

文章编号 1004-924X(2012)07-1427-07

大尺寸空间异面直线夹角的检测

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:针对实际工程中相距数米至数十米的若干几何元素之间的空间夹角,提出了大尺寸空间异面直线夹角激光检测系统的设计方案。首先,根据常见待测直线元素不同的实体存在形式,设计了相应的实体体现方法,并建立了异面夹角测量所需的公共基准;对于待测元素在公垂线方向距离很远的情况,采用单束线结构激光作为公共基准。然后,针对一个具体的工程实例,给出了系统检测框架的设计思路。最后,提出了公共基准与待测元素空间关系的获取方法。采用数字图像处理技术检测公共基准与各个待测元素构成的夹角并通过三角关系间接获得了待测元素异面夹角的检测结果。在30次系统测量中,系统重复性精度达到 $\pm 0.020\ 85^\circ$,表明所提出的检测系统满足测量要求,验证了测量原理的可行性。

关键词:大尺寸测量;角度测量;光学基准;机器视觉

中图分类号:TP242.6;TB922 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1427

Measurement of large-scale space angle formed by non-uniplanar lines

HU Wen-chuan*, QIU Zu-rong, ZHANG Guo-xiong

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

* Corresponding author, E-mail: hwm921@yahoo.com.cn

Abstract: In order to measure the space angle of two non-uniplanar lines with a distance of several even tens of meters, the design proposal of a laser system for measuring the large-scale space angle formed by non-uniplanar lines was proposed. Firstly, in consideration of the existence forms of space angles formed by common targets, corresponding orientation methods were designed and a common reference in the space angle measurement was proposed. The single beam of linear structured light was used as the common reference when the distance of the targets was only large in the direction of common perpendicular. Then, the design process of a system framework applied in a specific project was analyzed. Finally, the inspection method of spatial relationship between the common reference and targets was proposed. With digital image processing, the angle between common reference and targets was measured, and the measurement result was acquired indirectly. In measurements for 30 times, the repeatability of the system is $\pm 0.020\ 85^\circ$, which proves that the measurement system can satisfy the requirements of practical projects and the proposed principle is reasonable.

收稿日期:2012-01-06;修订日期:2012-03-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50775160)

Key words: large-scale metrology; angle measurement; optical reference; machine vision

1 引言

随着工业和国防建设的不断发展,大型机械制造和大型工程安装^[1-2]的过程中经常需要测量空间异面直线夹角。由于被测对象相距较远,并且待测工件往往重达数吨,测量过程中不方便移动或翻转,因此测量的难度较大。如果采用传统的坐标测量方法,测量机体积十分庞大、价格昂贵,不能满足现场测量的要求。要实现简单快速地现场测量,其技术瓶颈在于精确传递测量基准的方法。

马骊群^[3]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,应用 2 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。刘万里^[4]为了优化多种检测方法相结合的大尺寸工件坐标测量方案的检测结果,提出了独立变量子系统的测量思想,有效地设置了各个测量系统的位置和方向等参数。朱世平^[5]讨论了机器视觉技术在大尺寸工件表面十字特征点坐标 3D 测量中的应用。刘晓利^[6]针对大型薄壳物体表面尺寸测量及在线检测的需求提出了多节点三维光学传感器测量网络的智能检测方法,完成了大尺寸、薄壳物体的内外表面深度数据的匹配和重建、尺寸获取及模型比对。张福民^[7]针对大型工件的几何量测量建立了多测量站的测量网络,研究了相应的多传感器信息融合方法来充分融合多测量站的信息。刘建伟^[8]针对工业制造领域中大型工件很难进行全尺寸测量的问题提出并实现了一种基于立体视觉技术的便携式工业测量系统,对该系统所采用的特征识别、相机定向、立体匹配、三维重建、多视点云配准等关键算法进行了研究。陈刚^[9]提出了一种在一个编码区内利用立体视觉传感器两次单元测量重叠区域内的公共光学编码点来完成多视点三维数据拼接的方法。劳达宝^[10]介绍了一种基于旋转平面激光单站测角、多站交汇的坐标测量系统,并对其校准方法进行了优化;分析了系统的测角方式和多传感器交汇测量的特点,阐述了基于传统方法的单基站方

位信息测量原理及系统结构。

在实际工程中,高精度直线导轨可以解决基准传递的问题,但在体积、可操作性、经济性等方面具有较大劣势;而前人的各项研究成果在测量系统的便携性和在线测量的实用性方面也受到不同程度的制约。因此,提出了建立零质量的公共方向基准,并将整体测量系统按照待测元素划分为多个子系统,经逐一测量再将所有结果综合处理来解决上述问题的方案。

通过对测量任务的分析,本文设计了一种基于公共光学基准的大尺寸空间异面直线夹角的测量系统。根据待测元素的具体分布情况,应用光学方法在数米至数十米的空间内建立统一的单光束或多光束方向基准,与待测元素公垂线的法平面共同构成测量基准系。在此基准系内,利用视觉检测技术和图像处理技术完成公共基准与各个待测元素之间夹角的检测,将大尺寸空间检测转化为常规的测量问题,成功完成了相距 6 997 mm 的几何元素之间空间异面夹角的在线测量任务。

2 测量原理

大型工程空间异面直线夹角的测量是通过采用线结构激光建立测量公共基准,结合机器视觉测量技术实现的。为明确起见,以实际工程某大型装备的空间角度测量任务为实例来说明系统的测量原理。测量目标为空间相距为 6 997 mm 的两条异面直线夹角,设计夹角为 85° ,要求检测精度为 $\pm 10'$ 。

如图 1 所示,待测元素分别是位于图中左侧工件上方的插拔孔的轴线和位于图中右侧 2 个对称的长度为 20 mm 的定向钮公共轴线,图中均以圆柱型标杆进行示意。以线性结构的激光光线作为测量的公共基准,并通过激光器将线结构光同时投射到 2 个待测轴线上。在待测元素前分别布置 2 个光轴彼此平行且均垂直于被测夹角投影面的 CCD 摄像机独立进行拍摄,获得被测轴线与基准光线夹角的清晰图像,将拍摄结果传送到计算机,通过计算机图像处理技术得到两条异面轴线的夹角数值。

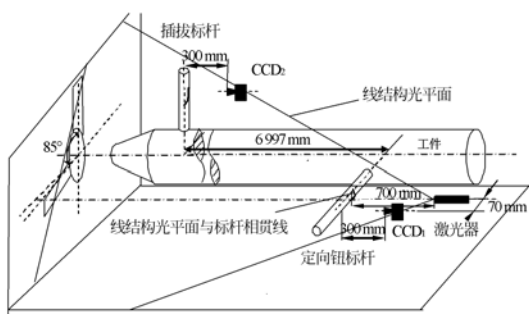


图 1 异面直线夹角激光测量系统原理图

Fig.1 Schematic of angle formed by non-uniplanar line measuring system

3 待测直线元素的体现方法

构成空间异面夹角的直线元素可分为有实体存在和无实体存在 2 种形式。对于以实体形式存在的直线元素,如果其本身具有较好的漫反射特性,可以直接将基准光线投射到其表面上并采用适当的光源(特定波长的背光)对其与公共基准光线的夹角进行测量。对于无实体存在的直线元素或不具备上述漫反射特性的实体直线元素,则需要设计专用的测量标杆来精确体现待测直线元素在空间中的方向。

实际工程中无实体存在的空间直线元素有很多类型。例如,定位平面的法线、圆柱体的轴线以及孔轴线等都属于无实体存在的空间直线元素。对于空间中多个定位平面的法线构成夹角的测量,可以借助直角尺来体现各个平面法线在空间中的方向。如图 2 所示, $A_1 \sim A_4$ 是工程中的 4 个定位平面,它们的法线构成的空间角度为待测异面夹角, $S_1 \sim S_4$ 是用来体现各个定位面法线方向的直角尺。当图 2 中的 y 轴方向为异面夹角的公垂线方向时,可将各个直角尺如图所示方式进行

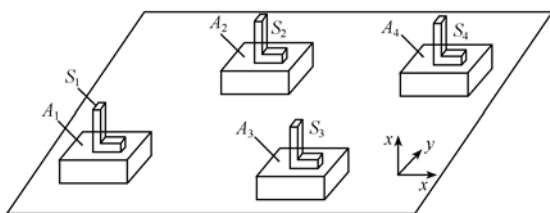


图 2 大尺寸空间基准面平行度检测原理图

Fig.2 Parallelism inspection of datum planes in large-scale space

布置来接收公共基准光线并根据测量原理对各个异面夹角进行测量。所采用直角尺的精度无需很高,其角度误差可以通过 180° 转位法进行补偿。在完成如图所示的一次测量过程后,可将各直角尺绕图中 z 轴旋转 180° ,进行第二次测量后取两次结果的平均值即可基本消除直角尺两直角边不垂直所引入的系统误差。

图 1 中插拔孔轴线和定向钮轴线在空间中均无实体存在,所以无法直接测量它们之间的角度。前者属于孔轴线范畴,后者属于圆柱体轴线范畴。二者在公垂线方向的设计距离为 6 997 mm。利用插拔标杆和定向钮标杆(见图 3、图 4)体现待测轴线的方向。通过对两个标杆轴线之间的角度进行测量,间接获得待测空间异面角度。

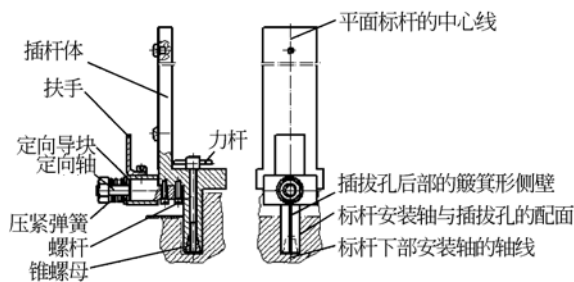


图 3 插拔标杆

Fig. Insertion target

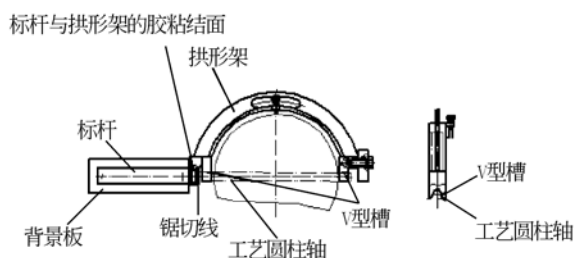


图 4 定向钮标杆

Fig.4 Orientation target

对于圆柱体轴线,可以采用 V 型槽的轴线对其进行实体体现。如图 4 所示,在定向钮标杆的两侧设计有采用拱形架相连的 2 个 V 型槽,与工件上的 2 个定向钮圆柱配合使用。在拱形架一端布置了一个矩形标杆,该标杆的轴向对称线与 2 个 V 型槽的轴线共线。在实际测量中,2 个 V 型槽横跨在对称于工件轴向的两个定向钮上,矩形标杆就成为了两定向钮的公共轴线的实体体现。

在进行异面直线夹角测量时,将线性结构光投射到两个标杆的工作面上,分别得到两个靶标与基准光线组成的封闭梯形图像,如图 5 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。

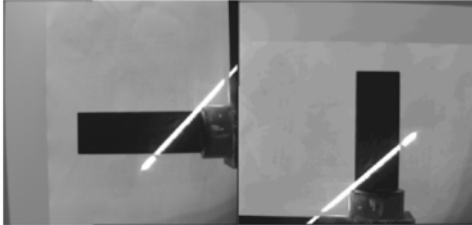


图 5 投射到标杆上的公共基准图像

Fig. 5 Common reference on the targets

通过 2 个 CCD 图像采集系统对定向钮标杆和插拔标杆进行拍摄。CCD 图像采集系统将所拍摄到的定向钮标杆图像、插拔标杆图像、对应定向钮标杆的公共基准光线 I 图像,对应插拔标杆的公共基准光线 II 图像分别传送到上位机后,根据图像数据经由预先设计好的软件程序进行图像处理和数据分析。

如图 6 所示,在分别得到定向钮标杆轴线、插拔标杆轴线、基准光线 I 和基准光线 II 的斜率后,

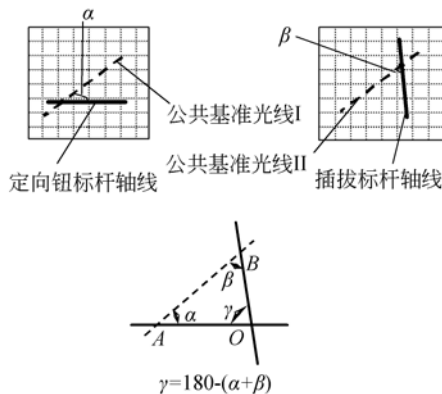


图 6 定向钮标杆与插拔标杆夹角 γ 计算示意图

Fig. 6 Schematic view of the angle γ between orientation target and insertion target

就可以计算出定向钮标杆轴线与基准光线 I 之间的夹角 α ,以及插拔标杆轴线与基准光线 II 轴线之间的夹角 β ,得到定向钮标杆与插拔标杆轴线之间的夹角:

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

为保证测量系统的检测精密度,需要增加光线和标杆轮廓的可利用长度。由于测量过程中基准光线的位置固定不变,没有必要对其进行重复测量,只要在每次测量中对基准光线进行若干次提取拟合并利用平均效应得到其在两个图像坐标系中的斜率即可。因此,设计专用的激光接收屏接收基准光线即可最大限度地利用基准光线和标杆的有效长度。

要说明的是,使用接收屏来接收基准光线,并不能保证接收屏与标杆的工作面共面,因此会引进误差。但当光平面的投射方向垂直于投影面的时候,该误差自然消除。实验证明,这个误差的大小与 $\pm 10'$ 的精度要求相比可略去不计。

4 光学基准的选择与建立方法

当 2 个被测对象只在其公垂线方向上相距甚远时,可以选用单线光学基准。它由一个线结构激光平面构成。利用柱面透镜将点光源展开可以形成线结构光,但由于所得光平面宽度有限以及光强呈高斯分布,不适合用作远距离方向基准。作为大尺寸空间的公共光学方向基准,激光器发出的线结构激光不仅要有足够大的扇角,而且要在长达几米或十余米的投射距离内保持均匀的光强。在本测量系统设计中,选用的是基于鲍威尔透镜(Powell lens)的笔式半导体激光器,可直接输出扇状的线结构激光。该激光器的出射光强在光截面方向上呈平均分布,与传播距离无关。该特性满足高质量光学基准的要求,能够使系统获得强度均匀、清晰稳定、边缘齐整的基准图像。通过三旋转自由度工作台可以实现激光器在三维方向上的位姿精细调节。

现场测量中,大气扰动及温度梯度的分布等因素将对激光传播方向产生一定的影响。在建立基准的过程中,选用光强均匀度最佳的部分可在一定程度上削弱上述因素的作用,基于系统测量对象为角度量以及系统的测量精度要求,在 10 m 测量距离内该误差可以被忽略。

5 系统框架设计

系统设计中采用了兼具系统标定和基准光线接收功能的专用标定板,几何尺寸为 220 mm \times

180 mm。为了使系统在具有足够测量精度的同时具有足够的稳定性及可操作性,系统测量框架的主要参数的设计指基准光线的布置方式。

由于 CCD 的视场相对于工件固定不变,因此应使标定板上体现标杆的刻线和相应测量标杆在视场中的位置尽可能一致;另一方面,应使光线与两根标杆的夹角相同,达到平均效应。基准光线与水平线的夹角约为 42.5° 。以工件轴线的投影作为原点, x 轴正方向水平向右, y 轴正方向垂直向上建立坐标系,插拔标定板对称中心点坐标为 $(0, 300)$,定向钮标定板对称中心点坐标为 $(-330, 0)$ 。两块标定板对称中心的连线斜率为 1。

基准光线的位置设计方案如图 7 所示,两块标定板的中心连线 MN 与之平行。基准光线通过定向钮标定板的 G 点 $(-330, 65)$,其方程为:

$$y = \frac{1}{1.1} \times x + 365. \quad (2)$$

基准光线投射到两块标定板上的设计长度与其和标定板边缘的两个交点位置相关。设标定板上的基准光线的长度为 L ,由基准光线方程可知 C 点坐标为 $(-110, 265)$, D 点坐标为 $(27.5, 290)$ 。由此可得:

$$L = \sqrt{(-110 - 27.5)^2 + (265 - 390)^2} = \sqrt{137.5^2 + 25^2} \approx 185.83 \text{ mm}. \quad (3)$$

图 7 中 E 点 $(-308, 85)$ 为激光器的出光点,其使激光出射位置高于定向钮标定板的上边沿,保证插拔标定板能够接收到完整的光线。同时,使激光器绕光平面的法向量沿逆时针方向旋转一定的角度,保证两块标定板上的光线长度相等,经计算该角度约为 5° ,系统框架设计如图 8 所示。

6 实 验

6.1 实验 1:系统测量重复性精度实验

为了获得系统测量重复性精度,将定向钮标杆和插拔标杆分别装配到工件的定向钮和插拔机构上,在环境光照稳定的条件下保持 CCD 及工件位置恒定,在求取到基准光线 I 和基准光线 II 的斜率后对两根标杆的轴线进行重复拟合并计算它们与对应基准光线的夹角,CCD 感光面到标杆工作面的距离为 300 mm。实验中,对两标杆的夹角进行 30 次测量,在 0.5 h 的测量过程中,环境光照稳定,

系统无显著漂移现象。每次测量前重新安装测量标杆及对应 CCD 传感器,系统测量重复性精度达到 $\pm 0.020 85^\circ$,满足实际测量任务要求。

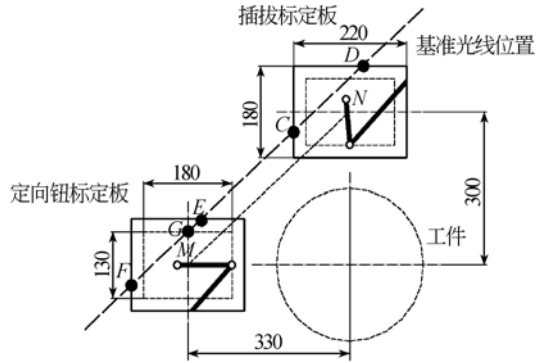


图 7 基准光线的位置设计
Fig. 7 Position design of common reference

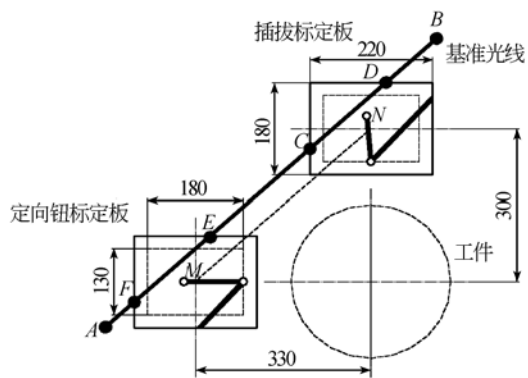


图 8 系统框架设计
Fig. 8 Design of system framework

6.2 实验 2:标定板装配误差实验

为了获得由于标定板与标杆工作面不共面而造成的光线位置偏折误差,将两块标定板以叠放的方式进行固定(如图 9 所示),距离 CCD 感光面 300 mm。将基准光线投射到两块板上,使两板由



图 9 标定板装配误差实验
Fig. 9 Experiment of assembling error of calibration boards

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段所夹角度,获得由于两板不共面而造成光线偏折程度。

当线结构激光的 2 个接收平面之间不平行且存在的偏摆方向夹角为 8.77° 时,由此所造成的 2 条基准光线的夹角约为 0.0064° 。当 2 个接收平面之间不平行且存在的俯仰方向夹角为 9.46° 时,如图 9 所示,由此所造成的 2 个激光光条的夹角约为 0.0084° 。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,但该因素对测量产生的影响是非常有限的,所引进的测量精度误差可以予以忽略。

表 1 系统重复性精度实验结果

Tab. 1 Results of system repeatability ($^\circ$)

| 序号 | 定向钮标杆与基准光线 I 夹角 | 插拔标杆与基准光线 II 夹角 | 定向钮标杆与插拔标杆夹角 |
|----|------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 46.777 2 | 51.016 2 | 82.208 |
| 2 | 46.773 9 | 51.006 1 | 82.220 |
| 3 | 46.775 1 | 51.016 0 | 82.209 |
| 4 | 46.782 0 | 51.006 0 | 82.212 |
| 5 | 46.783 8 | 51.016 2 | 82.200 |
| 6 | 46.778 5 | 51.010 1 | 82.211 |
| 7 | 46.772 7 | 51.009 4 | 82.218 |
| 8 | 46.777 7 | 51.020 1 | 82.202 |
| | 测量结果标准差 δ | | 0.006 95 |
| | $\pm 3\delta$ | | $\pm 0.020 85$ |

参考文献:

- [1] 马骊群,王立鼎.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):125.
MA L Q, WANG L D. Traceability status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments [J]. *Measurement Technique*, 2006, 26(6): 125. (in Chinese)
- [2] 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.
SHAO J X, QIU Z X, YUAN J, et al.. Research

表 2 标定板装配误差实验结果

Tab. 2 Assembling errors of calibration boards ($^\circ$)

| 偏摆角度 | 光线段夹角 | 俯仰角度 | 光线段夹角 |
|------|-----------|------|-----------|
| 0 | 0.000 489 | 0 | 0.000 201 |
| 1.91 | 0.002 217 | 2.51 | 0.004 294 |
| 4.94 | 0.004 193 | 6.95 | 0.006 000 |
| 5.71 | 0.004 601 | 8.61 | 0.008 140 |
| 8.77 | 0.006 442 | 9.46 | 0.008 391 |

7 结 论

提出了基于公共光学基准的大尺寸空间异面直线夹角检测系统的设计方案。根据待测元素的具体分布情况,应用光学方法在数米至数十米的空间内建立统一的单光束或多光束方向基准,与待测元素公垂线的法平面共同构成测量基准系,实现了零质量公共方向基准的建立。在此基准系内,完成公共基准与各个待测元素之间夹角的检测,将大尺寸空间检测转化为常规的测量问题,成功完成了相距 6.997 m 的几何元素之间空间异面夹角的测量任务。测量系统重复性精度达到 $\pm 0.02085^\circ$,具有精确、柔性、便携和经济的特点,同时由于测量系统不依赖于机械检测平台的加工精度和装配精度,很大程度降低了检测任务对于工程单位的要求,具有重大的军事经济价值和积极的研究意义。

on adaptive tracing measurement method used for wide-range free-form surfaces [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(9): 1045-1047. (in Chinese)

- [3] MA L Q, WANG L D, CAO T Z, et al.. A large-scale laser plane calibration system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(6): 1768-1772.
- [4] LIU W L, WANG ZH K. Coordinate uncertainty analyses of coupled multiple measurement systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(6): 065103.
- [5] ZHU S P, GAO Y. Noncontact 3-D coordinate

measurement of cross-cutting feature points on the surface of a large-scale workpiece based on the machine vision method[J]. *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1874-1887.

- [6] 刘晓利,彭翔,殷永凯,等. 大尺寸薄壳物体表面的三维光学自动检测[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 128-134.

LIU X L, PENG X, YIN Y K, *et al.*. 3D auto-inspection for large thin-wall object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3):128-134. (in Chinese)

- [7] 张福民,曲兴华,叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合[J]. *光学精密工程*, 2008, 12(7):1236-1240.

ZHANG F M, QU X H, YE S H. Multiple sensor fusion in large scale measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 12(7):1236-1240. (in Chinese)

- [8] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):126-134.

LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 126-134. (in Chinese)

- [9] 陈刚,姚英学. 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1309-1314.

CHEN G, YAO Y X. 3d datum mosaic method of multi-view and large scale based on optical coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1309-1314. (in Chinese)

- [10] 劳达宝,杨学友,郝继贵,等. 扫描平面激光坐标测量系统校准方法的优化[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):872-877.

LAO D B, YANG X Y, ZHU J G, *et al.*. Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):872-877. (in Chinese)

作者简介:



胡文川(1983—),男,天津人,博士研究生,2006年于河北工业大学获得学士学位,2008年于天津大学获得硕士学位,主要从事精密测试及智能仪器方面的研究。E-mail: hwm921@yahoo.com.cn



张国雄(1936—),男,上海人,教授,博士生导师,天津市荣誉计量测试技术及仪器专家,主要从事精密机械设计、精密仪器设计、传感器等方面的教学和科研工作。E-mail: gxzhang@tju.edu.cn

导师简介:



裘祖荣(1958—),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事精密机械设计、精密仪器设计、传感器等方面的教学和科研工作。曾赴英国 Kingston 大学和新加坡 Gintic 制造技术研究院工作,从事国际合作项目研究。E-mail: qzr@tju.edu.cn