

文章编号 1674-2915(2010)05-0467-07

# 高精度光学对准测量装置的设计

耿天文<sup>1</sup>, 刘建红<sup>2</sup>, 刘绍锦<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国航天科工集团 第二研究院 206所, 北京 100854)

摘要: 设计了一套光学对准测量装置, 该装置主要由面阵 CCD 相机、光学镜头、图像处理模块、LED 红光光源、球面反光镜组成。介绍了测量原理, 测量目标采用等腰三角形排列, 通过面阵 CCD 对目标所反射的图像进行采集, 由图像处理模块对该图像进行实时处理, 能够同时得到  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  以及旋转角度等四维坐标数据。推导了光斑图像坐标和被测平面距离等计算公式, 并进行了对准精度分析。结果表明, 该装置位置误差  $< 1$  mm, 角度误差为  $0.24^\circ$ ; 实现了高精度、自动、快速对准测量。

关键词: 光学对准; 测量装置; 四维坐标; 精度分析

中图分类号: TH741.14 文献标识码: A

## Design of high-precision optical measuring centering device

GENG Tian-wen<sup>1</sup>, LIU Jian-hong<sup>2</sup>, LIU Shao-jin<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *No. 206 Institute of the 2nd Academy of China Aerospace Science and Industry Corp., Beijing 100854, China)*

**Abstract:** A set of optical measuring centering device is designed, which is composed of an area array CCD camera, an set of optical lens, image processing circuits, a red LED lamp-house, and a spherical surface reflector. The measuring principle of the device is introduced. The measuring objects are arranged in isosceles triangle, and the image of object is collected by a area array CCD and is processed in real time by the image processing circuits. At the same time, four dimension coordinate data(  $X$ ,  $Y$ ,  $X$ , and rotation angles) are calculated. The calculation expressions of the coordinate of spot image, the distance between the two planes and so on, are deduced and the measuring precision is analyzed. Experimental results indicate that the deviation of position is less than 1 mm and the deviation of angle is 0.24, which shows that the device can realize the high-precision, automatic and expeditiousness measurement.

**Key words:** optical centering; measuring device; four dimension coordinate; precision analysis

# 1 引言

通常,确定两物体相对位置的方法是用高精度经纬仪对两个物体上的固定合作目标分别进行测量。采用交会测量的方法来确定合作目标的空间相对位置时,如果要得到物体更为精确的空间相对位置则需要多个合作目标,进行多次测量。虽然这种测量方法的精度较高,但所采用的测量仪器价格昂贵,使用条件要求高,容易损坏,移动性差,在应用上有很大的局限性。其他的测量方式在精度、可靠性等方面都有较大的限制<sup>[1,2]</sup>。

随着 CCD 和数字信号处理 ( DSP ) 技术在图像处理领域的发展,针对自动光学对准测量的研究也已经开展起来,并有了一定的发展和应用。本文基于面阵 CCD 和 DSP 处理器设计了一种价格低廉,安装方便,精度、可靠性高的快速、高精度自动对准测量装置。该装置通过实时输入物体位置的偏差数据,为控制物体相对移动的伺服系统提供控制信息,其在需要进行高精度对准的很多领域都有比较广泛的应用。

# 2 系统组成

系统主要由面阵 CCD 相机、光学镜头、图像处理模块、LED 红光光源、球面反光镜以及控制和执行机构组成,如图 1 所示。

图 1 中虚线两侧分别属于 2 个平行的平面,首先在 1 个平面上安装面阵 CCD、光学镜头、图像处理模块、LED 红光光源,在另外的平面上安装 3 个高反射率球面反光镜,该平面其余部分不反光。用红光光源照亮 3 个球面反光镜,反光镜在 CCD 上所成的像由图像处理电路计算出相关数值,将这些数值输出到控制系统,控制执行机构完成对准。

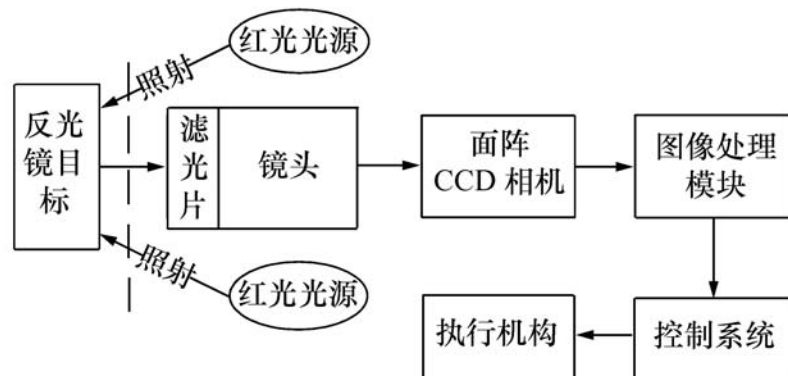


图 1 测量装置组成框图

Fig. 1 Block diagram of measuring device

本系统中 3 个目标点采用的是球面反光镜。相对于平面镜和漫反射目标,球面反光镜具有反射角度大、反射能力强的特点,可以获得对比度较高的像点,所成像的形状较为规则。同时,在镜头前装滤光片,这样相机所成的像就是球面反射镜反射 LED 红光光源形成的,使得成像的像质均匀且大大减少了其他反射光的干扰,这些方法都使得后续的图像处理结果更为精确。

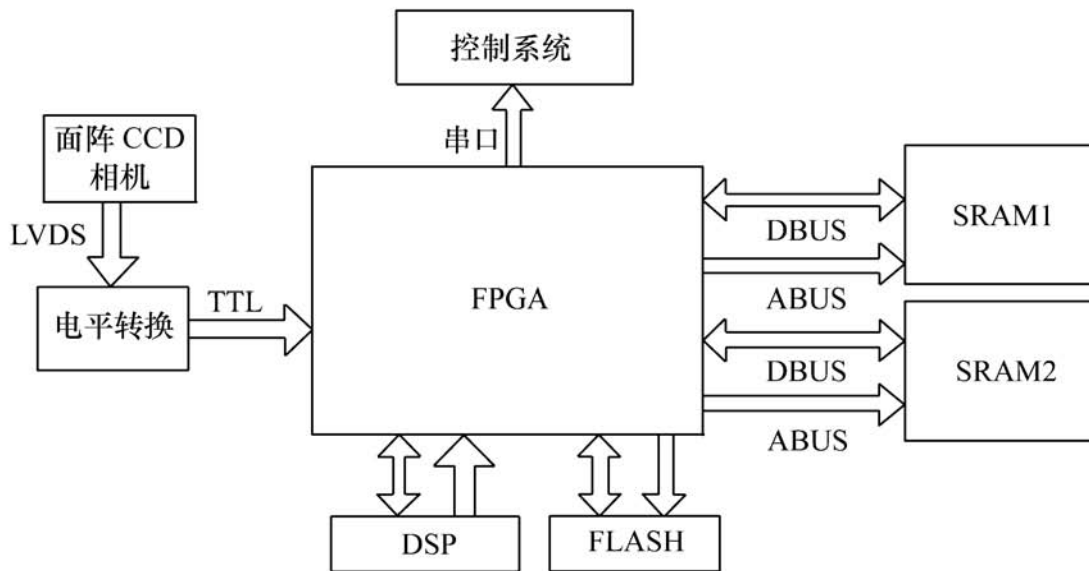


图 2 图像处理系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of image processing system

图像处理模块完成对图像数据的采集、处理以及输出, 是对准装置的核心。主要由现场可编程门阵列 (FPGA)、DSP 和静态随机存储器 (SRAM) 电路等组成, 电路原理框图如图 2 所示<sup>[3,4]</sup>。

面阵 CCD 相机选择的是 DALSA 公司的 DS-21-04M15 黑白数字接口相机, 数据输出格式为 8/10 bit, 分辨率为 2 048 × 2 048, 像元尺寸为 7.4 μm × 7.4 μm, 该相机可提供高分辨率的大尺寸图像, 具有视场大, 速率高的特点。

DSP 选用的是 TI 公司的高性能浮点数字信号处理器: TMS320VC33, 指令周期为 17 ns, 浮点运算速率为 120 M/s, 其指令运算速率为 60 M/s, 片内具有 34 K × 32 bit 静态随机存储器 (SRAM), 地址线为 24 bit, 数据线为 32 bit, 低功耗 < 200 mW, 低电压为 3.3 V 和 1.8 V<sup>[5,6]</sup>。

为减少器件, 提高可靠性, 将数字接口和串口等接口电路都集成在一个高密度芯片内 (选用 ALTERA 公司的 FPGA), 由此内部可编程逻辑电路多, 集成度高, 工作速度快, 体积小, 功耗低, 内部连线灵活, 输入输出功能强大, 设计调试周期短, 在系统可编程<sup>[7]</sup>。

相机的图像输出为 Camera Link 方式, 首先要将高速的低电压差分信号 (LVDS) 以及像素时钟信号转换为逻辑门电路 (TTL) 信号, 通常有两种做法, 第一是通过相应的 LVDS 转换为 TTL 信号的 IC 器件完成转换功能; 第二是利用 FPGA 自带的 LVDS IP 核进行电平的转换, 实验证明两种方法都是可行的。本系统选取了第一种方法, 利用美国国家半导体公司生产的 DS90CR286 实现 TTL 信号和 LVDS 信号之间的转换, DS90CR286 芯片实现了对 LVDS 信号的接收功能, 把 5 路 LVDS 信号转换为一路 TTL 时钟信号和 28 路数据信号, 芯片的数据带宽相同, 高达 231 Mb/s。

为实现数据的无缝缓冲处理, 使系统的输入、输出均为连续不断的数据流, 采用“乒乓操作”来完成数据流的控制处理。在 FPGA 中完成“乒乓操作”的读写控制模块的设计, 需要两组地址线, 两组输入、输出数据总线以及读、写、片选等信号线, 分别控制 SRAM1 和 SRAM2。设置相机的帧

频为 15 frame/s, 第一帧时间将相机数据流缓存到 SRAM1 中, 第二帧时间进行数据和地址切换, 将数据缓存入 SRAM2 中, 并将 SRAM1 中数据送到数字信号处理器 (DSP) 中进行运算处理, 第三帧时间则进行再次切换, 周而复始, 按节拍配合切换, 使得恒速的图像采集和变速的图像处理之间得到缓冲, 数据流进行不停顿的运算和处理。

### 3 测量原理

图 3 为光学对准测量装置工作原理图, 图中 CCD 平面与反光镜目标平面平行, 两平面间有 4 个自由度, 即两平面可以沿 X、Y、Z 轴方向以及 Z 轴旋转方向相互运动。因此, 图像处理模块需要根据图像测量出两平面沿 X 轴和 Y 轴方向的偏移量 X 和 Y, Z 轴方向两平面的距离 L 以及沿 Z 轴旋转的角度。

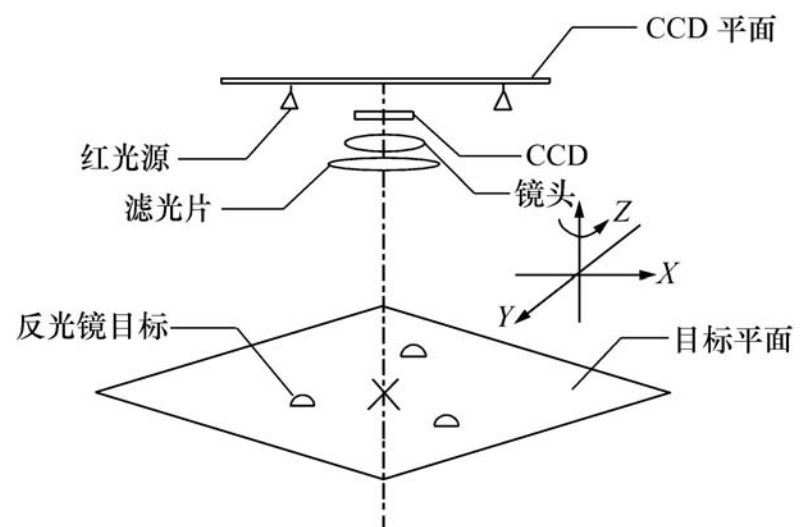


图 3 测量原理图

Fig. 3 Diagram of measuring principle

为测量沿 Z 轴旋转的角度，至少需要 3 个目标点组成三角形 (等边三角形除外), 这里将 3 个反光镜组成等腰三角形, 等腰三角形底边的中点为目标平面的中心。如图 4 所示, 在 CCD 上建立平面坐标系,  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ ,  $C(x_3, y_3)$  3 点为反光镜在 CCD 靶面上所成的像的中心坐标, O 为底边 BC 的中点, 通过实验, 当两平面完成对准, 目标点在 CCD 上成像为  $abc$ , 因此以  $abc$  为基准, 通过移动 CCD 平面, 使得图 4 中的  $ABC$  和  $abc$  重合即完成了两平面的对准。

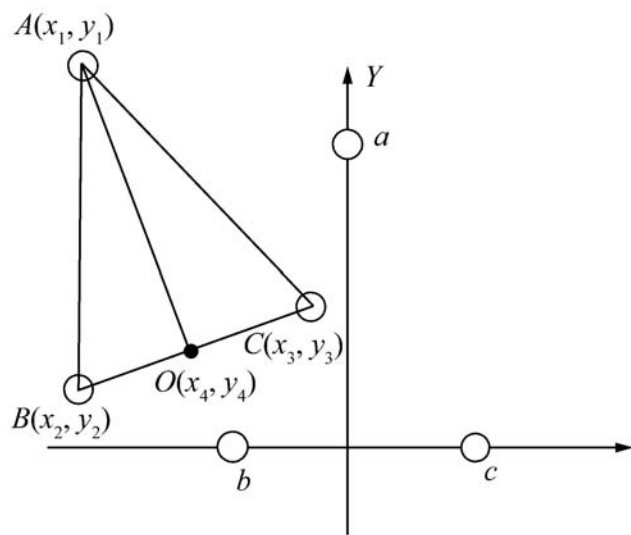


图4 CCD靶面成像示意图

Fig. 4 Image on the CCD

## 4 计算公式推导

首先计算  $A, B, C$  的坐标, 由于目标图像较小且近似圆形, 因此采用重心法计算光斑图像的坐标较为合适。采用形心法首先要选取合适的阈值对采集图像进行二值化处理, 将目标图像和背景

$$W(i, j) = \begin{cases} A(i, j) - V_{th} & (A(i, j) > V_{th}) \\ 0 & (A(i, j) \leq V_{th}) \end{cases} \quad (2)$$

$V_{th}$  为图像灰度阈值,  $A(i, j)$  为像元灰度值。根据式(1)和式(2), 可分别计算出  $A, B, C$  点的坐标  $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$ 。

下面计算两平面的距离, 图5为光路示意图,  $A'B'C'$  为反光镜组成的等腰三角形,  $ABC$  为  $A'B'C'$  在 CCD 上所成的像, 两三角形平行而且相似, 且都垂直于光轴,  $L$  为两平面的距离,  $f$  为镜头焦距。

由图5可以得到:

$$\frac{A'B'}{A'B} = \frac{A'C'}{A'C} = \frac{f}{L} \quad (3)$$

由(3)式可得:

$$L_1 = f \times \frac{A'B'}{A'B} = f \times \frac{A'B}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4)$$

$$L_2 = f \times \frac{A'C'}{A'C} = f \times \frac{A'C}{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}$$

图像分割出来; 然后采用形心算法计算得到光斑点位置坐标。然而经过图像二值化分割处理后, 由于像斑边界部分灰度较低, 因此目标边界会存在一些毛刺, 这会对算法精度有一定的影响。采用这种算法得到的定位精度为  $0.2 \sim 0.5$  pixel。虽然形心法定位简单快速, 又具有较高的亚像素定位精度, 但是从得到的图像特征来看, 目标与背景主要区别就在于灰度, 而且目标像点直径通常小于  $10$  pixel, 属于较为典型的小目标, 因此细分算法适宜采用基于灰度的重心法<sup>[8,9]</sup>。

重心算法的数学表达式如下:

$$x = \frac{\sum_{(i,j)} iW(i, j)}{\sum_{(i,j)} W(i, j)}, \quad (1)$$

$$y = \frac{\sum_{(i,j)} jW(i, j)}{\sum_{(i,j)} W(i, j)}$$

式中,  $(x, y)$  为经过亚像素算法后的定位位置,  $i, j$  为像元信号的坐标值,  $W(i, j)$  为权值, 取值如下<sup>[10]</sup>:

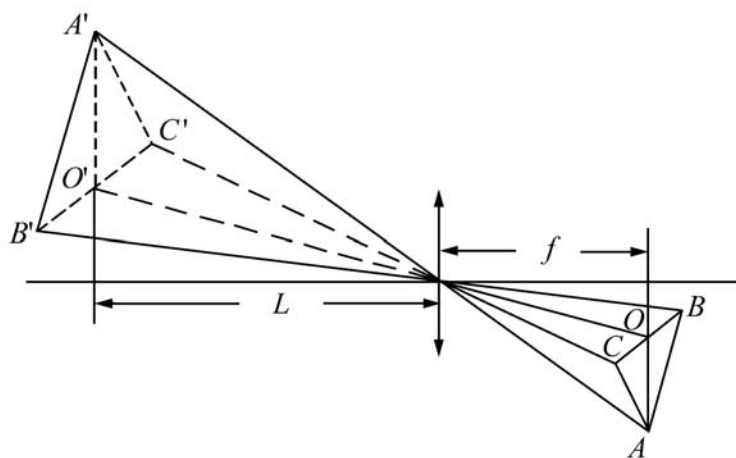


图5 光路示意图

Fig. 5 Sketch of light ray

取均值得到两平面距离:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^2 L_i}{2}. \quad (5)$$

由于  $O$  为  $BC$  的中点, 所以:

$$\begin{aligned} x_4 &= \frac{x_2 + x_3}{2}, \\ y_4 &= \frac{y_2 + y_3}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

$O$  为目标平面的中心, 所以它的坐标值即为两平面沿  $X$  轴和  $Y$  轴方向的偏移量  $X$  和  $Y$ , 计算如下:

$$\begin{aligned} \frac{X}{x_4} &= \frac{L}{f}, \\ \frac{Y}{y_4} &= \frac{L}{f}. \end{aligned} \quad (7)$$

由式(5), (6), (7) 得:

$$\begin{aligned} X &= \frac{L(x_2 + x_3)}{2f}, \\ Y &= \frac{L(y_2 + y_3)}{2f}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$L_1 = \left(\frac{5L_1}{5f}df\right)^2 + \left(\frac{5L_1}{5AB}dAB\right)^2 + \left(\frac{5L_1}{5x_1}dx_1\right)^2 + \left(\frac{5L_1}{5x_2}dx_2\right)^2 + \left(\frac{5L_1}{5y_1}dy_1\right)^2 + \left(\frac{5L_1}{5y_2}dy_2\right)^2. \quad (10)$$

取两平面距离最小时  $L = 300$  mm 计算了位置误差。此时, 式(10)中的各变量的实际测量值为:  $f = 5$  mm,  $AB = 30$  mm,  $AC = 30$  mm,  $x_1 = 1$  mm,  $y_1 = 1$  mm,  $x_2 = 1$  mm,  $y_2 = 0.5$  mm。

式(10)中各变量的误差实际值为:  $df = 0.01$  mm,  $dAB = 0.02$  mm,  $dAC = 0.02$  mm。

取像素定位误差为 0.2 个像元, 像元尺寸为 7.4  $\mu$ m, 因此:  $dx_1 = dx_2 = dy_1 = dy_2 = 0.0015$  mm, 将以上各值代入式(10)可得  $L_1$  的误差为:  $L_1 =$

$$\begin{aligned} x &= \left(\frac{5}{5f}Xdf\right)^2 + \left(\frac{5}{5L}XL\right)^2 + \left(\frac{5}{5x_2}Xdx_2\right)^2 + \left(\frac{5}{5x_3}Xdx_3\right)^2 = \\ &\left(\frac{L(x_2 + x_3)}{2f^2}df\right)^2 + \left(\frac{x_2 + x_3}{2f}dL\right)^2 + \left(\frac{L}{2f}dx_2\right)^2 + \left(\frac{L}{2f}dx_3\right)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

取  $L = 300$  mm 计算偏移误差, 此时  $x_2 = 1$  mm,  $x_3 = 1.5$  mm,  $f = 5$  mm,  $dx_2 = dx_3 = 0.0015$  mm,  $df = 0.01$  mm, 代入式(11)中得偏移

沿  $Z$  轴旋转角度, 根据  $AB$  的斜率确定:

$$= \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right). \quad (9)$$

此时完成了 2 个平面 4 个自由度控制量的计算。

## 5 精度分析

影响本测量装置测量精度的因素主要有: 目标的安装精度、镜头的物理分辨率、标定和误差修正精度以及图像中像点坐标的测量精度<sup>[11, 12]</sup>。

本文对研制的测量装置在两平面的距离  $L$  为: 300 mm  $L = 600$  mm,  $ABC$  的各边边长分别为:  $AB = 30$  mm,  $AC = 30$  mm,  $BC = 20$  mm 条件下进行了精度分析。由于当两平面完成对准时距离为 300 mm, 因此最终的误差应以距离为 300 mm 进行计算。

根据式(4)及误差合成公式可得  $L_1$  的误差公式如下:

0.78 mm。同理可以求出  $L_2$ :  $L_2 = 0.78$  mm。由式(5)可知两平面距离是由  $L_1$  和  $L_2$  取均值得到的, 因此两平面距离  $L$  的误差为:

$$L = \sqrt{L_1^2 + L_2^2} / 2 = 0.55 \text{ mm}.$$

另外,  $X$  轴和  $Y$  轴方向的偏移量  $X$  和  $Y$  的误差  $x$  和  $y$  可根据式(8)及误差合成公式求得:

量  $x$  的误差  $x = 0.21$  mm,

同理可得:  $y = 0.21$  mm。

又,沿 Z 轴旋转角度的误差计算公式如下:

$$= \left(\frac{5}{5x_1}dx_1\right)^2 + \left(\frac{5}{5x_2}dx_2\right)^2 + \left(\frac{5}{5y_1}dy_1\right)^2 + \left(\frac{5}{5y_2}dy_2\right)^2, \quad (12)$$

式中,  $x_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $x_2 = 1 \text{ mm}$ ,  $y_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0.5 \text{ mm}$ ,  $dx_1 = dx_2 = dy_1 = dy_2 = 0.0015 \text{ mm}$ , 代入式(12)中可得  $\theta = 0.24^\circ$ 。

## 6 结 论

本文设计了一套光学对准测量装置,介绍了测量原理,推导了计算公式,并进行了测量精度分析。

为确保对准精度,首先根据具体的应用,通过理论计算和实验确定了相机的焦距和视场,以便清晰地捕获足够范围内的目标;其次通过实验确定3个球面镜合作目标的大小以及安装的位置,目的是为了能够获得清晰的目标图像。本装置所采用的光学对准测量法简单,对准精度高,体积小,易于安装和应用,在需要进行高精度对准的许多领域都有比较广泛的应用。

### 参考文献:

- [1] 张文渊. 光学对准器快速对准方法简介[J]. 水道港口, 2000, (1): 43-44.  
ZHANG W Y. Brief Introduction on the fast centering methods of optical centering device[J]. *Channel and Port*, 2000, (1): 43-44. (in Chinese)
- [2] 薛英武. 高精度光学自动对准系统的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2007.  
XUE Y W. Research on the higher-precision optical automatic alignment system[D]. *Wuhan: Hubei University of Technology*, 2007. (in Chinese)
- [3] 李爱玲, 张伯珩, 边川平. 高速 CCD 图像采集存储系统的硬件设计[J]. 电子器件, 2007, 30(6): 2145-2147.  
LI AI L, ZHANG B H, BIAN CH P. Design of high-speed CCD image data acquisition hardware system[J]. *Chinese J. Electron Devices*, 2007, 30(6): 2145-2147. (in Chinese)
- [4] 岳亮, 李自田, 李长乐, 等. 基于 DSP 的视觉监测相机的图像处理系统[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(16): 2548-2551.  
YUE L, LI Z T, LI CH L, et al. Image processing system of vision selecting camera based on DSP[J]. *Sci. Technol. Eng.*, 2006, 6(16): 2548-2551. (in Chinese)
- [5] TMS320VC33 DIGITAL SIGNAL PROCESSOR data sheet[G]. Texas Instruments Incorporated, 2000.
- [6] 张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.  
ZHANG X W, CAO T Y. *Principle and Application of DSP Chip*[M]. Beijing: Publishing House and Electronics Industry, 2000. (in Chinese)
- [7] 宋万杰, 罗丰, 吴顺君. CPLD 技术及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.  
SONG W J, LUO F, WU SH J. *Technology and Application of CPLD*[M]. Xi an: Xidian University Press, 1999. (in Chinese)
- [8] 周中亮, 周冰, 何永强, 等. 成像型激光探测系统中光斑精确定位方法研究[J]. 激光技术, 2008, (3): 248-251.  
ZHOU ZH L, ZHOU B, HE Y Q, et al. Laser spot location in imaging laser detecting systems[J]. *Laser Technol.*, 2008, (3): 248-251. (in Chinese)
- [9] 王和顺, 陈次昌, 黄惟公. CCD 测量误差研究[J]. 光学技术, 2009, (3): 402-405.  
WANG H SH, CHEN C CH, HUANG W G. Research on the error of CCD[J]. *Opt. Technique*, 2009, (3): 402-405. (in Chinese)
- [10] 张晖. 图像测量中亚像素定位技术研究[J]. 科技与生活, 2009, (21): 17-17.  
ZHANG H. Sub-pixel positioning technology research in image measurement[J]. *Technol. Live*, 2009, (21): 17-17. (in Chinese)

- [11] 吴晓波, 安文斗. 图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(1): 133-144.  
WU X B, AN W D. Error analysing and approaches of improving measuring precision in image measuring system[J].  
*Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 133-144. (in Chinese)
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)

作者简介: 耿天文(1980—), 男, 吉林长春人, 硕士, 助理研究员, 主要从事光学测量仪器方面的研究。

E-mail: hero\_gtw@yahoo.com.cn

## 《光学 精密工程》(月刊)

中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊

现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士

Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

美国工程索引 EI 核心期刊

中国精品科技期刊

中文核心期刊

百种中国杰出学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 50.00 元/册