

# 基于梯形棱镜的激光三角法内孔测距传感器

熊志勇 赵斌

(华中科技大学 机械科学与工程学院仪器科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了实现对孔类零件特别是深孔零件的孔深测量及底面的表面形貌测量,设计了一种激光三角法内孔测距传感器。对该传感器所使用的机械光学设计、系统成像特性及基于 Zemax 的像差分析与评价等进行了研究。首先,利用聚焦透镜将激光器发出的光线聚焦到待测面上,使光斑足够小。接着,利用梯形棱镜的全反射特性将所需散射光线限制在一个狭小的范围内。最后,利用成像透镜将光线聚焦在 CCD 靶面上,根据 CCD 上光斑的位置和待测孔深的几何关系,求出内孔的深度和底面的表面形貌。实验结果表明,系统在 0~1.6 mm 范围内测量精度为 1  $\mu\text{m}$ ,该设计可以很好的解决测量内孔时物理空间受限的问题,同时结合三角测量原理,使该系统能够满足工业生产线上的结构简单、稳定性好、调试和维护方便、精度高以及速度快等要求。

**关键词** 测量;孔深测量;激光三角法;全反射;亚像素精度

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1212001

## Inner Hole Range-Finding Sensor with Laser Triangulation Based on Trapezoid Prism

Xiong Zhiyong Zhao Bin

(Department of Instruments Science and Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** In order to realize the inner-hole-depth measurement and the profile of the bottom surface measurement of parts with holes, especially deep-hole parts, an inner hole measuring sensor with laser triangulation was designed. The applied designs such as mechanical structure and optical designs, system imaging characteristics, and the analysis and evaluation of optical aberration based on the software Zemax were investigated. First of all, by using focusing lens, the laser light is focused to the surface to be measured, and flare is small enough. Then, put the required scattering light limit in a narrow range using the trapezoid prism total reflection characteristics. Finally, an imaging lens is used to make light focalize on CCD target surface. According to the geometric relation between the flare on CCD and hole depth, the depth of the hole and the profile of the bottom surface was calculated. Experimental results indicated that the measurement precision can reach 1  $\mu\text{m}$ , and the design of using trapezoidal prism can well solve the problem of physical space limited as measuring inner hole. The combination with the principle of laser triangulation technique makes the system satisfy the requirements of simple structure, stabilization, higher precision and rapid speed.

**Key words** measurement; hole depth measuring; laser triangulation; all-reflection; subpixel accuracy

**OCIS codes** 120.2830; 120.3620; 120.4640; 120.4570; 100.2000

## 1 引言

随着机械工业、航空工业以及国防工业的不断发展,孔轴类零件的加工以及配合成为机械加工过程中的一个重要的环节,在对小尺寸孔或轴类零件

提出精密或超精密加工的同时,也对其检测精度提出了更高的要求。孔类零件和轴类零件相比,在具有相同公差等级的情况下,前者的测量要更困难些<sup>[1]</sup>。

**收稿日期**: 2011-06-06; **收到修改稿日期**: 2011-06-30

**基金项目**: 国家 973 计划(2007CB714000)资助课题。

**作者简介**: 熊志勇(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光精密测量方面的研究。E-mail: xiongzhiyong2004@126.com

**导师简介**: 赵斌(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光光电检测方面的研究。E-mail: zhaobin63@yahoo.cn

现今对孔深的检测手段主要有机械方法、电学方法和光学方法等。机械方法主要有千分尺法、触针法<sup>[2]</sup>和三坐标测量机测量的方法；电学方法主要有电容法<sup>[3]</sup>；光学方法主要有光切法<sup>[4]</sup>、机器视觉<sup>[5]</sup>和光纤法等。随着科学技术和工业自动化的发展，传统的机械式孔类零件的检测方法在检测的精度及速度上慢慢赶不上机械发展的时代的要求，而且随着工业自动化的生产线的建立，以及对产品无损伤检测的要求，非接触光学测量的方法慢慢地成为主流测量手段。激光三角测量以其结构简单、测量精度高以及速度快等优点，在几何量光学测量中有着巨大的优势<sup>[6~8]</sup>。本文结合激光三角测量和梯形棱镜发生全反射能够改变光路的特点，设计出一种新型的激光三角法内孔测距传感器。

## 2 传感器工作原理

### 2.1 工作原理

基于梯形棱镜的激光三角法内孔测距传感器工作原理如图 1 所示，等效光路图如图 2 所示。传感器由激光器、激光器聚焦透镜、梯形棱镜、孔径光阑、成像透镜和 CCD 组成。具体工作原理为当测量孔深时，将此传感器下端置于待测孔内合适位置。此时，激光器发出的激光经聚焦透镜后将光线汇聚投射到待测孔的内底面，产生一个圆形光斑。此光斑经过内底面发生漫反射后，部分光线进入梯形棱镜，其中有部分光线满足发生全反射的条件且能通过孔径光阑正常出射。然后，从梯形棱镜出射的光线依次经孔径光阑和成像透镜后对漫反射光线进行聚集成像，出射光线成像于 CCD 的靶面上。最后，CCD 靶面上的图像经图像处理计算出采集到的光斑重心，再根据标定的零位即可求出光斑重心偏移量  $\Delta x$ ，再利用所求重心偏移量  $\Delta x$  与被测孔深度变化  $\Delta h$  的对应函数关系，即可得到孔深数据  $H$ 。

本文提出的激光三角法内孔测距传感器利用梯形棱镜光学全反射原理将光路约束在一个狭小的空间内，巧妙的解决了在测量孔深的过程中遇到的物理空间受限的问题，且采用了激光三角法测量原理<sup>[7]</sup>，小视场光路设计，可以忽略光学系统的畸变，具有结构简单、便于装配和调试、受外界干扰小、精度高和速度快等优点<sup>[8]</sup>。本设计相较于电容法、光切法等方法具有以下优点：1) 采用梯形棱镜来约束光路，因此，受光路物理空间的限制大大减弱；2) 采用梯形棱镜来约束光路且利用光学全反射原理，因此，光能利用率大大提高；3) 采用激光三角测量法进

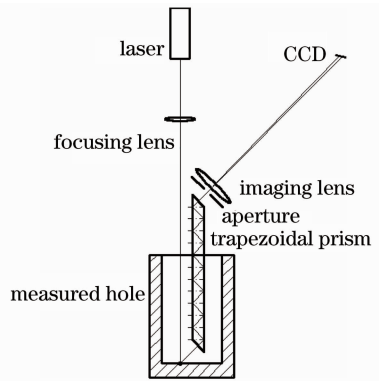


图 1 内孔测量传感器原理图

Fig. 1 Principle diagram of hole-depth measuring sensor

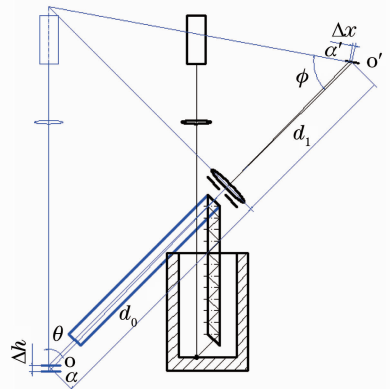


图 2 等效光路图

行测量，结构简单，稳定性好，测量精度高<sup>[9]</sup>；4) 系统设计简单，所需元件较少，有效减少了制造装配误差对测量系统的影响，同时便于系统的装配调试。

### 2.2 系统的物象位置关系

图 1 中主视图反应了传感器中各部件之间的相对位置关系，梯形棱镜侧边与激光器发出的光线平行且基准位置的光线从下表面中心垂直入射，梯形棱镜上表面中心垂直出射的光线通过成像透镜的光心。且等效激光器光轴、CCD 光轴、成像透镜垂轴延长线交于一点，如图 2 中等效光路图所示，满足三角测量的角度关系。测量孔深的梯形棱镜的长度应使得光线进入梯形棱镜经过偶数次全反射，否则光线不能进入孔径光阑。为保证光线进入梯形棱镜后发生全反射，激光器发出光线的光轴和进入下梯形棱镜的光线的夹角  $\theta$  必需小于临界角  $\beta$ ，即  $\theta < \beta$ ， $\beta$  可根据发生全反射的条件及梯形棱镜的折射率求出。由激光三角法可知，当  $\theta$  逐渐减小时，成象系统的放大倍率不断减小，分辨率不断下降，故  $\theta$  不宜太小。本设计取梯形棱镜夹角  $\alpha = 45^\circ$ ，由发生全反射的条件可以算出极限入射角  $\beta = 49.79^\circ$ ，为了计算方便

本设计取基准点角度  $\theta = 45^\circ$ 。在本传感器中梯形棱镜尺寸取为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ，孔径为  $25\text{ mm}$ ，孔深为  $45\text{ mm}$ 。此光学系统结构上的设计保证了不管待测表面上有油污、刀痕或其他表面缺陷，测量光路在梯形棱镜内均能发生全反射而与待测表面无关。测量系统实物图如图 3 所示，此传感器可以测量待测孔径大于  $7\text{ mm}$ ，孔深小于  $40\text{ mm}$  的内孔。由图 2 中传感器的等效光路图，根据三角测量物像位置关系<sup>[10]</sup>有

$$\Delta h = \frac{\Delta x d_0 \sin \varphi}{d_1 \sin \theta - \Delta x \sin(\theta + \varphi)}, \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{\Delta h d_1 \sin \theta}{d_0 \sin \varphi + \Delta h \sin(\theta + \varphi)}, \quad (2)$$

$$H = h + \Delta h, \quad (3)$$

式中  $H$  为孔深， $h$  为标定的零位对应的孔深， $d_0$  为成像透镜光轴上的等效物距， $d_1$  为成像透镜光轴上的等效像距， $\theta$  为透镜光轴与入射激光光轴的夹角； $\varphi$  为透镜光轴与 CCD 受光面夹角， $\Delta x$  为光斑中心相对标定零位的变化量， $\Delta h$  为孔深相对基准点的变化量。如果移动待测孔或者传感器的位置，即可根据  $\Delta h$  的值实现内孔底面的三维表面形貌测量。由图 4

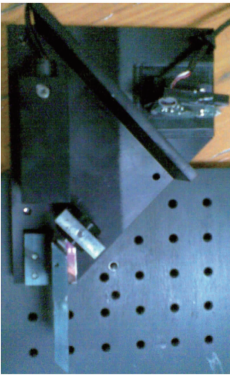


图 3 传感器实物图

Fig. 3 Physical figure of the sensor

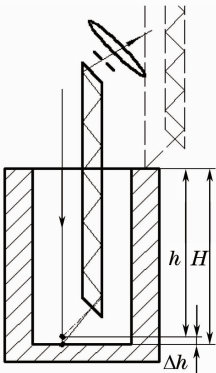


图 4 测量基准确定示意图

Fig. 4 Schematic of determination of measurement standard

可知， $h$  为待测孔上表面与测量孔底面标定零位的高度差，其中上表面的位置可由三角测量传感器直接测出，由(1)~(3)式即可得出待测孔深  $H$ 。

### 3 光学系统分析与模拟

#### 3.1 系统成像特点

由于本系统采用梯形棱镜的全反射特性来进行孔深测量，那么就会导致系统出现由于全反射而出现的多个像点的问题，即每一次全反射就会出现一个像。具体成像特性由图 5, 6 所示，图 5 为光线垂直入射时全反射成像的情况，图 6 为光学设计软件 Zemax 在非序列模式下的模拟。由图 5 可知，在理想情况下(光线垂直入射的情况)，像点 A, B, C 可以通过孔径光阑最后在 CCD 上成像，像 D 由于梯形棱镜口径及孔径光阑的限制而无法在 CCD 上成像。由图 6 可知，A 点的像能够沿着成像透镜的光轴垂直出射，上面两束光束依次为 B, C 像的出射光束，由图可知 A 像光束下方还有一束光束，但强度明显小于上面三束光束，故此光束为全反射次数为 7 次所成的像，入射角度大于  $\theta$ 。故在本光学系统的设计中，除垂直出射的光束外，其他光束均需通过挡光板进行遮挡。当然也可以利用此特点实现 CCD 量

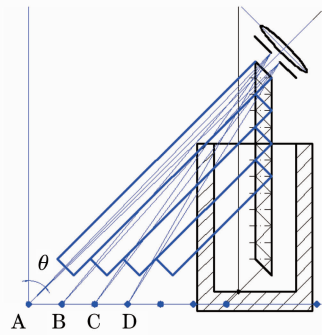


图 5 系统成像特性

Fig. 5 System imaging characteristics

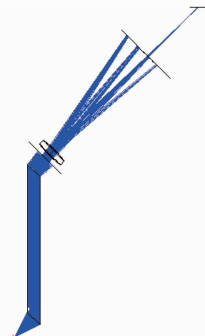


图 6 Zemax 光路模拟

Fig. 6 Zemax light path simulation

程的扩展,具体还需进一步研究。

### 3.2 Zemax 光学模拟

本设计在序列模式下的 Zemax 模拟及像差分析等如下图 7~10 所示。图 7 为光学系统的等效成像光路图,由图可知,此光学系统接近为一个 1:1 的线性无畸光学系统<sup>[11]</sup>,采用 1/4 英寸 CCD,物理尺寸宽为 3.2 mm,系统测量量程约为 2 mm。由图 8 可知,此光学系统在 CCD 上的理论光斑最大为 5.5  $\mu\text{m}$ ,在 CCD 上约占 2~3 pixel,满足亚像素精

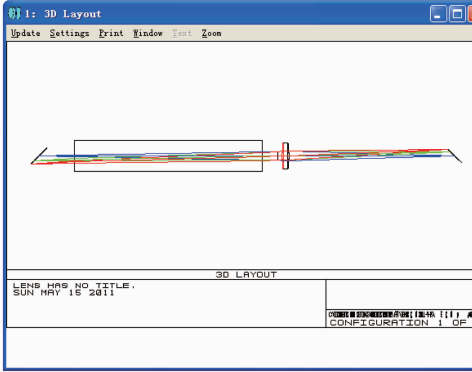


图 7 成像光路图

Fig. 7 Map of imaging light path

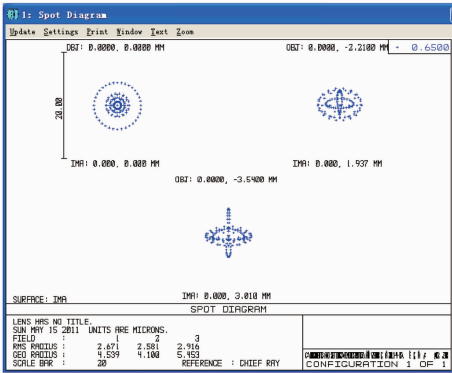


图 8 点列图

Fig. 8 Spot diagrams

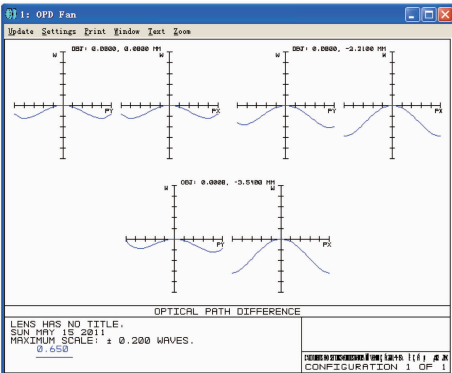


图 9 波像差曲线

Fig. 9 Wavefront aberration curves

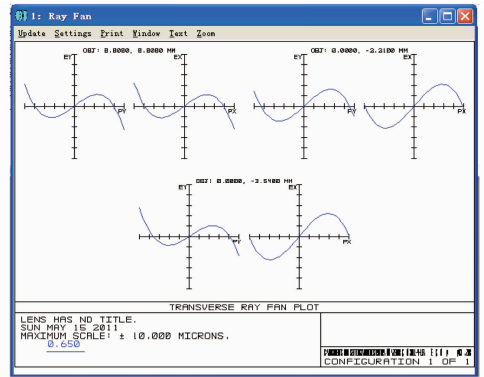


图 10 像差曲线

Fig. 10 Aberration curves

密测量的要求<sup>[12,13]</sup>。图 9 和图 10 分别为波像差曲线图和像差曲线图,由图可知,光学系统的像差在  $\pm 10 \mu\text{m}$  以内,波像差在  $\pm 0.2 \lambda$  以内满足瑞利判据要求,均满足光学系统的设计要求。

经实验激光器发出的光束直径在传感器量程范围内,为 20~60  $\mu\text{m}$ ,满足精密测量小光斑的要求,而 CCD 上光斑像为 50  $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ,占 5 pixel  $\times$  3 pixel 与系统衍射光斑尺寸相符合,故可认为此光学系统满足精密测量的要求。

### 4 传感器标定及精度评价

由上述可知,本光学系统是一个近似线性无畸变光学系统,但是由于实际光学系统存在制造装配等误差,实际的物象位置关系并非线性的,故本传感器需采用非线性方法进行标定<sup>[14,15]</sup>。本传感器使用精密位移工作台来进行标定,采用 0.000, 0.200, ..., 和 2.00 mm 共 11 个不同的位置进行标定,每个位置测量 10 次,然后对这 11 组数据进行曲线拟合,标定曲线如图 11 所示。图 11 中分别为 1 次、2 次、3 次曲线拟合,对应残差如图 12 所示。由图 12 可知,2 次比 1 次残差明显小,而 3 次跟 2 次残差相

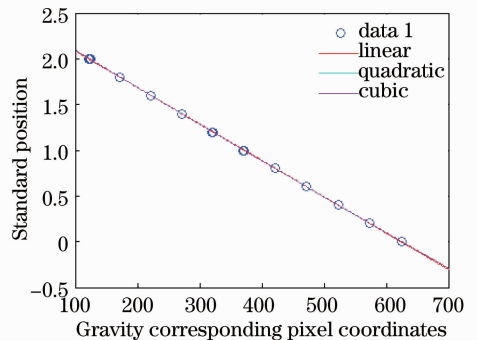


图 11 标定曲线

Fig. 11 Calibration curve

差不大,故本传感器采用2次曲线拟合。

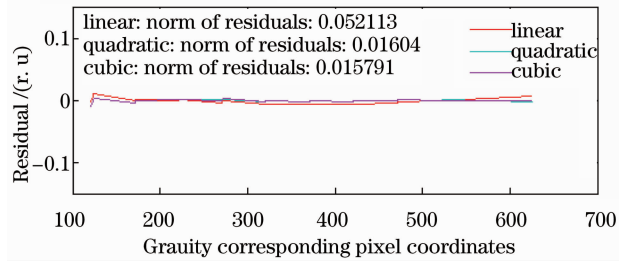


图12 残差分析图

Fig.12 Residual figure

拟合多项式为

$$\Delta h = 2.1243 \times 10^{-7} \cdot \Delta x^2 - 0.0041415 \cdot \Delta x + 2.5068, \quad (4)$$

表1 系统测量数据

Table 1 System measurement data

Measurement serial number	Actual value /mm	Measurements /mm	Absolute error / $\mu\text{m}$	Relative error /%
1	0.1	0.0993	-0.7	0.7
2	0.2	0.1999	-0.1	0.05
3	0.3	0.2991	-0.9	0.3
4	0.4	0.4000	0.0	0.0
5	0.5	0.5004	0.4	0.08
6	0.6	0.6005	0.5	0.08
7	0.7	0.7001	0.1	0.01
8	0.8	0.8005	0.5	0.06
9	0.9	0.9015	1.5	0.17
10	1.0	1.0017	1.7	0.17
11	1.1	1.0999	-0.1	0.01
12	1.2	1.1999	-0.1	0.01
13	1.3	1.3002	0.2	0.02
14	1.4	1.4009	0.9	0.06
15	1.5	1.5010	1.0	0.07
16	1.6	1.6006	0.6	0.04
17	1.7	1.7034	3.4	0.2
18	1.8	1.8046	4.6	0.26
19	1.9	1.9004	0.4	0.02
20	2.0	1.9943	5.7	0.29

## 5 结 论

根据现代工业检测精度高、速度快的要求,设计出了一种基于梯形棱镜的激光三角法内孔测距传感器,并介绍了该传感器的结构、工作原理及成像分析。然后采用光学设计软件 Zemax 对该传感器的光学系统进行模拟及像差分析与评价。最后,介绍了该传感器的标定方法及验证其测量精度和重复性精度。根据本传感器的原理,如果减小梯形棱镜的宽度及增加梯形棱镜的长度,及改变与之匹配的成

式中  $\Delta h$  为孔深变化量,  $\Delta x$  为像点移动量对应像素值。根据标定曲线, CCD 上光斑的重心坐标都对应一个测量的孔深, 求出光斑在 CCD 上的重心坐标即可求得待测孔深度。采用(4)式所用多项式进行标定后, 利用标准件进行精度评定, 测量数据如表1所示。由表1可知系统在0~1.6 mm测量范围内绝对误差不超过2  $\mu\text{m}$ , 相对误差不超过0.7%, 且在此范围内经验证, 系统重复性精度不大于0.1  $\mu\text{m}$ , 故可认为此系统可实现1  $\mu\text{m}$ 的精密测量。在1.6~2.0 mm范围内, 由于梯形棱镜的平行度误差及表面误差等因素的影响, 在此范围内成像光斑弥散且光强较弱, 故误差较大达到5.7  $\mu\text{m}$ , 具体原因有待进一步研究。

像透镜, 即可测量更深更小孔径的内孔。本传感器除了增加一个梯形棱镜来减小探头的尺寸外, 其他设计均与普通的三角测量一致, 只是改变了测量时物理空间受限的条件, 故具有激光三角测距的全部优点。实验结果证明, 本传感器可以测量小孔内底面表面起伏小于2 mm的小孔, 且测量精度可以达到1  $\mu\text{m}$ 的亚像素精密测量。

## 参 考 文 献

1 Xie Tiebang, Li Zhu, Xi Hongzhuo. Interchangeability &

- Technical Measurement[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. 36~98
- 谢铁邦, 李柱, 席宏卓. 互换性与技术测量[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. 36~98
- 2 Fu Donghua. Small blind hole depth measuring special fixture [J]. *Tool Engineering*, 2007, (12): 102  
付东华. 小盲孔深度测量专用检具[J]. *工具技术*, 2007, (12): 102
  - 3 Wang Baoguang, Zhang Heng, Qian Zhengyu *et al.*. Research on precise measurement of blind hole depth[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, **27**(3): 228~231  
王宝光, 张恒, 钱征宇等. 盲孔深度的精确测量方法研究[J]. *计量学报*, 2006, **27**(3): 228~231
  - 4 Xu Zhiling. The method of blind hold depth measurement[J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2001, (6): 12~14  
徐志玲. 盲孔深度测量方法[J]. *计量与测试技术*, 2001, (6): 12~14
  - 5 Yue Xiaofeng, Sun Dahai. Precise apertures measurement by using machine vision technology[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2006, (4): 79~82  
岳晓峰, 孙大海. 零件孔径视觉精确测量研究[J]. *控制与检测*, 2006, (4): 79~82
  - 6 Dai Liming, Jiang Tongjun. The laser triangulation measuring sensor for accurate displacement measurement[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1994, **15**(4): 400~404  
戴立铭, 江潼君. 激光三角测量传感器的精密位移测量[J]. *仪器仪表学报*, 1994, **15**(4): 400~404
  - 7 Chen Genyu, Chen Guogui, Huang Kong *et al.*. Study on the accuracy for laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1278~1281  
陈根余, 陈国桂, 黄孔等. 激光修整青铜金刚石砂轮精度研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1278~1281
  - 8 Xu Wanhe, Li Zhongxin, Wu Zhilin *et al.*. Motion test method based on laser triangulation measurement principle for automatic mechanism[J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2010, **24**(3): 215~218  
徐万和, 李忠新, 吴志林等. 基于激光三角测量原理的自动机运动测试方法[J]. *测试技术学报*, 2010, **24**(3): 215~218
  - 9 Chen Ji, Wang Xin, Cao Jiuda *et al.*. Development of high-speed CCD laser displacement sensor [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(4): 611~616
  - 10 Wu Jianfeng, Wang Wen, Chen Zichen. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2003, **20**(5): 89~91  
吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. *机电工程*, 2003, **20**(5): 89~91
  - 11 Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan *et al.*. Spot distortion calibration in measurement of laser intensity distribution based on imaging by scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 451~455  
庞森, 袁学文, 高学燕等. 散射成像法测量激光强度分布中的光斑畸变校正[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 451~455
  - 12 Liao Feihong, Li Xiaoping, Chen Xuedong *et al.*. Probe spot position error on the accuracy of focusing and leveling measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1041~1045  
廖飞红, 李小平, 陈学东等. 调焦调平探测光斑位置误差对测量准确度影响的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1041~1045
  - 13 Fang Guanming, Cao Yiping, Zhou Liping. Analysis on the position sensitive detector positioning error caused by laser spot using new three-ray model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **36**(4): 954~958  
方关明, 曹益平, 周力萍. 采用三线位置敏感探测器定位模型分析光斑对定位精度的影响[J]. *光学学报*, 2009, **36**(4): 954~958
  - 14 Huo Changjuan, Zhang Hua, Deng Xi. The research and implement of the camera calibration [J]. *J. Tianjin University of Technology*, 2007, (5): 75~77  
霍长娟, 张桦, 邓熹. 几种摄像机标定方法的比较[J]. *天津理工大学学报*, 2007, (5): 75~77
  - 15 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943~948  
郝继贵, 李艳军, 叶声华等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 943~948

栏目编辑: 谢婧