

文章编号 1004-924X(2011)09-2131-07

动载体光电平台视轴稳定精度的检测

孙 辉*, 郎小龙, 李志强, 孙丽娜

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:提出一种动载体光电平台视轴稳定精度的检测方法。介绍了光学测量原理,讨论了光电平台视轴稳定精度检测系统的实施路线,并对该系统使用的自准直光学成像系统、高速数字 CMOS 相机和光斑检测算法进行了研究。由安装在光电平台照准架上的平面反射镜反映光电平台视轴指向角度的变化,用高速数字 CMOS 相机采集图像,并通过计算图像之间归一化的互功率谱和采用相位相关配准算法检测光斑的亚像元级位移量实现了光电平台视轴指向角度的精确测量。将该方法应用于光电平台视轴稳定精度检测系统进行 Leica 经纬仪标定实验,结果显示,在视场检测范围为 $\pm 1^\circ$ 、图像采样频率为 500 frame/s 时,检测误差 $< 2 \mu\text{rad}$,表明该方法实现了动态测量并满足高精度、大视场的检测要求。

关键词:光电平台;视轴稳定精度;相位相关;视场角;亚像元

中图分类号:TH703;TP274 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111909.2131

Measurement for LOS stabilization accuracy of electro-optical imaging system on moving carrier

SUN Hui*, LANG Xiao-long, LI Zhi-qiang, SUN Li-na

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn

Abstract: A novel measurement scheme for the stabilization accuracy of a Line of Sight (LOS) in an electro-optical imaging system on a moving carrier is proposed. The principle of optical measurement for LOS stabilization accuracy is briefly introduced, and the optical design of an autocollimator with a large field of view and a detection algorithm for the light-spot position are investigated. The autocollimator is used to test orientation changes of the LOS which is represented by a mirror fixed on the frame of the electro-optical imaging system. A high-speed CMOS camera for the collection of images and an algorithm for image registration based on Phase-only Correlation (POC) are employed to detect sub-pixel level displacement of light-spot images by calculation of the normalized cross-power spectrum between pairs of images. The scheme has been used in the LOS stabilization accuracy measurement system, and a calibrating experiment is set up using a Leica theodolite. The experimental results show that the RMS error of the angular measurement is less than $2 \mu\text{rad}$ when the field of view is $\pm 1^\circ$ and the sampling rate is 500 frame/s. The dynamic measurement can meet the system requirements of

收稿日期:2010-12-27;修订日期:2011-01-25.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2009CB72400607);国防预研基金资助项目(No. 402070301)

a larger field of view and a greater precision.

Key words: electro-optical imaging system; LOS stabilization accuracy; Phase-only Correlation(POC); field of view; sub-pixel-level

1 引言

机载、车载、船载光电平台具有多方位、全天候、高技术侦察和精确打击能力,作为快速、直观获取信息的通道和手段,广泛应用于军事侦察、空间遥感、灾害预报、资源探测等领域^[1]。光电平台工作时受到动载体姿态变化、振动、气流扰动等因素影响,不可避免地产生视轴晃动,影响系统成像性能^[2-3]。因此,视轴稳定精度是描述和评价光电平台性能的重要指标,提高视轴稳定精度已成为光电平台发展的研究方向和动力。

如何检测和评价光电平台视轴稳定精度,是提高视轴稳定精度的重要前提。早期的检测工作普遍采用激光器测量法,该方法利用激光器作为光源,发射激光束射向反射镜,测量反射光斑投影到接收屏上,根据光电平台与接收屏之间的距离来估算光电平台视轴偏移。该方法的缺点是只能定性分析而不能定量检测。另一种比较流行的方法是脱靶量测量方法,即用光电平台跟踪星点光斑目标,通过目标脱靶量数据计算稳定精度。该方法的优点是不需要专用的检测设备,操作方便;缺点是用光电平台测试自身的精度,试验方法缺乏合理性,并且其准确性依赖于图像跟踪数据的精度,数据可信度低、可靠性较差。近年来,关于光电位置传感器(Position Sensitive Detector, PSD)的应用研究越来越广泛^[4-6],文献[4]将 PSD 用于实时测量稳定平台角位移,采用激光自准直测量方式,由 PSD 探测器对反射光信号进行检测。该方法精度比较高,但测量范围小,实用性受到限制。

本文根据实际工程需求,提出一种大视场、高精度光电平台视轴稳定精度检测方法。结合目前广泛采用的稳定精度检测技术,通过大视场自准直光学系统设计提高测量范围,满足大视场的使用要求。使用高速数字 CMOS 相机采集光斑信号,采用扩展的相位相关图像配准技术检测光斑图像的亚像元级位移量,提高了像元的分辨率,克服了大视场和高分辨率之间的矛盾,弥补了大视

场光学系统分辨率低的不足,实现了光电平台视轴的稳定精确测量。

2 光学测量基本原理与设计

2.1 光学测量原理

测量系统由自准直光学系统、星点孔、平面反射镜、高速数字 CMOS 相机、工作站等组成。由于动载体光电平台工作环境复杂,在实验室条件下,将光电平台安装到二维摇摆台或振动台上,通过控制系统驱动二维摇摆台或振动台在方位和俯仰两个方向产生低频扰动或高频扰动。

测量原理如图 1 所示。

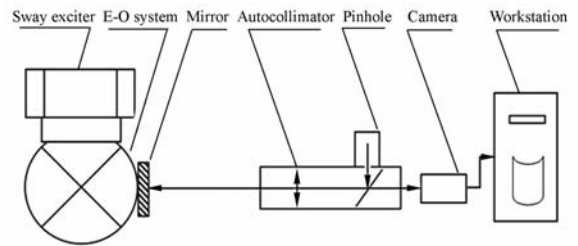


图 1 光学测量原理

Fig. 1 Principle of optical measurement

系统工作时,由星点孔发出的光线经半透半反镜后,反射光线通过正负透镜组聚焦成平行光,从物镜出射到达安装在光电平台照准架上的平面反射镜;经平面反射镜反射后,再次通过正负透镜组到达半透半反镜,透过半透半反镜入射到高速数字相机传感器靶面;传感器将光信号转换为数字视频信号,生成星点光斑图像;工作站采集图像,通过分析光斑图像位置,计算视轴偏移角度。

在摇摆台静止时,光线到达反射镜后沿原路返回,透过半透半反镜入射到传感器靶面上的固定位置,如图 2 所示。启动摇摆台开始工作,光电平台伺服系统自动控制光电平台抵消摇摆台运动,由于伺服控制存在残差,视轴指向角发生偏移 θ ,并耦合到平面反射镜。设视轴指向角偏移,根据平面反射镜工作原理,到达反射镜的光线与原

光线成 2θ 反射,透过半透半反镜入射到传感器靶面产生偏移 d ,如图 3 所示。

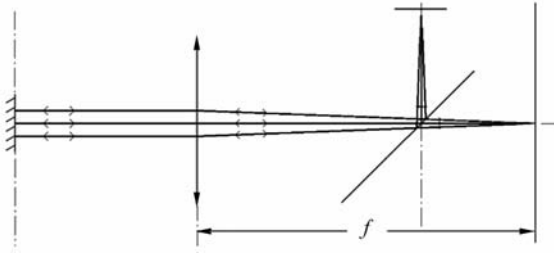


图 2 反射镜与光轴垂直时光斑到达探测器的位置
Fig. 2 Light spot position on detector with mirror vertical to optical axis

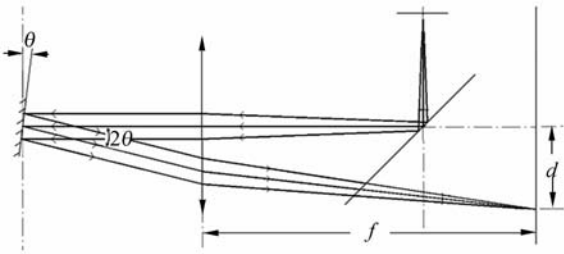


图 3 光斑位置随着反射镜偏转而变化
Fig. 3 Light spot position on detector while mirror tilting with deflection of mirror

通过计算光斑位移量 d 可确定视轴偏移角度 θ ,计算公式如下:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{d}{f}\right), \quad (1)$$

式中 f 表示光学系统焦距。

本文采用样本数据标准差作为视轴稳定误差的数值指标,该标准差反映了一系列测量值偏离平均值的离散情况。设有 n 个视轴偏移角度采样数据 $\{\theta_i, i=1, 2, 3, \dots, n\}$,根据统计学原理,视轴稳定误差计算公式如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

式中 $\bar{\theta}$ 表示 n 个视轴偏移角度平均值,即

$$\bar{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i. \quad (3)$$

2.2 光学设计

测量系统的光学部分是一个自准直光学成像系统,包括星点孔、半透半反镜、正组透镜与负组透镜等,结构如图 4 所示。由于星点孔像 2 次经

过光学系统,对像质要求较高,必须修正轴外像差和二级光谱,本文采用正组透镜与负组透镜相分离形式,选择特殊色散的正组透镜材料校正二级光谱。

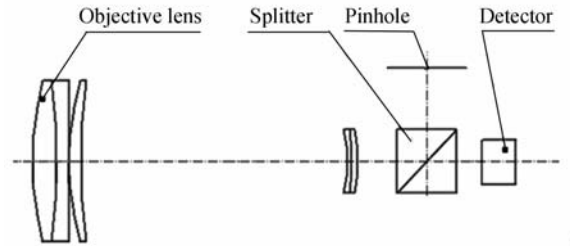


图 4 自准直仪光学结构示意图
Fig. 4 Basic structure of autocollimator

根据光学成像理论,影响光学系统检测精度的主要因素有焦距、视场角、角度分辨率、透过率等,本文简要讨论光学系统焦距、视场和瞬时视场的设计和实现。

光学系统焦距和视场、瞬时视场计算公式如下:

$$\omega = 2 \arctan\left(\frac{b\sqrt{M^2 + N^2}}{2f}\right), \quad (4)$$

$$f = \frac{b\sqrt{M^2 + N^2}}{2 \tan\left(\frac{\omega}{2}\right)}, \quad (5)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{b}{f}\right), \quad (6)$$

式中: ω 为视场角, β 为瞬时视场, f 为自准直光学系统焦距, b 为探测器单元尺寸, M 为探测器水平方向像元个数, N 为探测器垂直方向像元个数。

本文以 MC1310 型高速数字相机为例讨论焦距和视场、瞬时视场的关系。MC1310 高速数字相机的分辨率是 $1\,280 \times 1\,024$, 像元尺寸是 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$, 最大帧频为 500 frame/s, 图 5、图 6 分别给出了焦距为 50~500 mm 所对应的视场和瞬时视场数据曲线,可以看出,随着焦距的增加,最大视场和瞬时视场逐渐减小。

设计自准直光学成像系统时,首先必须满足视场的使用要求。如果视场过小,无法保证星点孔像进入探测器靶面,导致测量失败;但如果视场过大,则瞬时视场变大,即每个成像单元对应的角度变大,空间分辨率降低,会直接影响到光斑图像位置的检测精度,最终降低测量系统的检测精度。

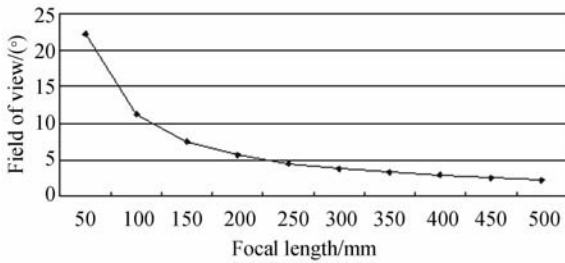


图 5 视场与焦距关系曲线

Fig. 5 Relationship between focal length and field of view

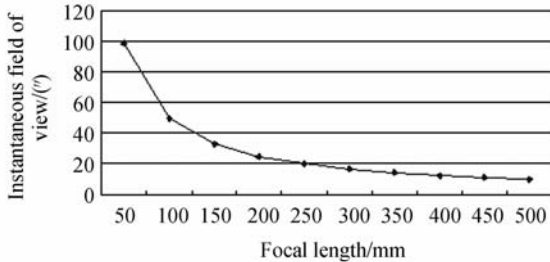


图 6 瞬时视场与焦距关系曲线

Fig. 6 Relationship between focal length and instantaneous field of view

3 光斑图像的亚像元精配准

3.1 提高空间分辨率的技术途径

根据光学设计知识和本文 2.2 节分析结果,光学系统视场角决定了焦距值、瞬时视场和空间分辨率,如何提高空间分辨率是决定检测精度的关键技术之一。由于光学系统固有的大视场及低分辨率成像特点,光学设计无法在保证大视场的前提下,满足高分辨率的需求。例如:当光学系统视场角 $\omega=4^\circ$ 时,根据公式(5)可以解算出焦距 $f=281.6\text{ mm}$ 。根据平面反射镜的工作原理,光斑中心光线与光轴的夹角是视轴偏移角度的 2 倍,所以该系统动态检测范围可达 $\theta=\pm 1^\circ$,空间分辨率 $\beta=21\ \mu\text{rad}$ 。该精度低于文献[3]介绍的国内外主要光电平台的稳定精度指标,无法完成光电平台的稳定精度检测。

提高空间分辨率另一个途径是选择高分辨率探测器。目前 CCD 或 CMOS 相机因具有高灵敏度和高分辨率等优点被广泛用于目标跟踪和角度测量系统^[7-8]。根据公式(6),在焦距 f 一定条件

下,当靶面像元分辨率增大时,探测器单元尺寸减小,瞬时视场随之减小。但选择高分辨率探测器要承担体积、成本、购货渠道等风险,甚至由于设计、制造工艺等因素难以实现。

亚像元图像配准技术提供了另一种提高空间分辨率的有效途径,采用亚像元图像配准技术,可以解决因图像获取设备的分辨率低引起的像元级配准精度差的问题,还可用于检测图像之间的微小差异^[9]。由于亚像元级配准具有非常重要的应用价值,近年来得到了学术界的普遍关注^[10-11]。其中文献[11]提出的扩展的相位相关(Phase-only Correlation, POC)方法是目前广泛使用的频域配准技术^[12-14],在理想条件下,可实现 0.01 像元的检测精度。

本文采用相位相关配准方法检测两幅光斑图像之间的位移量。在实验室条件下,光源非均匀性、像差、探测器噪声、环境变化等各方面不利因素将影响到图像配准精度。根据视轴稳定精度检测要求,如果光斑位移检测精度优于 $1/15$ 像元,则空间分辨率提高 15 倍,最高可达 $1.4\ \mu\text{rad}$,优于 $2\ \mu\text{rad}$ 的动态检测精度。

3.2 算法实现

根据傅里叶变换的平移理论,当两幅图像之间发生平移时,傅里叶变换的幅值不变,互功率谱的相位等于两幅图像的相位差,通过求解归一化的互功率谱的傅里叶逆变换,得到二维 Dirachlet 冲激函数,其坐标位置给出了两幅图像之间的位移量。

设图像尺寸 $M\times N$, $f_1(x, y)$ 为基准图像, $f_2(x, y)$ 为 $f_1(x, y)$ 平移 (x_0, y_0) 后的位移图像,两者满足如下关系:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0). \quad (7)$$

式(7)傅里叶变换可表示为

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0)), \quad (8)$$

式(8)中, $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$ 分别表示 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的傅里叶变换。因此,两幅图像之间归一化的互功率谱表示为

$$\frac{F_2(u, v)F_1^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_1^*(u, v)|} = \exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0)). \quad (9)$$

将式(9)两端进行傅里叶逆变换,可得相位相关函数的表达式如下:

$$POC(x, y) = F^{-1} \{ \exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0)) \} = \delta(x - x_0, y - y_0), \quad (10)$$

式中: $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 为典型的 Dirachlet 冲激函数,该函数在中心点 (x_0, y_0) 处不为 0,在其它位置都是 0。图 7(a)、7(b)分别表示位移 $x_0 = 0$ 和 $x_0 = 0.5$ 像素位移情况下的相位相关曲线。



(a) $(x_0, y_0) = (0, 0)$ (b) $(x_0, y_0) = (0.5, 0)$

图 7 相位相关函数 POC(x, y)

Fig. 7 3-D plots of POC function

为求解位移量 (x_0, y_0) ,文献[11]提出了一种用 sinc 函数近似表示 Dirachlet 函数的方法。

$$C(x, y) = \frac{\sin(\pi(Mx - x_0)) \sin(\pi(Ny - y_0))}{\pi(Mx - x_0) \pi(Ny - y_0)}, \quad (11)$$

由式(11)可解得位移量 (x_0, y_0)

$$\frac{x_0}{M} = \frac{C(1, 0)}{C(1, 0) \pm C(0, 0)}, \quad (12)$$

$$\frac{y_0}{N} = \frac{C(0, 1)}{C(0, 1) \pm C(0, 0)}. \quad (13)$$

式(12)、(13)中,当 M 或 N 为奇数时符号取正,偶数时取负。

4 样机实验结果

4.1 实验装置

根据本文方案,设计制作了光电平台视轴稳定精度检测样机,样机包括自准直光学系统、MC1310 型高速数字 CMOS 相机、平面反射镜、工作站等。在实验室条件下进行了样机精度标定试验,Leica 经纬仪标定检测精度为 $0.5''$ 。样机自准直光学系统焦距 $f = 281.6 \text{ mm}$,视场角 $\omega = 4^\circ$,动态检测范围 $\theta = \pm 1^\circ$,星点孔直径约 $\Phi = 100$

μm ,高速数字 CMOS 相机图像分辨率为 $1\,280 \times 1\,024 \times 8 \text{ bit}$,像元尺寸 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$,最高帧频为 500 frame/s 。实验装置如图 8 所示。

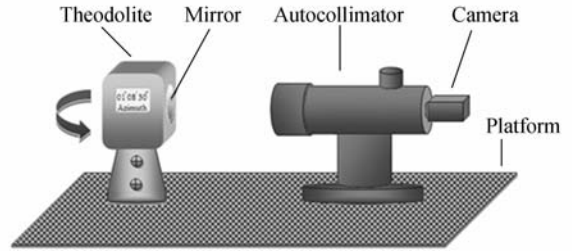


图 8 光斑图像配准实验装置

Fig. 8 Arrangement of experimental system

系统工作时,自准直光学系统的星点孔与数字相机传感器靶面共轭,光线通过星点孔,经自准直光学系统反射镜到达 Leica 经纬仪上的反射镜后,光线返回到达 CMOS 相机传感器靶面,CMOS 相机实现光信号到数字信号转换。工作站通过串行通信接口发送指令控制 Leica 经纬仪偏转,实现光斑影像在传感器靶面上的位移效果,通过视频采集卡采集光斑图像,采用相位相关算法检测光斑位移量,根据几何关系解算出反映经纬仪角度变化的测试角度数据。

本文采用总体标准差(Standard Deviation, SD)客观评价样机检测误差。因为经纬仪偏转角度可直接从显示窗口读取,所以样本真值已知,标准差反映的是样本数据关于真值的偏离程度,计算公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - L_i)^2}, \quad (14)$$

其中, θ_i 为测试角度, L_i 为 Leica 经纬仪显示角度, n 为样本个数, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

4.2 实验分析

在实验室通过 Leica 经纬仪调整反射镜角度,每次将 Leica 经纬仪转过后,记录经纬仪角度数据,检测两幅光斑图像之间的位移量,计算偏移角度 θ ,根据公式(14)计算样机检测误差。本文共计采集 18 帧图像,原始图像见图 9,其中圈注部分有光斑图像,测试误差结果见图 10。

从实验结果可以看出,本文方法最大误差为 $3.44 \mu\text{rad}$,标准差为 $1.93 \mu\text{rad}$ 。



(a)第1帧 (b)第2帧 (c)第10帧
(a)Frame 1 (b)Frame 2 (c)Frame 10

图9 光斑序列图像

Fig. 9 Light spot sequence

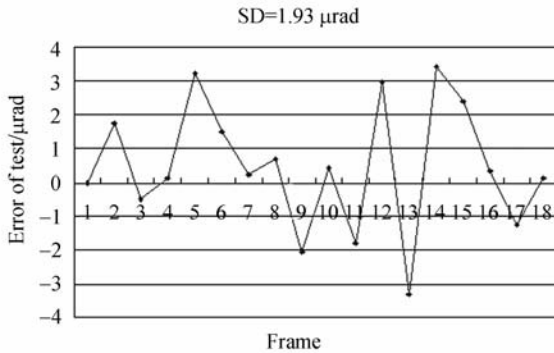


图10 测试误差曲线

Fig. 10 Error curve

参考文献:

- [1] 宋丰华. 现代空间光电系统及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
SONG F H. *Modern Spatial Electro-Optical Imaging System and Its Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 沈宏海, 刘晶红, 贾平, 等. 摄像稳定技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 115-120.
SHEN H H, LIU J H, JIA P, *et al.*. Overview of imaging stabilization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 115-120. (in Chinese)
- [3] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 82-88.
JIA P, ZHANG B. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 82-88. (in Chinese)
- [4] 段志姣, 王宇. 机载光电系统稳定精度测试方法研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(3): 53-56.
DUAN ZH J, WANG Y. Study on measurement of dynamic stabilization precision of airborne electro-optical system [J]. *Optics & OptoElectronic Tech-*

5 结 论

本文以实际工程需求为依据, 结合光学系统设计和计算机图像处理技术, 选择大视场光学设计方案, 使用高灵敏度、高分辨率、线性区域大的高速数字 CMOS 相机替代常规方法使用的 PSD, 采用检测精度高、抗噪声干扰能力强的相位相关图像配准算法检测光斑图像之间的亚像元级位移量, 提高了光电平台视轴指向角度的检测精度, 弥补了大视场光学测量系统空间分辨率低的不足, 探索出一条适合光电平台视轴稳定精度检测的新思路和有利的技术途径。实验结果表明, 本文方法动态检测范围为 $\pm 1^\circ$, 测量最大误差为 $3.44 \mu\text{rad}$, 标准差为 $1.93 \mu\text{rad}$, 能够满足动态检测及大视场、高精度的检测要求。

nology, 2008, 6(3): 53-56. (in Chinese)

- [5] MASAYUKI K. Hole position and inclination sensor with 2 dimension PSD and its application to automatic shaft inserting [J]. *International Conference on Multi-sensor and Integration Systems*, 2000, 45(4): 75-79.
- [6] 徐辉, 舒晓武, 牟续东. 基于 PSD 的电振动台特性检测系统研究[J]. 光学仪器, 2006, 28(1): 80-84.
XU H, SHU X W, MOU X D. Research of testing system of characteristics of electrical vibration table base on PSD [J]. *Optical Instruments*, 2006, 28(1): 80-84. (in Chinese)
- [7] 李国宁, 刘妍妍, 金龙旭. 用于动态目标跟踪的面阵 CCD 成像系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 558-564.
LI G N, LIU Y Y, JIN L X. Area CCD imaging system used in moving target tracking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 558-564. (in Chinese)
- [8] 史亚莉, 高云国, 张磊, 等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 726-732.
SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocolli-

- mator by changing hardware parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(4):726-732. (in Chinese)
- [9] 黎俊,彭启民,范植华. 亚像素级图像配准算法研究[J]. 中国图象图形学报,2008,13(11):2071-2075.
LI J,PENG Q M,FAN ZH H. A survey of sub-pixel image registration methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13 (11); 2071-2075. (in Chinese)
- [10] ARGYRIOU V, VLACHOS T. Sub-pixel motion estimation using gradient cross-correlation [C]. *The 7th International Symposium on Signal Processing and its Applications (ISSPA), Paris*, 2003:1-4.
- [11] FOROOSH H,ZERUBIA J, BERTHOD M. Extension of phase correlation to sub-pixel registration[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2002, 11(3):188-200.
- [12] TAKITA K, AOKI T, SASAKI Y, *et al.*. High accuracy sub-pixel image registration based on phase-only correlation[J]. *IEICE Trans. Fundamentals*, 2003,E86-A, 8:1925-1934.
- [13] ERTURK S. Digital image stabilization with sub-image phase correlation based global motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, 49(4):1320-1325.
- [14] ARGYRIOU V, VLACHOS T. On the estimation of sub-pixel motion using phase correlation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2007, 16 (3): 033018-1-033010-8.

作者简介:



孙 辉(1963—),男,吉林柳河人,研究员,1985年于吉林大学获得理学学士学位,主要从事数字图像处理及计算机仿真研究。E-mail: sunh@ciomp. ac. cn



李志强(1980—),男,吉林白城人,助理研究员,2006年于吉林大学获得理学硕士学位,主要从事基于DSP及FPGA的数字通讯技术研究。E-mail: mybugatti@126. com



郎小龙(1962—),男,吉林长春人,副研究员,1991年于长春光机学院获得工学硕士学位,主要从事光电平台结构设计及检测工作。E-mail: langxiaolong@gmail. com



孙丽娜(1973—),女,吉林长春人,研究员,2003年于吉林大学获得工学博士学位,主要从事光电平台总体设计的研究。E-mail: sunlina0431@sina. com