

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-06

多线阵 CCD 位姿测量光学系统

胡英辉*, 袁峰, 李凯, 王艳

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对悬浮试验场内飞行物体的高精度姿态测量,提出了采用面阵 CCD 辅助识别的多线阵 CCD 姿态测量系统。设计了采用柱面镜组构成的线阵 CCD 专用成像镜头。在被测飞行物体上安装 3 个红色发光二极管(LED)光点作为合作目标,2 个面阵 CCD 和 3 个线阵 CCD 同时对光点成像,通过测量光点空间位置坐标,计算出飞行物体的姿态高度。线阵 CCD 光学镜头选用(635 ± 15) nm 的红光作为工作标段,设计的全视场角为 19°,焦距为 90.04 mm。系统采用 7 片柱面镜和 1 片红色滤光片组成像方远心光路,从而有效消除像差,实现大景深测试。测试结果表明:设计的镜头畸变优于 0.05%,景深可达 1.5 m,可配合线阵 CCD 实现高精度测试。

关键词:姿态测量;线阵 CCD;像方远心光路;柱面镜组

中图分类号:V448.22;TN386.5 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Multiple linear CCD pose measuring optical system

HU Ying-hui*, YUAN Feng, LI Kai, WANG Yan

(College of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: foxhyh@163.com

Abstract: For the high precision attitude measurement of flying objects in a suspension test field, a multiple linear CCD attitude measurement system with an area array CCD as auxiliary recognition was proposed. A special imaging lens consisting of cylindrical lenses was designed for the linear CCD. Three red Light Emission Diodes(LEDs) were mounted on a flying object to be as cooperation targets, while two area array CCDs and three linear CCDs were utilized to image for the light spots. Finally, the attitude angles of the fly object was obtained by measuring the space position of the light spots. The working region of the linear CCD optical lens is at wavelength (635 ± 15) nm, the full angle of view is 19° and the focal length is 90.04 mm. Seven pieces of cylindrical lenses and a piece of red filter were used to compose a telecentric optical path of image space, which effectively eliminates the aberration and completes the measurement for a larger depth of field. The results show that the lens distortion is less than 0.05%, and the depth of field is up to 1.5 m. The designed system achieves high accuracy measurement by combining linear array CCDs and special imaging systems.

Key words: attitude measurement; linear CCD; telecentric optical path of image space; cylindrical lenses

收稿日期:2015-06-01;修订日期:2015-06-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075095)

1 引言

光学测量技术随着相机及相关技术的发展有了长足的进步。利用视觉技术测量飞行物体的姿态,具有结构简单、非接触、精度高、实时性强等优点,因此成为当今姿态测量中较为重要的方法。相较于面阵 CCD,线阵 CCD 具有更高的分辨率及采样速度,其数据量更小,易于实现实时测控。

基于线阵 CCD 的测量大多采用线扫结构,但较少用于姿态测量的场合。最早用线阵 CCD 进行动态测试的是 Macellari 的 COSTEL^[1-2] 系统,它采用线阵 CCD 追踪光点的三维运动轨迹。加拿大 NDI 公司的 Optotrak^[3] 应用三线阵 CCD 测量人体姿态,在人体的不同部位安装多个红外 LED 光点,逐个点亮 LED 进行测试。清华大学秦志军^[4-5] 等人在大型射电望远镜的测试上运用线阵 CCD 组进行了大视场、高精度的位置测试。以上应用提到了柱面镜,但均未对镜头做出详细说明。浙江大学王丰^[6] 等人设计了用于光点位置平面测量的线阵 CCD 镜头,该镜头采用两级结构,前级采用球面镜聚光,后级采用柱面镜将光点成像为直线,其畸变为 1.6%,畸变较大且景深较小,不适合空间高精度测量。

与常见的光学平面测试相比,在地面试验场上飞行物体的姿态测量^[7-9] 对镜头的景深要求更高。高精度的飞行物体测试不仅对相机提出了更高的要求,还对镜头的光学系统设计、镜片及机械加工、系统装调提出了越来越高的要求^[10-11]。由于线阵 CCD 只有单方向像素,当它应用于空间目标坐标测量时,无法像面阵 CCD 那样使用普通球面镜组成的通用镜头。而柱面镜具有点成像为线的特性,可以有效减小球差和色差,特别适合于配合线阵 CCD 进行飞行物体的空间位置测试。本文应用柱面镜特殊的成像特性,设计了基于像方远心光路的光学镜头。该镜头满足系统大视场、大景深、低畸变的要求,配合线阵 CCD 可实现飞行物体的高精度姿态测量。

2 系统工作原理

本文采用 2 个面阵 CCD 相机和 3 个线阵 CCD 相机构成测试系统,使用 3 个红色 LED 作为

合作标志点。将 3 个红色 LED 标志点安装在被测飞行物体上,3 个光点不共线且空间位置关系已用坐标机测定,光点与飞行物体的关系同样事先测定。通过测量光点的空间坐标,由姿态角的定义可知,已知被测物体纵轴上两点的空间坐标可以确定该被测物体的俯仰角和偏航角,垂直于纵轴平面上的两点可确定滚动角,求出 3 个光点的空间坐标,利用光点与被测物体的位置关系可得出飞行物体的姿态角。用面阵 CCD 做辅助测试,两个面阵 CCD 构成双目视觉测试系统^[12],可测出光点坐标 $r_1(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1})$ 、 $r_2(x_{m2}, y_{m2}, z_{m2})$ 、 $r_3(x_{m3}, y_{m3}, z_{m3})$,且面阵 CCD 容易识别光点。同时三个线阵 CCD 对光点进行成像测试,解算处因整个系统用激光跟踪仪在同一世界坐标系下校准,面阵 CCD 所测光点坐标与线阵 CCD 所测光点坐标在理想状态下应相同,实际中应相近。

三线阵摆放如图 1 所示,两侧线阵 CCD 水平放置,中间线阵 CCD 竖直放置,柱面镜与线阵 CCD 垂直。LED 光点经过柱面镜头成像为一直线,所成直线与线阵 CCD 垂直相交,构成一个平面,像点即为平面与线阵 CCD 的交点。每个光点经过镜头所成像分别与三个线阵 CCD 垂直相交,可得出三个平面方程,三个平面的交点即为发光的 LED 点,联立三个平面方程可解算出光点的空间位置坐标。

由图 1 可知,任一光点在三个线阵 CCD 上分别成像,可确定共 9 个平面。在未知光点与坐标对应关系前,方程联立可得出 27 组解 (x_{li}, y_{li}, z_{li}) ,其中有 3 组是 LED 光点的真实坐标。再通过与面阵 CCD 的测试结果进行比较,可正确识别光点坐标,再通过解算即可获得飞行物体的位置信息及姿态角。

对比面阵 CCD 测得的光点空间坐标值,线阵 CCD 坐标组合的判断条件如下:

(1) $\forall \varepsilon \leq k$ 有:

$$\delta_x = |x_{li} - x_{ri}| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

$$\delta_y = |y_{li} - y_{ri}| \leq \varepsilon, \quad (2)$$

$$\delta_z = |z_{li} - z_{ri}| \leq \varepsilon. \quad (3)$$

k 值的选定取决于相机的分辨率及校准情况。

(2) 光点位置的空间距离保持不变,即解算出的空间光点坐标代入式(4)~式(6),与事先用坐标机测得的数据一致,采用此项作为标志点

识别

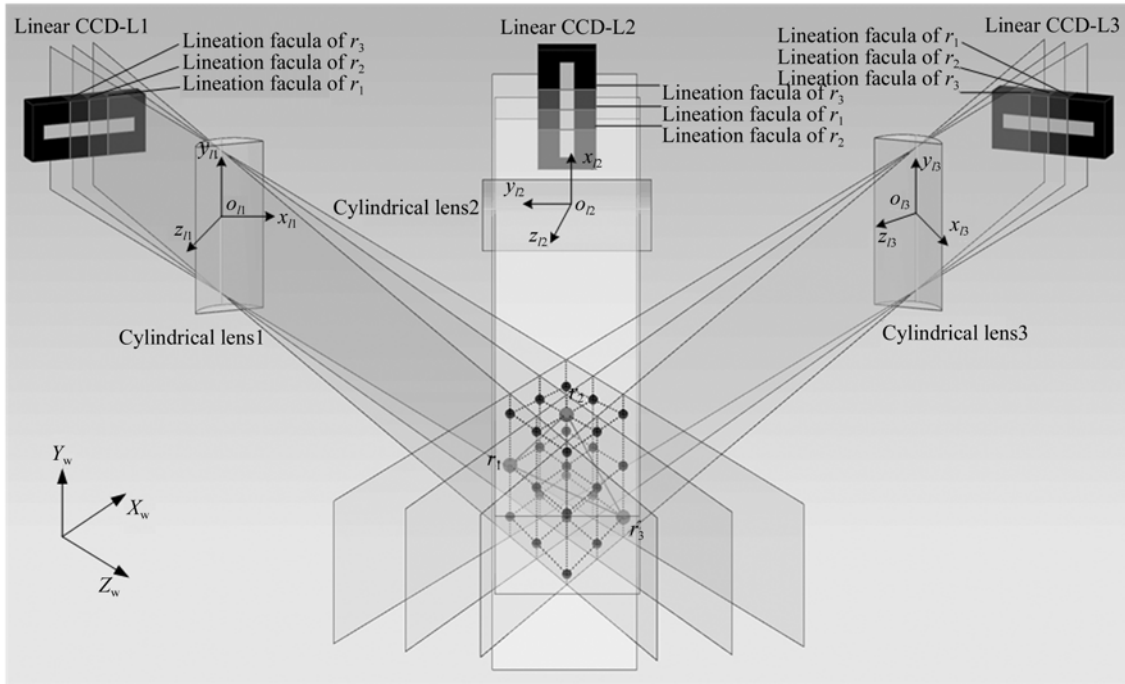


图 1 三线阵测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three linear array measurement system

的辅助判定。设由线阵 CCD 解算得到的标志光点的空间坐标为 $r_1(x_{11}, y_{11}, z_{11})$ 、 $r_2(x_{12}, y_{12}, z_{12})$ 、 $r_3(x_{13}, y_{13}, z_{13})$ ，两两之间的距离分别为 l_{12} 、 l_{13} 、 l_{23} ，3 个光点的空间距离固定不变，并由三坐标测量机事先测定。空间距离的表达式为：

$$l_{12} = \sqrt{(x_{12} - x_{11})^2 + (y_{12} - y_{11})^2 + (z_{12} - z_{11})^2}, \quad (4)$$

$$l_{13} = \sqrt{(x_{13} - x_{11})^2 + (y_{13} - y_{11})^2 + (z_{13} - z_{11})^2}, \quad (5)$$

$$l_{23} = \sqrt{(x_{13} - x_{12})^2 + (y_{13} - y_{12})^2 + (z_{13} - z_{12})^2}. \quad (6)$$

3 光学系统设计

柱面镜的成像特性是将一个点光斑转换成一条线斑，或者在不改变像宽度的情况下改变像的高度。该系统需要测量 6 m 处 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 范围内飞行物体上点光斑的运动情况，从而解算飞行目标的姿态参数，镜头半视场为：

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{1}{6}\right) = 9.5^\circ. \quad (7)$$

由于视场较大，单片透镜无法校正轴外像差，需要采用柱面透镜组。由于柱面透镜组为非旋转对称系统，子午和弧矢方向光线所经过的光程差别很大，因此，很难像普通圆透镜组那样将光束会聚成很小的光斑（或细线），需要采用多片透镜用于校正像差。本系统的线阵测量镜头采用 7 片柱面镜和 1 片 635 nm 滤光片组成。测试过程中采用红色 LED 作为配合标志光点，因此在镜头最后一级加装红色滤光片，降低杂散光干扰，最大限度地减少了色差。为了保证全部视场内线阵 CCD 接收到的光斑尽量小，设计时需要考虑整个视场范围内所有的会聚光斑。本系统应用的柱面透镜组采用像方远心光路，如图 2 所示。其景深范围内会聚的光斑能量中心位置在垂直于光轴的方向不产生变化，用于消除点光斑物距变化带来的测量误差。

对于物距 $s = 6000 \text{ mm}$ ，高 $y = 1000 \text{ mm}$ 的点目标，经过焦距 $f = 90.04 \text{ mm}$ 的线阵测量镜头后，它在像面的高度为：

$$y' = f \times \sin\left(\text{atan}\left(\frac{y}{s}\right)\right) = 14.8025 \text{ mm}. \quad (8)$$

通过计算可得出整个视场不同位置的像面高度，所选用线阵 CCD 为 7450 像素，像素尺寸为

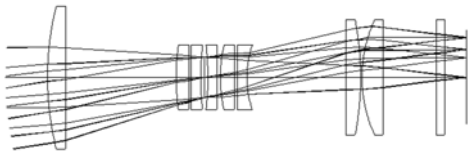


图 2 镜头光学系统结构
Fig. 2 Optical system of lens

4.7 μm × 4.7 μm, 线阵 CCD 像面尺寸为 7 450 × 4.7 μm = 35.015 mm, 因此采用 35 mm 线阵 CCD 满足 6 m 处 1 m × 1 m 内点目标的成像需求。

线阵测量镜头的相对孔径 $D/f = 1/4$, 因此其入瞳大小 D 为 $90.04/4 = 22.5$ mm。6 m 处点光斑对镜头的张角为:

$$2\omega = \text{atan}\left(\frac{22.5}{6000}\right) = 0.215^\circ. \quad (9)$$

镜头中光学材料的中心厚度为 4 cm, 设光学材料的内透过率 $\tau = 0.999/\text{cm}$; 透镜数量为 8 片, 镀膜后的表面透过率为 99.5%; 滤光片的透过率为 80%, 那么镜头的透过率为:

$$T = 0.999^4 \times 0.995^{16} \times 0.8 = 73.5\%. \quad (10)$$

LED 光点对镜头张角为 0.215° , 通过率为 75%, 较小的张角需要较高亮度的目标才可进行测试, 因此需要选用亮度较高的 LED, 这样还可降低环境光的影响, 提高测量精度。

表 1 光学系统参数

Tab. 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wave length/mm	(635 ± 15)
Focal length/mm	90.04
F-number	4
Field of view/(°)	$2\omega = 19$
Back working distance/mm	17.5
Total length/mm	147

常用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线来评价球面镜的成像质量, 柱面镜头与球面镜有所不同。用光学设计软件 CODE V 计算 6 m 处的点光斑经过镜头后的线扩展函数分布, 以分析线阵 CCD 所获得的探测信号。

由于镜头的对称性, 通过分析全视场范围内

四分之一象限内的光斑成像质量, 就可全面评价整个视场内的成像质量。

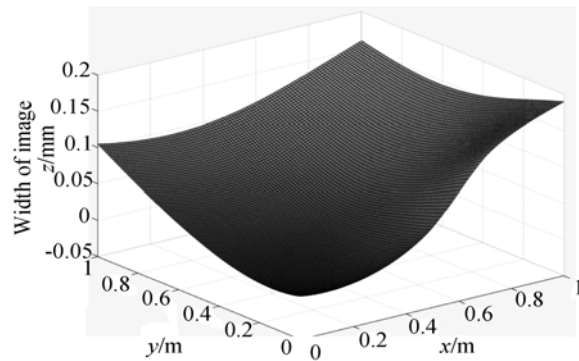


图 3 1/4 视场成像光斑线宽
Fig. 3 Width of image in 1/4 field

由图 3 可知, 点光斑所成像的最大线宽为 0.19 mm (线阵 CCD 的像素尺寸为 $4.7 \mu\text{m} \times 4.7 \mu\text{m}$), 与线阵 CCD 垂直相交后约占 40 个像素, 最小线宽为 0.009 5 mm, 约占 2 个像素, 采用质心求解方法可计算出光心。

镜头畸变对测试精度影响较大, 较小的畸变是高精度测试的基础。图 4 为系统 1/4 视场的畸变仿真情况, 由于系统具有对称性, 因此通过分析 1/4 视场即可得知整个视场的情况。从图可知, 系统畸变整体较小, 最大不超过 0.05%。

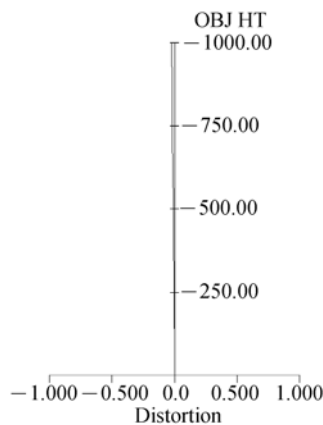


图 4 畸变曲线
Fig. 4 Distortion curve

4 镜头仿真分析

采用照明设计软件 Light Tools 仿真分析线阵测量镜头的成像特性。图 5 为某一视场点的光强

分布图,可以看出,光强能量呈正态分布,成像线宽约为0.1 mm,约占20个像素,采用质心算法可解算出光点的中心坐标。

在6 m处全视场的第一象限内设置10×10个点光源,在像面设0.4 mm×0.4 mm的探测器,探测器网格为11×100。通过2千万条光线追迹获得像面的光强分布,计算50%光强处的宽度(Full Width at Half Maximum,FWHM)和光强峰值位置,这样就可以获得每一个视场点的精确成像位置。光点偏离主光轴时,其成像光线的能量中心发生变化,详见表2。

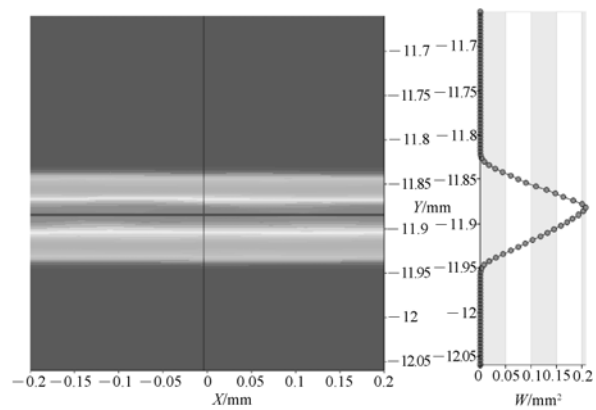


图5 某一视场点的光强分布图

Fig. 5 Intensity distribution of point in a field of view

表2 位置/物像高度关系对照表

Tab. 2 Position / object height relation table

X/Y	理论值	像面高度/mm											
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	-1.483 0	-1.482 0	-1.483 9	-1.485 5	-1.478 2	-1.480 0	-1.485 4	-1.482 4	-1.483 5	-1.483 7	-1.481 3	-1.481 4	
200	-2.966 0	-2.967 7	-2.966 7	-2.964 5	-2.966 2	-2.966 4	-2.967 4	-2.968 1	-2.965 1	-2.965 4	-2.964 8	-2.964 1	
300	-4.449 0	-4.451 0	-4.451 3	-4.450 3	-4.451 1	-4.450 0	-4.450 5	-4.450 9	-4.447 4	-4.446 1	-4.443 8	-4.443 1	
400	-5.933 0	-5.938 0	-5.935 3	-5.937 2	-5.934 0	-5.936 6	-5.934 4	-5.936 1	-5.931 2	-5.928 4	-5.929 5	-5.927 1	
500	-7.416 0	-7.418 0	-7.419 0	-7.420 4	-7.421 1	-7.421 8	-7.421 5	-7.420 7	-7.414 5	-7.412 1	-7.414 9	-7.413 2	
600	-8.899 0	-8.906 6	-8.908 1	-8.907 4	-8.908 3	-8.909 4	-8.909 7	-8.905 9	-8.898 2	-8.894 8	-8.890 7	-8.889 3	
700	-10.382 0	-10.397 1	-10.396 4	-10.395 3	-10.395 4	-10.396 0	-10.397 1	-10.392 1	-10.381 8	-10.377 7	-10.375 7	-10.370 8	
800	-11.865 0	-11.885 0	-11.882 9	-11.886 2	-11.885 7	-11.889 5	-11.887 3	-11.882 0	-11.867 7	-11.860 0	-11.860 9	-11.861 2	
900	-13.384 0	-13.428 3	-13.375 7	-13.376 7	-13.382 0	-13.377 9	-13.379 2	-13.372 5	-13.354 7	-13.349 0	-13.342 7	-13.336 4	
1000	-14.832 0	-14.867 8	-14.867 8	-14.870 8	-14.874 4	-14.876 0	-14.874 0	-14.866 5	-14.844 3	-14.835 8	-14.827 2	-14.819 8	

5 结 论

面阵 CCD 辅助线阵 CCD 识别的姿态测量系统相对成本低、数据量小、测试精度高,易于实现实时测量控制。本文对面阵 CCD 姿态测量系统

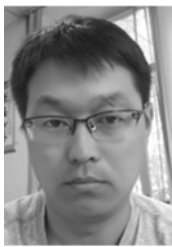
的关键部件镜头进行了详细地设计,采用像方远心光路和多片柱面镜消除像差分别实现了大景深测试和减小畸变。仿真分析表明,镜头畸变优于0.05%,景深可达1.5 m,配合线阵 CCD 可实现高精度测量。

参考文献:

- [1] BIANCHI G, GAZZANI F, MACELLARI V. The COSTEL system for human motion measurement and analysis[J]. *SPIE*, 1990, 1356: 38-50.
- [2] MACELLARI V. COSTEL: A computer peripheral remote sensing device for 3-dimensional monitoring of human motion[J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1983, 21(3):311-318.
- [3] LORI L, OPTOTRAK A S. Measurement of the quadriceps angle using standardized foot positions[J]. *Journal of Athletic Training*, 2002, 37(3): 252-255.
- [4] 秦志军,王广志,骆文博,等. 基于线阵 CCD 的大视场高精度三维实时定位系统[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2002, 42(增):39-42.
QIN ZH J, WANG G ZH, LUO W B, et al.. Light-spot positioning system with large viewing field and high precision [J]. *J. Tsinghua Univ.: Sci. & Tech.*, 2002, 42(Supp.):39-42. (in Chinese)
- [5] 骆文博,王广志,丁海曙,等. 基于线阵 CCD 的高精度位置检测[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2002, 42(9):1139-1143.

- LUO W B, WANG G ZH, DING H H, *et al.*. 3-D positioning system based on linear CCD camera [J]. *J. Tsinghua Univ. : Sci. & Tech.*, 2002, 42(9):1139-1143. (in Chinese)
- [6] 王丰,李海峰,郑臻荣,等. 光点位置测量系统摄像镜头设计[J]. 光电工程,2008,35(10):107-110.
WANG F, LI H F, ZHENG ZH R, *et al.*. Video lens design for light-spot position measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(10):107-110. (in Chinese)
- [7] 艾莉莉,袁峰,丁振良. 基于线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):161-165.
AI L L, YUAN F, DING ZH L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):161-165. (in Chinese)
- [8] 李晶,袁峰,胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学精密工程. 2013, 21(6):1635-1641.
LI J, YUAN F, HU Y H. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1635-1641. (in Chinese)
- [9] 常凌颖,赵葆常,杨建峰,等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计[J]. 中国激光, 2011, 38(8):0816001-1-5.
CHANG L Y, ZHAO B CH, YANG J F, *et al.*. Optical system design of a two-liner array stereoscopic mapping CCD camera [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2011, 38(8):0816001-1-5. (in Chinese)
- [10] 刘英,王靖,曲峰,等. 广角 $f-\theta$ 静态红外地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程,2010,18(6):1244-1248.
LIU Y, WANG J, QU F, *et al.*. Optical design of high precision wide-angle lens for static infrared earth sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1244-1248. (in Chinese)
- [11] 赵连军,刘恩海,张文明,等. 单目三点位置测量精度分析[J]. 光学精密工程,2014, 22(5):1190-1197.
ZHAO L J, LIU E H, ZHANG W M, *et al.*. Analysis of position estimation precision by cooperative target with three feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1190-1197. (in Chinese)
- [12] 郭俊峰,刘鹏,焦国华,等. 三维测量工业内窥镜的双目光学系统[J]. 光学精密工程,2014, 22(9):2337-2344.
GUO J F, LIU P, JIAO G H, *et al.*. Binocular optical system of industrial endoscope for three-dimensional measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2337-2344. (in Chinese)

作者简介:



胡英辉(1982-),男,黑龙江牡丹江人,博士研究生,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳测量及光电检测方面的研究。E-mail:foxhyh@163.com

导师简介:



袁峰(1963-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1985年、1988年、1995年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电检测及精密几何参数测量技术的研究。E-mail: yuanf@hit.edu.cn