)制定的探测标准球上 49 点的检定方法^[7],以获得测端等效直径、测端球心位置和测头重复性误差等测头参数。

两类传感器的内部标定完成之后,可以开始进行两类传感器的联合标定,以将视觉测头探测到的图像坐标系与测量机的机器坐标系统一。

联合标定的过程包括以下 3 个部分:一是利用相机获取光面环规内孔中心在图像坐标系中的位置;二是利用触发式测头获取光面环规内孔中心在测量机坐标系中的位置;三是利用已有的图像坐标系中的坐标与测量机坐标系中的坐标得出两类传感器相互转换的外部参数。具体的算法步骤如图 2 所示。



图 2 标定算法

Fig. 2 Calibration algorithm

3.1 环规内孔中心图像坐标获取

在获取内孔图像坐标之前,要进行环规成像平面的调整。一,使环规内孔平面的法向矢量与光轴(X轴)平行;二,使环规成像平面位于图像采集系统的焦平面上。首先手动进行粗调,使角 α 、 θ 尽可能小,如图 3 所示,角 α 是环规平面法矢 n 在 XOZ 平面内的投影与光轴的夹角,角 θ 是法矢在 XOY 平面内与光轴的夹角。通过转台与图像采集系统的配合,调节环规方向,使夹角 θ 接近于 0^[8]。此时,只剩下角 α 影响成像效果, α 的存

在使获得的内孔图像呈椭圆形。之后调节二维精密滑台在 X 方向移动,通过 DFD 快速自动调焦算法,找到一个成像最佳位置^[9]。

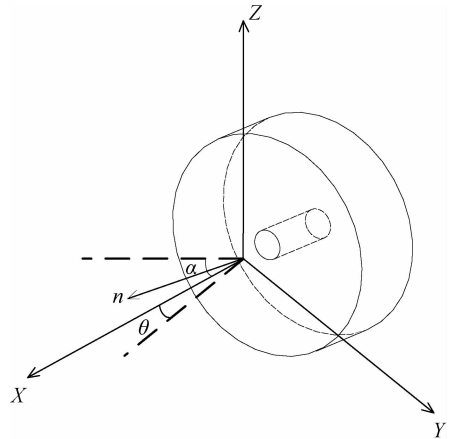
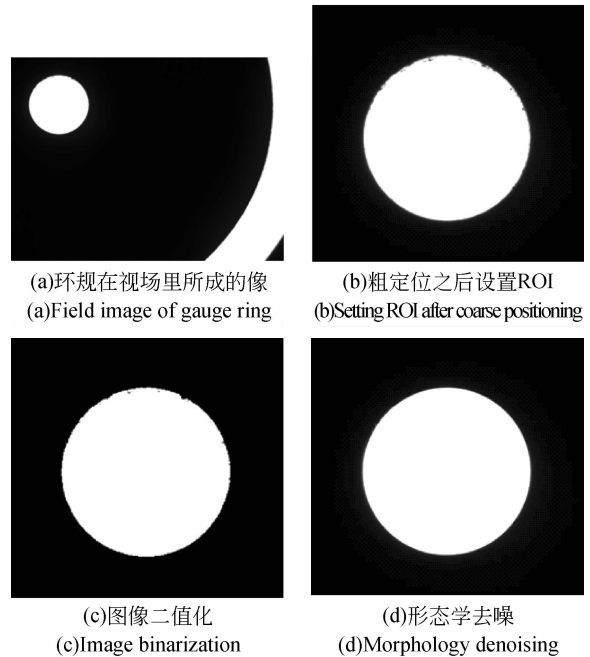


图 3 环规法矢示意图

Fig. 3 Normal vector of gauge ring

用相机采集到原始图像如图 4(a),经过初步处理后使用图像质心算法^[10]进行圆孔的粗定位,设置图像的 ROI(图像感兴趣区域)如图 4(b),即图像的处理范围。为了获得较为准确的圆心坐标,需要将二值化后的图像如图 4(c)进行形态学去噪,用膨胀运算去除边缘噪点,在利用腐蚀运算恢复边缘原来的位置如图 4(d)。利用边缘检测算法^[11]得到边缘的像素级序列,经多项式插值亚像素边缘定位算法^[11]的处理可得到更为精确的边缘信息如图 4(e),最后利用最小二乘法确定圆心图像坐标位置^[12]如图 4(f)。



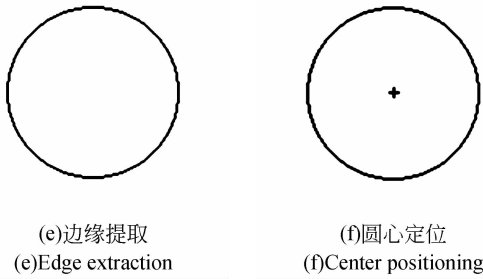


图 4 孔心定位的过程

Fig. 4 Process of center positioning

3.2 视觉和接触传感的联合标定

设某点在 CCD 感光面上坐标为 (Y_A, Z_A) , 视场中该点的图像坐标为 (Y_D, Z_D) , 其对应的物面坐标 (Y, Z) , 仪器坐标系下该点的坐标为 (X_M, Y_M, Z_M) , 此时线性模组编码器反馈的值分别为 X_I, Y_I, Z_I . 由于 CCD 像素阵列水平方向与垂直方向不一定垂直, 存在一个轴偏变换角 $\beta^{[13]}$. 又由于 CCD 摄像机的转移频率与图像采集卡的采

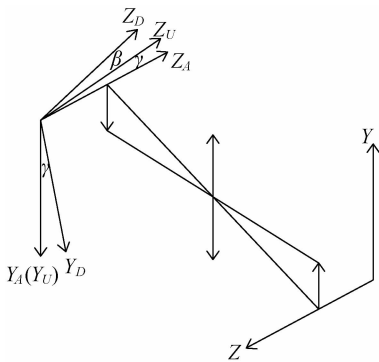


图 5 物像关系图

Fig. 5 Conjugate relation image

集频率不一致, 所以感光面坐标与数字图像坐标间有存在一个 γ 几何对应关系^[13]. 设变换后的坐标值为 (Y_U, Z_U) , 因此得到式(1)和(2), 由物面到 CCD 感光面的成像关系如图 5 所示.

$$\begin{cases} C_Y M Y_D = Y_U \cos \gamma - Z_U \sin \gamma \\ C_Z M Z_D = Y_U \sin \gamma + Z_U \cos \gamma \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_U = Y_A - Z_A \sin \beta \\ Z_U = Z_A \cos \beta \end{cases} \quad (2)$$

设光学系统放大倍数为 M , 水平像素当量和垂直像素当量分别为 C_Y, C_Z 则有:

$$\begin{cases} Y_A = M Y \\ Z_A = M Z \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入(3)可得:

$$\begin{cases} Y_D = b_0 + a_1 Y + a_2 Z \\ Z_D = c_0 + b_1 Y + b_2 Z \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中: } a_1 = \frac{\cos \gamma}{C_Y}, a_2 = -\frac{\sin(\gamma + \beta)}{C_Y}, b_1 = \frac{\sin \gamma}{C_Z},$$

$$b_2 = \frac{\cos(\gamma + \beta)}{C_Z}.$$

其中: b_0, c_0 分别表示的是从图像坐标系到物面坐标系的平移量, 其余参数则与两坐标系的夹角以及像素当量有关^[14]. 为使光面环规内孔能够在图像中成清晰的像, 保持环规在 X 方向(焦平面上)不移动, 通过调节高度可调支架和精密滑台使环规在 Y, Z 方向移动, 环规内孔在 CCD 像面的不同位置成像. 利用视场中心的 3×3 组坐标数据组成超定方程组, 使用最小二乘法求解 6 个系数.

由式(4), 建立目标函数, 求出使该目标函数值最小的未知数取值, 以下 2 个式子为构造的目标函数:

$$\begin{cases} g_1(b_0, a_1, a_2) = \sum (b_0 + a_1 Y + a_2 Z - Y_D)^2 \\ g_2(c_0, b_1, b_2) = \sum (c_0 + b_1 Y + b_2 Z - Z_D)^2 \end{cases} \quad (5)$$

对上述两式各参数项求导, 可得 $g_1(b_0, a_1, a_2)$ 与 $g_2(c_0, b_1, b_2)$ 取最小值时对应的参数数值, 化简后得到下列方程组:

$$\begin{cases} n b_0 + a_1 \sum Y + a_2 \sum Z - \sum Y_D = 0 \\ b_0 \sum Y + a_1 \sum Y^2 + a_2 \sum YZ - \sum Y Y_D = 0 \\ b_0 \sum Z + a_1 \sum YZ + a_2 \sum Z^2 - \sum Z Y_D = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} n c_0 + b_1 \sum Y + b_2 \sum Z - \sum Z_D = 0 \\ c_0 \sum Y + b_1 \sum Y^2 + b_2 \sum YZ - \sum Y D_D = 0 \\ c_0 \sum Z + b_1 \sum YZ + b_2 \sum Z^2 - \sum Z Z_D = 0 \end{cases} \quad (7)$$

上述六元一次方程组有唯一解, 解出相应的唯一解即为 6 个待定参数的最小二乘解, 图像坐标和物面坐标的关系也由此确定下来. 由某点图像坐标反解出该点物面坐标:

$$\begin{cases} Y = \frac{b_2 \times Y_D - a_2 \times Z_D - b_0 \times b_2 + c_0 \times a_2}{a_1 \times b_2 - b_1 \times a_2} \\ Z = \frac{b_1 \times Y_D - a_1 \times Z_D - b_0 \times b_1 + c_0 \times a_1}{b_1 \times a_2 - a_1 \times b_2} \end{cases} \quad (8)$$

对于 X 方向,在坐标系变换中,坐标平移量为固定值,设为 a_0 ,该值的大小可由接触式传感器直接获得:

$$X_M = X_I + a_0. \tag{9}$$

则任意一点图像坐标与仪器坐标关系如下^[15]:

$$\begin{cases} X_M = X_I + a_0 \\ Y_M = Y_I + Y = Y_I + \frac{b_2 \times Y_D - a_2 \times Z_D - b_0 \times b_2 + c_0 \times a_2}{a_1 \times b_2 - b_1 \times a_2} \\ Z_M = Z_I + Z = Z_I + \frac{b_1 \times Y_D - a_1 \times Z_D - b_0 \times b_1 + c_0 \times a_1}{b_1 \times a_2 - a_1 \times b_2} \end{cases} \tag{10}$$

通过以上步骤,视觉传感器与接触式传感器的联合标定完成,由图像中任意一点的图像坐标都可以得到该点在接触式测量系统中仪器坐标系下的坐标位置。

4 实验及结果分析

首先调节环规内孔,使其均布于视场中,取 3×3 个不同位置,分别利用触发式测头和视觉测头提取内孔中心坐标,进行标定系数的计算,计算结果如表 1 所示。

表 1 联合标定系数结果

Tab.1 Results of joint calibration coefficients

标定系数	数值
a_0/mm	269.258 6
$a_1/(\mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1})$	-0.004 489
$a_2/(\mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1})$	-0.000 042
b_0/mm	220.934 612
$b_1/(\mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1})$	0.000 02
$b_2/(\mu\text{m} \cdot \text{pixel}^{-1})$	-0.004 468
c_0/mm	118.086 999

然后将环规内孔置于视场内随机几个位置,用视觉测量系统去测量孔心坐标,并通过联合标定的系数反推仪器坐标系下该点的坐标。之后与坐标测量机测得的孔心坐标进行比较,得出标定误差,数据如表 2 所示。从实验结果可以看出,对

于视场中随机的 7 个孔位,标定误差均小于 $6 \mu\text{m}$ 。

表 2 标定精度实验结果

Tab.2 Results of calibration accuracy experiment

	视觉测量值 /mm	坐标机测量值 /mm	误差 / μm
Y	217.681 497 6	217.683 1	-1.602 383
Z	116.825 392 1	116.825 5	-0.107 86
Y	219.491 743 8	219.496 525	-4.781 237
Z	116.821 120 4	116.820 7	0.420 369
Y	219.365 194 3	219.363 95	1.244 296
Z	115.945 47	115.948 55	-3.080 018
Y	217.904 714 4	217.910 475	-5.760 561
Z	115.949 620 5	115.948 075	1.545 486
Y	218.669 730 4	218.671 975	-2.244 597
Z	115.947 401 7	115.951 225	-3.823 322
Y	219.542 653 1	219.543 225	-0.571 899
Z	116.358 326 3	116.362 85	-4.523 738
Y	218.040 918 6	218.044 425	-3.506 391
Z	116.360 842	116.365	-4.158 038

最后,对影响该种标定方法精度的主要因素进行分析,发现标定误差主要来源于以下几个方面。

(1)触发式测头在获取环规内孔中心仪器坐标值时代入的误差。

(2)光学系统获取光面环规内孔中心图像坐标时代入的误差。影响孔心在图像坐标中定位精度的因素有许多,主要包括测量系统硬件配置有关的误差和图像处理算法的误差。

硬件配置有关的误差有以下几个方面:被测工件的表面特征,成像系统畸变,光照强度,视觉支架的刚度和稳定性还有环境的振动等等。

图像与采集系统配合在调整环规平面法矢时,不能保证夹角 θ 为 0,残余角 $\Delta\theta$ 引入的误差也是硬件配置的误差之一。

而图像处理算法的误差由自动调焦算法、边缘检测算法、椭圆圆心定位算法等算法的精度共同决定。

(3)标定算法误差。

当二维的轮廓平面没有位于焦平面上,即会

产生离焦误差。由于本测量系统采用物方远心光路,当物体沿光轴方向偏离焦平面的时候,像方主线与像面的焦点位置始终不变,成像大小始终不变,但会在像平面成一个模糊像,这是影响标定精度的另一个原因。

5 结 论

本文提出了一种接触式传感器和视觉传感器

的联合标定技术,该技术保证了两类传感器在进行数据融合时的准确性。标定靶标采用光面环规,环规是一种几何量计量的仪器,属于有证标准物质(CRM),而且该靶标能同时满足两类传感器对其进行信息采集的要求。经试验验证,标定精度优于 $6\ \mu\text{m}$ (微米量级),相对于文献[4]标定精度更高。该标定方法具有较强的通用性,亦可适用于双目视觉测量系统与坐标测量机集成的多传感器测量系统中,因此具有很高的实用价值。

参考文献:

- [1] SANTOLARIA J, PASTOR J J, BROSEDA F J, *et al.*. A one-step intrinsic and extrinsic calibration method for laser line scanner operation in coordinate measuring machines [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(4): 045107.
- [2] SON S, HYUNPUNG P, KWAN H L. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(8): 889-897.
- [3] SLADEK J, BLASZCZYK P M, KUPIEC M, *et al.*. The hybrid contact-optical coordinate measuring system [J]. *Measurement*, 2011, 44(3): 503-510.
- [4] CHEN G, GUO Y, WANG H, *et al.*. Stereo vision sensor calibration based on random spatial points given by CMM [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(8): 731-734.
- [5] 孙泽林, 王昭, 李明. 火炮稳定精度图像测试系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 157-164.
SUN Z L, WANG Z, LI M. Image test system for gun stabilization accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 157-164.
- [6] CARBONE V, CAROCCI M, SAVIO E, *et al.*. Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(4): 263-271.
- [7] ASME. Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines[S]. New York, 1990.
- [8] 黎春宇. 视觉定位技术在惯性元件测量中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
LI CH Y. *Research on the application of vision positioning technique in the measurement of inertial parts* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [9] 陈立国, 王明月, 杨治亮, 等. 显微视觉快速自动调焦方法及实验 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1361-1366.
CHEN L G, WANG M Y, YANG Z L, *et al.*. Fast autofocus method for microscopic computer vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1361-1366. (in Chinese)
- [10] 樊志华, 王春鸿, 姜文汉. 基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 501-507.
FAN ZH H, WANG CH H, JIANG W H. Accumulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 501-507.
- [11] 吴晓波, 钟先信, 刘厚权, 等. 高精度图像测量系统 [J]. *光学精密工程*, 1995, 3(1): 28-33.
WU X B, ZHONG X X, LIU H Q, *et al.*. High precision vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(1): 28-33. (in Chinese)
- [12] 张虎, 达飞鹏, 邢德奎. 光学测量中椭圆圆心定位算法研究 [J]. *应用光学*, 2008, 29(6): 905-911.
ZHANG H, DA F P, XING D K. Algorithm of centre location of ellipse in optical measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 905-911. (in Chinese)
- [13] 陶闯, 林宗坚. 摄像系统标定中尺度因子的鲁棒测定 [J]. *模式识别与人工智能*, 1995, 8(3): 248-254.
TAO CH, LIN ZH J. The robust determination of scale factor in camera system calibration [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1995, 8(3): 248-254. (in Chinese)

[14] SHEN T S, HUANG J, MENG C H. Multiple-sensor planning and information integration for automatic coordinate metrology [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, 1(2): 167-179.

[15] CHAN V H, BRADLEY C, VICKERS G W. A multi-sensor approach for rapid digitization and data segmentation in reverse engineering [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, 122(4): 725-733.

作者简介:



李醒飞(1966—),男,湖北天门人,教授,博士生导师,2000年于天津大学获得博士学位,2003赴美国密歇根大学学习和工作,主要从事多传感器融合技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: lixf@tju.edu.cn



谭文斌(1984—),男,湖南衡阳人,博士后,2006年、2008、2012年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事控制技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: twb@tju.edu.cn



姚旺(1988—),男,天津人,硕士研究生,2011年于天津大学获得学士学位,主要从事图像处理、精密测量等方面的研究。E-mail: yaowang@tju.edu.cn



王星(1987—),男,内蒙古丰镇人,硕士研究生,助理工程师,2010年于天津大学获得学士学位,2013年于天津大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及测试计量等方面的研究。E-mail: wangxingtju@126.com



赵新华(1962—),男,吉林辽源人,教授,博士生导师,1985年于东北重型机械学院获得学士学位,1988年于燕山大学获得硕士学位,2000年于天津大学获得博士学位,主要从事机器人及机电一体化技术方面的研究。E-mail: xinhua Zhao@tjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)