

# 大尺寸空间角度检测系统的现场标定方法

胡文川 裘祖荣 张国雄

(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** 为了实现大尺寸空间异面直线夹角检测系统的现场标定,提出了基于待测对象的现场标定方法。结合一个具体的工程实例介绍了系统的测量方法,针对系统内部机器视觉子模块的测量对象提出了适于现场快速实施的标定策略。分析了影响系统检测精度的各项误差源,给出了系统标定板的设计加工方案。研究了系统的框架设计和标定板布局的合理性。设计了标定环节的数字图像处理流程,并给出了各个步骤的处理结果。实验结果表明,在光照条件为 355 lx 的情况下,采用所提出的标定方法使视觉检测系统的误差均值由  $0.065123^\circ$  缩减为  $0.00219^\circ$ ,补偿效果满足要求,系统对于间隔 7 m 的异面角度的标准测量不确定度为  $0.114^\circ$ 。

**关键词** 测量;现场标定;图像处理

中图分类号 TH712 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1008006

## In-Situ Calibration Method for Large-Scale Space Angle Optical Measurement System

Hu Wenchuan Qiu Zurong Zhang Guoxiong

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

**Abstract** In order to achieve the in-situ calibration of the measurement of angle between bifacial lines in large-scale space, the calibration approach based on target is proposed. A practical engineering project is taken to introduce the measuring principle, and in-situ calibration strategy which is suitable for quickly implementation is presented. The error sources of measurement system are analyzed and the design proposal of system calibration board is proposed. The reasonableness of framework design and layout of calibration board is checked. The digital image processing algorithm of calibration is designed, and the result of each step is proposed. Experiments indicate that the mean error of the visual inspection system is reduced from  $0.065123^\circ$  to  $0.00219^\circ$  using the calibration method with the illumination condition of 355 lx. The effect of error compensation meets the requirement, and the standard uncertainty of measurement for the angle of bifacial lines separated at a distance of 7 m is  $0.114^\circ$ .

**Key words** measurement; in-situ calibration; image processing

**OCIS codes** 000.3110; 120.3940; 110.2970; 100.2960

## 1 引言

随着工业和国防建设的快速发展,在航天、船舶、能源勘探等大型工程平台制造及安装<sup>[1,2]</sup>过程中常常需要检测异面直线夹角。但检测时存在待测目标间距通常在数米以上,测量基准难以建立;检测精度要求相对较高;待测工件往往重达数吨,在测量过程中存在不方便移动等困难,故国内外的研究人

员一直在寻求更适用于现场实施的检测方法。大尺寸空间角度精密检测的主要难点是测量系统的溯源方法,大型的实物标准体具有刚度不足、造价昂贵、自身精度检定困难和移动不便等缺点,适用范围有限,不能满足机动性现场测量的要求。

Yin 等<sup>[3]</sup>提出了大尺寸壳型工件光学检测网络(OMN)的现场标定方法,通过现场装配壳型实物标

收稿日期: 2012-05-09; 收到修改稿日期: 2012-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(50775160)资助课题。

作者简介: 胡文川(1983—),男,博士研究生,主要从事精密几何量测量方面的研究。E-mail: hwm921@yahoo.com.cn

导师简介: 裘祖荣(1958—),男,博士,教授,主要从事精密几何量测量方面的研究。E-mail: qzr@tju.edu.cn

准体,并在标准体表面粘接编码标志,利用重构技术计算各个标志的空间坐标,统一各节点传感器的坐标系,从而实现测量系统外部参数的精确标定。Ma等<sup>[4]</sup>采用一根 35 m 的水平直线导轨和一根 1.5 m 的竖直直线导轨构成测量平面,采用两部双频激光干涉仪对测量平面内的目标坐标进行测量,消除了阿贝误差,实现了大尺寸空间坐标检测的标定。显然,这两种方法均需要借助大型的实物基准来实现大尺寸测量的标定。

为了克服这一缺点,本文提出了大尺寸空间异面直线夹角测量系统的现场标定方法。系统通过两个机器视觉模块直接对待测元素与公共基准夹角的测量来实现两个待测元素夹角的间接检测,对各个机器视觉模块的角度检测精度进行标定,将系统内部的所有误差项综合起来进行补偿,即可实现系统的现场标定和误差补偿。考虑到承载仪器的检测平台的刚度及其本身变形,为了保证测量精度,减少由诸多原因所造成的系统测量误差,每次完成系统部件的安装后需要进行系统标定。

## 2 系统测量原理

在形成异面夹角的两条待测直线元素间(相距数米甚至数十米),采用单束线结构激光<sup>[5~7]</sup>建立公共测量基准。通过机器视觉技术检测构成异面夹角

的两条待测直线元素与上述线结构光在垂直于两条待测直线元素公垂线的投影面上的夹角关系,间接实现两条待测元素异面夹角的测量。为明确起见,以实际工程中某大型装备的空间角度测量任务为例来说明系统的测量原理。测量空间相距 6997 mm 的两条异面直线夹角,设计夹角为 85°,要求测量不确定度为 0.167°。

形成异面夹角的两条待测直线元素分别是位于图 1 中左侧工件上方的插拔孔的轴线和位于右侧两个对称的长度为 20 mm 的定向钮的公共轴线。由于两条待测轴线均垂直于工件轴线,因此工件轴线的垂面即为待测轴线所形成的异面夹角的测量投影面。同时,由于待测元素的存在形式不便于直接测量,需要设计专用测量标杆作为它们的实物体现。系统的公共光学基准采用鲍威尔笔式线结构激光器产生,公共基准被同时投射到两个测量标杆上。在待测直线元素前分别布置一个光轴与工件轴线平行的工业 CCD 摄像机进行独立拍摄,分别得到两个靶标与基准光线组成的封闭梯形图像,如图 2 所示,该梯形的底边及斜边的斜率即为待测轴线和基准光线的斜率。CCD 光轴与工件轴线的平行度依靠固定附件的机械加工精度保证,其定位精度造成的系统检测误差属于可容许的二次误差。

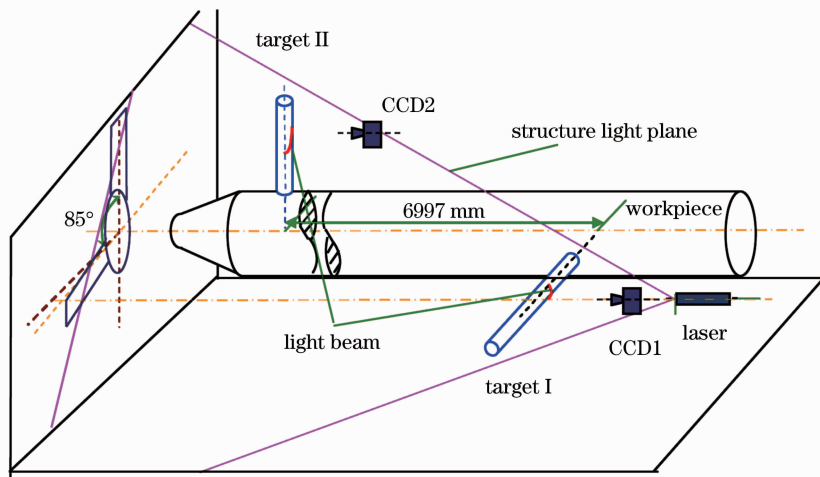


图 1 异面直线夹角激光测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of bifacial lines angle laser measurement system

如图 3 所示,在图像处理系统分别计算出定向钮标杆轴线、插拔标杆轴线、基准光线 I 和基准光线 II 的斜率以后,就可以计算出定向钮标杆轴线与基准光线 I 之间的夹角  $\alpha$  以及插拔标杆轴线与基准光线 II 轴线之间的夹角  $\beta$ ,得到定向钮标杆与插拔标

杆轴线之间的夹角为

$$\gamma = 180^\circ - (\alpha + \beta). \quad (1)$$

## 3 标定原理

测量系统内部的各个环节均会引入误差,包括

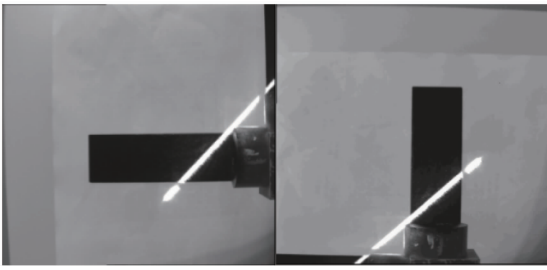


图 2 投射到标杆上的公共基准图像

Fig. 2 Common reference image projected on the targets

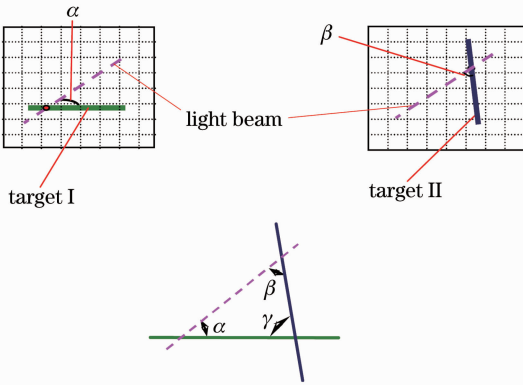


图 3 定向钮标杆与插拔标杆夹角  $\gamma$  计算示意图

Fig. 3 Schematic view of the angle  $\gamma$  between the orientation target and the insertion target

CCD 镜头物理畸变、CCD 感光面与待测标杆的位置关系、机械结构的形变量、外界光源的稳定性以及算法精度等。基于系统在工程中应用的实际条件，其标定方法需满足便携性和快速在线测量的需求。根据测量系统的测量原理，对定向钮图像测量系统和插拔机构图像测量系统设计专用角度标准板进行标定，获得对应的测量补偿值。在测量定向钮标杆与插拔标杆所夹角度时，对测量结果进行修正。标定板上的标准角度经由国家计量部门检定，实现系统测量精度的溯源。

通过定向钮图像检测系统对定向钮标定板上的标准角度  $A$  进行测量，根据测量值  $m_1$ ，计算修正补偿值  $\delta_\alpha = A - m_1$ 。同理，通过插拔机构图像检测系统对插拔标定板上的标准件角度  $B$  进行测量，根据测量值  $m_2$ ，计算修正补偿值  $\delta_\beta = B - m_2$ 。

在对定向钮标杆与插拔标杆之间的角度进行测量时，按照以上的标定结果进行修正后，测量结果为

$$\gamma = 180^\circ - \left[ \alpha \left( 1 + \frac{\delta_\alpha}{A} \right) + \beta \left( 1 + \frac{\delta_\beta}{B} \right) \right]. \quad (2)$$

由于测量系统本身的测量重复性精度满足要求，因此，对测量结果进行修正补偿后，可以在很大程度上提高系统的测量准确度。

## 4 标准件设计

系统标准件的设计需满足便携性、适于视觉系统检测以及便于权威计量部门检定等基本原则。

### 4.1 尺寸设计

基于本系统的标定原理，在测量和标定过程中检测物距应保持一致。在物距为 300 mm 的条件下，视场大小约为 180 mm × 130 mm。系统标定过程中，设计标定板的面积充满整个视场，既能将复杂背景排除在视场之外，又能够保证视场中基准光线的有效长度。标定板设计尺寸为 220 mm × 180 mm。

### 4.2 板面布局设计

如图 4 所示，两块标定板中均有一条与水平方向夹角约为 47.5° 的白色刻线，分别代表了测量过程中与两根标杆相交的基准光线。由于在整个测量过程中定向钮标杆始终处于基本水平的位置不变，而系统待测的相位角约为 85°，则插拔标杆应位于偏离竖直方向 5° 左右的位置，设计两块标定板中代表标杆的白色刻线分别与水平方向和与竖直方向的夹角为 5°，从而使标准角度的两条边最大限度地代表系统标杆轴线和基准光线。

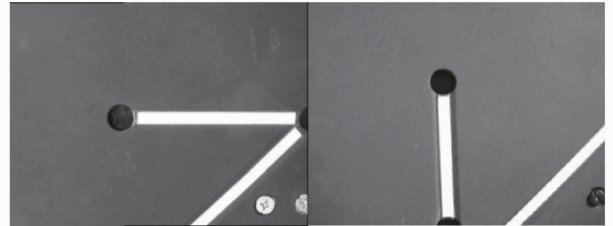


图 4 标定板设计方案

Fig. 4 Design scheme of calibration boards

由于待测角度为 85°，故系统直接测量的两个角度  $\alpha$  和  $\beta$  之和为 95°。根据平均原理，设计基准光线的投射位置使其与两根标杆的夹角基本一致，因此将两个标定板上的标准角度均设计为 47.5°。将基准光线布置在标定板的左上角，可避免检测平台支架对其产生的遮挡，保证光线的有效拟合长度。

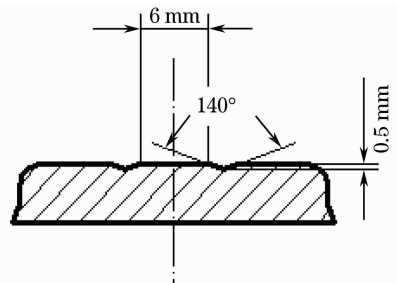


图 5 刻线表示方法示意图

Fig. 5 Representation of grooves

### 4.3 刻线设计

为了避免光照对刻线轮廓的影响,将刻线的表示方法设计为如图 5 所示。在宽为 6 mm 的刻线两旁开出两条深为 0.5 mm 的 V 型槽,分别以它们临近刻线的槽边表示刻线的轮廓边,槽内为暗色。这样,V 型槽内的阴影将被识别为背景而对图像处理的轮廓不造成影响。实验证明,这种设计方法大大提高了系统对环境的适应能力。

## 5 标定平台的布局设计

### 5.1 标定平台设计

系统标定平台具有承载标定板并对其进行定位的功能,对应与两块标定板分别设计为定向钮标定平台和插拔机构标定平台。标定平台的设计方案如图 6 所示。利用标定平台的表面及其上布置的 3 个定位销,实现了对标定板上基座的 6 点定位,保证标定板的复位精度,图 7 为标定台的现场实施方案。

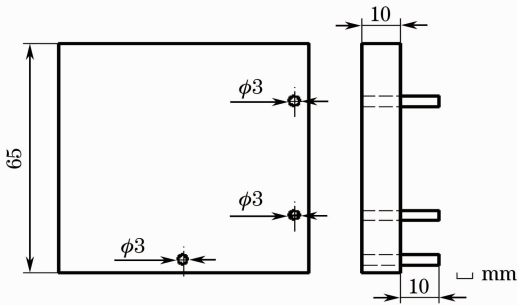


图 6 标定台设计方案

Fig. 6 Design scheme of calibration table

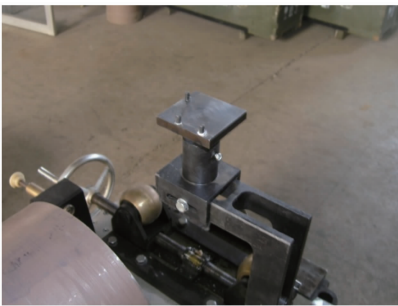


图 7 标定台实施方案

Fig. 7 Implementation scheme of calibration table

### 5.2 标定板的布置方案

标定板在工件径向的布置方案如图 8 所示, $M$ 、 $N$  点为两部 CCD 摄像机轴线的投影,距离工件中心分别为 330 mm 和 300 mm。在图像处理过程中相对于视场中心对称地取出标杆的轮廓进行直线拟合,在一定程度上消除了 CCD 镜头畸变带来的误差。在视场中能够显现的板上各条刻线设计长度均

超过 400 pixel。

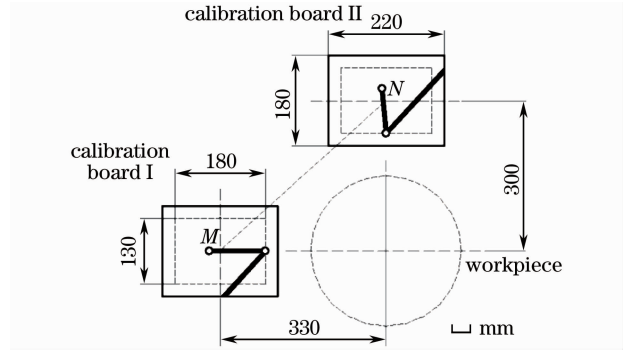


图 8 标定板布置方案

Fig. 8 Layout scheme of calibration boards

## 6 算法流程设计

系统标定板具有基准光线接收屏的功能,由于板面充裕,在很大程度上提高了线结构光的利用率。由于测量过程中基准光线固定不动,无需实时计算其方向,在标定过程中进行检测即可。标定板与标杆在安装时很难保证平行,实验证明该误差相对于检测要求可以忽略不计。

机器视觉系统对标定板图像的分析理解过程包括滤波、图像分割<sup>[8~10]</sup>、边缘提取<sup>[11~13]</sup>和角度计算等步骤,图 9 为各环节处理结果。

图 9(a)、(b)为标定板原始图像。为了降低原始图像中的噪声影响,需要对其进行滤波处理,图 9(c)、(d)为均值滤波处理结果。图 9(e)、(f)为图像分割处理结果。因为标定板图像覆盖整个视场,所以图像的灰度直方图中仅含有对应前景和背景的两个峰形,并且双峰的混叠影响可忽略。将整幅图像直方图的灰度加权平均值作为图像分割的阈值即可满足精度要求。图 9(g)、(h)为图像轮廓提取处理结果。得到基准光线与刻线轮廓后,采用线性回归的方法即可计算出光线斜率及标准刻线夹角,对测量结果进行补偿。

## 7 实 验

### 7.1 系统标定原理实验

在系统测量中,CCD 的安装精度、镜头的物理畸变和软件算法都会对结果造成影响。系统标定的过程是对机器视觉模块进行的角度计算误差的补偿过程。在标定原理实验中,固定 CCD 的安装位置,在环境光照稳定的条件下,采用 I 号标定板(角度值  $A$  为  $47.626^\circ$ )对视觉模块进行标定,得到补偿值后将 II 号标定板(角度值  $B$  为  $47.388^\circ$ )上的标准角度

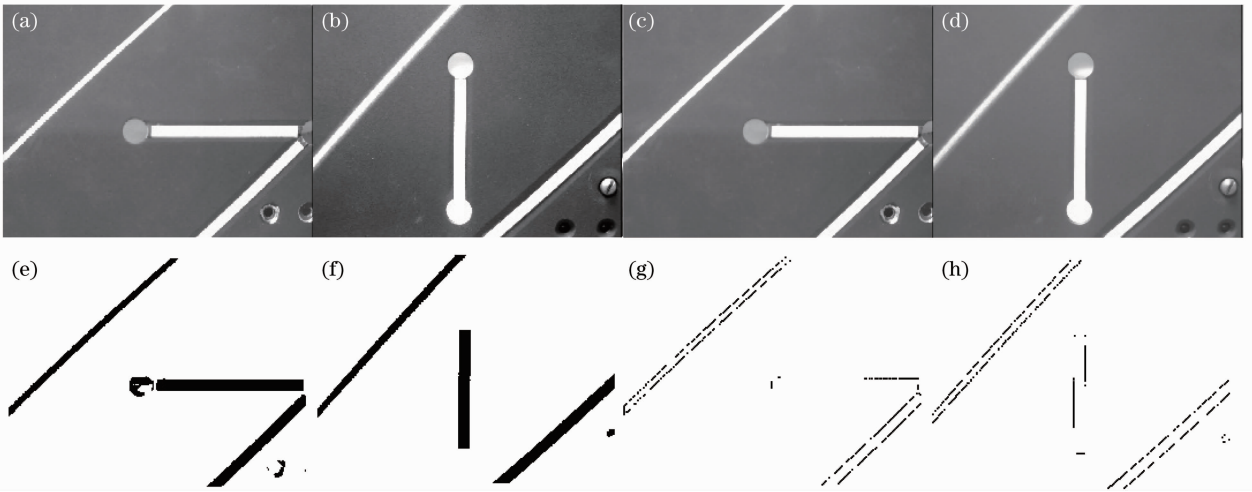
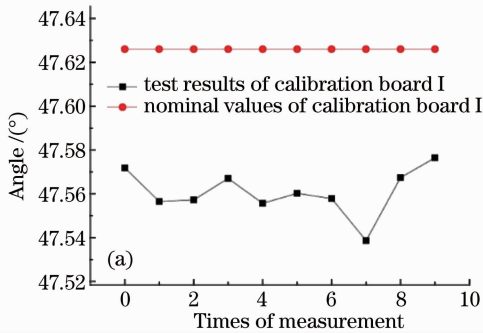


图9 图像处理流程。(a)、(b)标定板原始图像；(c)、(d)中值滤波处理结果；(e)、(f)图像分割处理结果；(g)、(h)图像轮廓提取处理结果

Fig.9 Image process. (a), (b) Original images of calibration plate; (c), (d) results after median filtering; (e), (f) results after image segmentation; (g), (h) results after image contour extraction

作为测量对象，并对结果做出补偿。将测量结果与国家计量检定部门的检定结果作差，得到系统测量结果的残余误差，达到验证系统标定方法补偿效果的目的。现场实验共计进行了10次标定，环境光照为355 lx，用时30 s。

如图10(a)所示，系统对I号标定板角度的测



量残差均值为 $0.065123^\circ$ ，将该值作为系统的测量补偿值对II号标定板进行检测。如图10(b)所示，在CCD固定及环境光照不变的情况下，系统对II号标定板角度的测量残差缩减为 $0.00219^\circ$ ，这说明所提出的标定方法能够在很大程度上补偿系统的检测误差。

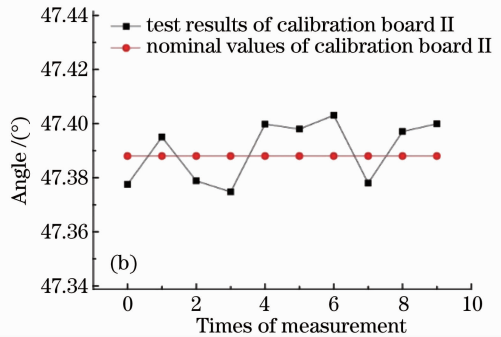


图10 标定原理实验。(a) I号标定板；(b) II号标定板

Fig.10 Experiment of calibration principle. (a) Calibration board I; (b) calibration board II

### 7.2 标定板定位精度实验

由于检测系统需要满足机动性现场测量的要求，系统标定板的定位是否准确直接影响系统误差的补偿效果。为了检验标定台设计方案的合理性，将CCD安装位置固定，重复安装标定板对系统进行标定，通过补偿值的重复性精度检验标定板的定位精度是否满足系统要求。

如图11所示，在各次标定过程中，重复安装标定板后测得的补偿值重复性精度为 $\pm 0.018^\circ$ 。

### 7.3 采用标定板作为激光接收屏的可行性实验

为了研究标定板与标杆不共面而造成的光线偏

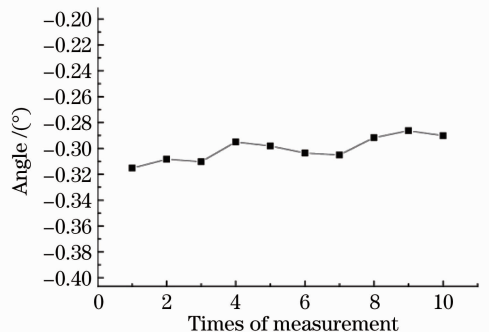


图11 标定板定位精度实验

Fig.11 Accuracy of positioning for calibration board

折误差,将两块标定板以叠放的方式进行固定(如图12所示),物距为300 mm。将基准光线投射到两块板上,使两板由小到大产生一定的偏摆角度和俯仰角度并测量两板上光线所夹角度。



图12 标定板装配误差实验

Fig.12 Experiment of assembling error of calibration boards

当线结构激光的两个接收平面之间偏摆角为 $8.77^\circ$ 时,两条基准光线的夹角约为 $0.0064^\circ$ 。当两个接收平面之间的俯仰夹角为 $9.46^\circ$ 时,两个激光

光条的夹角约为 $0.0084^\circ$ 。由此可见,在实际应用条件下,两块标定板及标杆工作面之间很难保证完全平行,但该因素对测量结果产生的影响是非常有限的,所引进的测量精度误差可以忽略。

### 7.4 系统测量不确定度分析实验

为了检验系统的检测精度是否满足工程要求,在装有工件的检测平台上安装好系统各个部件后,将两块标定板分别安装到对应的标定台上,对系统进行标定的同时接收并拟合出基准光线的方程,程序在记录下系统的测量补偿值及基准光线的斜率值后对两根标杆的夹角进行测量,记录结果后重复上述操作。单次测量间重复拆装 CCD、标定板和测量标杆。如表1所示,插拔机构测量补偿值 $\delta_\beta$ 的测量平均值为 $0.01134^\circ$ , $\alpha$ 角度测量平均值为 $40.0759^\circ$ , $\beta$ 角度测量平均值为 $55.5503^\circ$ ,待测空间角度的测量结果的估计值为 $84.674^\circ$ 。

表1 系统测量精度实验

Table 1 System inspection accuracy experiment

No.	$\delta_\alpha$	$\alpha$	$\delta_\beta$	$\beta$	$\gamma$
1	$-0.2736^\circ$	$40.0811^\circ$	$0.0509^\circ$	$55.4130^\circ$	$84.713^\circ$
2	$-0.2427^\circ$	$40.0248^\circ$	$0.0606^\circ$	$55.4377^\circ$	$84.703^\circ$
3	$-0.2477^\circ$	$40.0235^\circ$	$-0.0537^\circ$	$55.5350^\circ$	$84.743^\circ$
4	$-0.2686^\circ$	$40.0450^\circ$	$-0.0581^\circ$	$55.6215^\circ$	$84.627^\circ$
5	$-0.5060^\circ$	$40.2256^\circ$	$-0.0358^\circ$	$55.6171^\circ$	$84.689^\circ$
6	$-0.3428^\circ$	$40.1044^\circ$	$-0.0242^\circ$	$55.5809^\circ$	$84.675^\circ$
7	$-0.1644^\circ$	$40.0011^\circ$	$-0.0488^\circ$	$55.6302^\circ$	$84.584^\circ$
8	$-0.2370^\circ$	$40.0395^\circ$	$-0.0592^\circ$	$55.5683^\circ$	$84.688^\circ$
9	$-0.3618^\circ$	$40.1212^\circ$	$0.0310^\circ$	$55.5553^\circ$	$84.641^\circ$
10	$-0.3009^\circ$	$40.0388^\circ$	$0.0239^\circ$	$55.5443^\circ$	$84.676^\circ$
Mean value	$-0.29455^\circ$	$40.0759^\circ$	$-0.01134^\circ$	$55.5503^\circ$	$84.674^\circ$
Standard deviation	$0.093^\circ$	$0.06549^\circ$	$0.04775^\circ$	$0.07379^\circ$	$0.045^\circ$

由(2)式可知,对空间角度 $\gamma$ 的测量不确定度影响显著的因素主要有:定向钮标杆轴线与基准光线 I 之间的夹角 $\alpha$ 以及插拔标杆轴线与基准光线 II 轴线之间的夹角 $\beta$ 的测量重复性引起的不确定度 $u_1$ 、 $u_2$ ;系统标定结果中测量补偿值 $\delta_\alpha$ 、 $\delta_\beta$ 的重复性引起的不确定度 $u_3$ 和 $u_4$ 以及标定板角度 A、B 的检定误差引起的不确定度 $u_5$ 、 $u_6$ 。

定向钮标杆与基准光线夹角 $\alpha$ 的10次测量求得平均值的标准差 $\sigma_\alpha = 0.06549^\circ$ ,又因为 $\left|\frac{\partial \gamma}{\partial \alpha}\right| = \left|1 + \frac{\delta_\alpha}{A}\right|$ ,故有角 $\alpha$ 测量重复性引起的不确定度分量为 $u_1 = \left|1 + \frac{\delta_\alpha}{A}\right| 0.06549^\circ \approx 0.0659^\circ$ ,其自由度 $\nu_1 = 10 - 1 = 9$ 。

插拔标杆与基准光线夹角 $\beta$ 的10次测量求得平均值的标准差 $\sigma_\beta = 0.07379^\circ$ ,且 $\left|\frac{\partial \gamma}{\partial \beta}\right| = \left|1 + \frac{\delta_\beta}{B}\right|$ ,故有角 $\beta$ 测量重复性引起的不确定度分量为 $u_2 = \left|1 + \frac{\delta_\beta}{B}\right| 0.07379^\circ \approx 0.0738^\circ$ ,其自由度 $\nu_2 = 10 - 1 = 9$ 。

定向钮机构测量补偿值 $\delta_\alpha$ 的测量平均值为 $-0.29455^\circ$ ,标准差 $\sigma_3 = 0.093^\circ$ ,则由 $\delta_\alpha$ 的重复性引起的不确定度分量为 $u_3 = \left|\frac{\partial \gamma}{\partial \delta_\alpha}\right| 0.093^\circ = \left|\frac{\alpha}{A}\right| 0.093^\circ \approx 0.0078^\circ$ ,其自由度 $\nu_3 = 10 - 1 = 9$ 。

插拔机构测量补偿值 $\delta_\beta$ 的测量平均值为 $-0.01134^\circ$ ,标准差为 $\sigma_4 = 0.04775^\circ$ ,则由 $\delta_\beta$ 的重复

性引起的不确定度分量为  $u_4 = \left| \frac{\partial \gamma}{\partial \beta} \right| 0.04775^\circ = \left| \frac{\beta}{B} \right| 0.04775^\circ \approx 0.0560^\circ$ , 其自由度  $\nu_4 = 10 - 1 = 9$ 。

标定板角度  $A$  和  $B$  的检定误差, 根据标定板检定证书得到角度检定误差范围为  $\pm 0.017^\circ$ , 取均匀分布, 得到标准角度检定误差的标准不确定度  $u' = \frac{0.017^\circ}{\sqrt{3}} = 0.00982^\circ$ , 由此引起的标准角度  $A$  的标准不确定度分量为  $u_5 = \left| \frac{\partial \gamma}{\partial A} \right| u' = \left| \frac{\alpha \delta_\alpha}{A^2} \right| 0.00982^\circ \approx 0.00005^\circ$ , 标准角度  $B$  的标准不确定度分量为  $u_6 = \left| \frac{\partial \gamma}{\partial B} \right| u' = \left| \frac{\beta \delta_\beta}{B^2} \right| 0.00982^\circ \approx 0.000003^\circ$ , 取相对标准差  $\frac{\sigma_{u3}}{u_3} = \frac{\sigma_{u4}}{u_4} = 35\%$ , 对应的自由度  $\nu_5 = \nu_6 = 4$ 。

因为不确定度分量  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$  相互独立, 合成系统不确定度为

$$u_s = \sqrt{u\alpha^2 + u\beta^2 + u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 0.114^\circ, \quad (3)$$

系统自由度为

$$\nu_s = \frac{u_s^4}{\sum_{i=1}^6 \frac{u_i^4}{\nu_i}} \approx 26. \quad (4)$$

采用合成的标准不确定度评定系统对于空间角度测量的不确定度, 测量结果为  $\gamma = 84.674^\circ, u_s = 0.114^\circ, \nu_s = 26$ 。

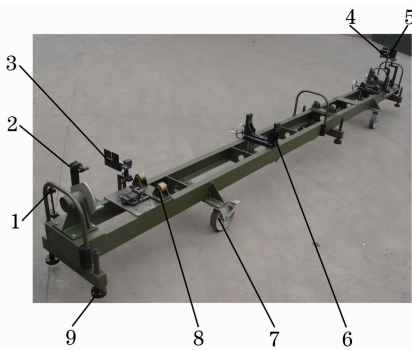


图 13 现场标定实施方案

Fig. 13 Implementation scheme of in-situ calibration

图 13 为系统标定的现场实施方案。在机动的检测车上, 大型工件由滚轮 8 定位并由夹紧装置 6 固定。首先将工件吊装到检测车上, 然后装配测量系统各组件。当需要测量时, 在车轮 7 抬起的同时, 车辆由支座 9 支撑。在测量前进行标定, 将两块系统标定板(3 和 5)安装到对应标定台上。为了在图中展现测量系统, 避免工件对测量器件的遮挡, 图中

省略了工件。在系统测量中, 位于检测车尾部的激光器发出的线结构激光投射在两个被测对象上, 激光器沿轴线方向距两个标杆的距离分别为 700 mm 和 7 m。两个 CCD(2 和 4)物距均为 300 mm。

## 8 结 论

针对大尺寸空间异面夹角激光测量系统的测量原理和实施方案, 给出了适于现场快速标定的方法和实施方案, 对系统各个误差源进行了分析并设计了系统标定板。现场实验结果表明, 所提出的标定方法具有快速准确的特点, 误差补偿效果良好, 标准件本身易于检定, 满足对于大尺寸空间角度激光测量系统在实际工程应用中的现场标定精度要求, 对国家工业和国防建设皆有价值。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Liqun, Wang Liding, Jin Shuyuan. Traceability status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2006, **26**(6): 1~5
- 2 马骊群, 王立鼎, 靳书元. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J]. *计测技术*, 2006, **26**(6): 1~5
- 3 Shao Jianxin, Qiu Zixue, Yuan Jiang *et al.*. Research on adaptive tracing measurement method used for wide-range free-form surfaces [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, **20**(9): 1045~1047
- 4 邵建新, 邱自学, 袁江等. 大量程自由曲面的自适应跟踪测量方法研究[J]. *中国机械工程*, 2009, **20**(9): 1045~1047
- 5 Y. K. Yin, X. Peng, X. L. Liu *et al.*. Calibration strategy of optical measurement network for large-scale and shell-like objects [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(8): 2048~2056
- 6 L. Q. Ma, L. D. Wang, T. Z. Cao *et al.*. A large-scale laser plane calibration system [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2007, **18**(6): 1768~1772
- 7 Liu Zheng, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 8 刘震, 张广军, 魏振忠等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 9 Xie Zexiao, Wang Kun, Liu Shijing. Two-axis measurement system with large field of view based on line structured light [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2009, **20**(6): 762~765
- 10 解则晓, 王琨, 刘世晶. 大视场线结构光两轴测量系统 [J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(6): 762~765
- 11 Xie Zexiao, Li Xuyong, Xin Shaohui *et al.*. Underwater line structured-light self-scan three-dimensional measuring technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2010~2014
- 12 解则晓, 李绪勇, 辛少辉等. 水下线结构光自扫描三维测量技术 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2010~2014
- 13 Fu Rong, Shi Meihong, Xu Bugao. Fabric defect detection based on window threshold local binary patterns [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, **16**(9): 2009~2015
- 14 付蓉, 石美红, 徐步高. 基于窗阈值局部二值模式的织物疵点检测算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2010, **16**(9): 2009~2015
- 15 Zheng Zhaobao. Research about new method of image segmentation based on attractor [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(10): 1192~1196

- 郑肇葆. 基于吸引子的图像分割新方法的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, **35**(10): 1192~1196
- 10 Dong Jihui, Hu Qiquan, Sun Dongsong. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109002
- 董吉辉, 胡企铨, 孙东松. 空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0109002
- 11 Zhang Xutang, Chen Xiaofeng, Jiang Lijun. Prismatic parts 3D model retrieval based on local shape features extraction [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, **18**(3): 458~465
- 张旭堂, 陈晓峰, 蒋立军. 基于局部特征提取的棱柱类零件三维模型检索[J]. 计算机集成制造系统, 2012, **18**(3): 458~465
- 12 Zhao Liaoying, Shen Yinhe, Li Xiaorun *et al.*. Composite kernel target detection based on mathematical morphology for hyperspectral imagery[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1228003
- 赵辽英, 沈银河, 厉小润 等. 基于数学形态学的高光谱图像组合核目标检测[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1228003
- 13 Zeng Li, Guo Haiyan, Ma Rui. Edge detection of industrial CT 3D image based on wavelet locating and Facet model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 443~450
- 曾 理, 郭海燕, 马 睿. 基于小波定位及 Facet 模型的三维工业 CT 图像边缘检测 [J]. 光学 精密工程, 2010, **18**(2): 443~450

栏目编辑:何卓铭