

采用 CCD 相机测量目标靶形心位置精度的方法

张 宁, 沈湘衡

(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: 利用 CCD 相机完成对目标靶形心位置精度的测量后, 需要对其测量精度进行验证, 提出了一种通过测量目标靶图像特征点到形心位置的距离偏差来对测量精度进行验证的方法。介绍了利用 CCD 相机对目标靶形心位置进行测量的原理。为了对形心位置测量结果进行验证, 提出在目标靶的形心及特征点位置上加装 LED 光源作为特征目标点, 用于在像面上提取形心及特征点像素坐标值。根据目标靶与像面坐标的对应关系, 给出了精度验证的数据处理方法。进行了两次检测实验, 形心测量精度分别为 $\sigma_{A1}=0.037$ mrad, $\sigma_{E1}=0.021$ mrad, $\sigma_{A2}=0.032$ mrad, $\sigma_{E2}=0.015$ mrad, 两次实验结果基本一致。实验表明: 利用该方法可以完成对 CCD 相机目标靶形心位置测量精度的验证。

关键词: CCD 相机; 形心位置; 目标靶; 特征点; 质心坐标

中图分类号: V556.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0279-06

Verification method for measuring accuracy of shape center location of target by using CCD camera

Zhang Ning, Shen Xiangheng

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

Abstract: In order to verify the measuring accuracy of the shape center location of the target by using CCD camera, a novel method was proposed in this paper as making use of testing the distance error from the feature points to the shape center location of target image plane indirectly. The measuring principle of testing the shape center location of target based on CCD camera was introduced. In order to extract coordinate values of the shape center location and feature points of target conveniently, the LED sources were installed at the corresponding positions of simulated target. According to the corresponding relation between the target and the image coordinates, the data processing methods of verifying the measuring accuracy of shape center location were given. The experiments were repeated twice. The results of measuring accuracy of shape center location are $\sigma_{A1}=0.037$ mrad, $\sigma_{E1}=0.021$ mrad, $\sigma_{A2}=0.032$ mrad, $\sigma_{E2}=0.015$ mrad, and two experimental results are basically identical. The results show that the method of verify the measuring accuracy of shape center location of target using CCD camera is evaluated exactly and conveniently.

Key words: CCD camera; shape center location; target; feature point; centroid coordinate

收稿日期: 2014-05-12; 修订日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(611307114)

作者简介: 张宁(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光电测量设备精密检测技术方面的研究。Email: ning0025@163.com

0 引言

在激光制导武器性能测试过程中,需要将激光光斑投射到一个目标靶上,然后激光制导武器捕获、瞄准该激光光斑并进行打击精度实验。为了提高制导性能测试精度,要求激光光斑能够准确投射到目标靶的形心位置^[1-2]。那么,在发射激光前必须确定激光器相对目标靶形心位置。

在试验靶场进行试验时,目标靶距离激光器 1 km 左右,在如此远距离测量时采用几何尺寸测量法无法完成高精度的形心精度测量。为此,需要利用 CCD 相机成像方法对形心位置进行非接触式测量。实现过程如下:将一台 CCD 相机与激光器安装在同一个跟踪架上,通过光轴校准保证 CCD 相机与激光器指向一致。此时目标靶在 CCD 相机上成像,利用边缘检测法提取目标靶图像边缘,寻找图像边缘上特征点并计算出目标靶形心在像面上的坐标值,利用该值引导跟踪架使目标靶形心位置位于 CCD 相机视场中心。激光器发射激光,即可保证激光光斑位于目标靶中心^[3]。跟踪架配置高精度的角度测量元件和伺服控制系统,保证 CCD 相机的指向精度。为了便于测量形心位置,一般采用形状规则的长方形目标靶,并在平整靶面上喷涂特殊涂料,用于保证目标靶漫反射系统满足激光制导武器瞄准跟踪要求。

由于在外场距离测量目标靶形心位置时缺少目标靶空间角度真值,无法对 CCD 相机测量的形心位置准确性进行直接评价。为此,提出一种间接的形心测量精度验证方法,用于评价 CCD 相机测量目标靶形心位置的准确性。由于实际目标靶带有特殊反射材料,且有激光光斑照射,不允许额外安装发光目标源。为此,选用形状规则、形心位置准确可测的靶板作为验证目标靶,事先准确测量出验证目标靶形心以及其他特征点位置,并在上面安装 LED 光源,用于图像质心坐标提取。将验证目标靶放在 CCD 相机正前方,使 LED 光源在 CCD 相机上成像,利用质心法提取 LED 光源在相面上的坐标值并换算为角度值,通过数据处理得到形心测量精度,完成测量结果的验证。

1 利用 CCD 相机测量目标靶形心位置原理

由于 CCD 相机像面坐标与被测目标靶空间位

置具有对应关系,利用 CCD 相机对目标靶形心位置测量的基本原理如图 1 所示^[4]。目标靶在 CCD 相机上成像后,提取目标靶图像边缘坐标值^[5-6],并通过计算即可得到目标靶形心位置坐标。

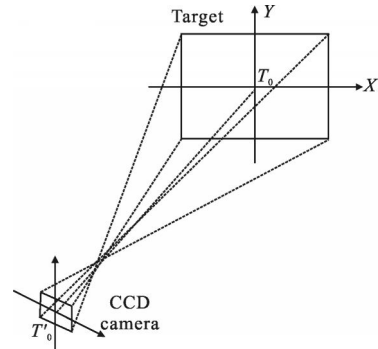


图 1 目标靶形心测量原理图

Fig.1 Theory of testing target's shape center location

如目标靶在 CCD 相机上成像如图 2 所示。利用图像边缘检测方法^[7]得到目标靶图像的边缘如图 3 所示。

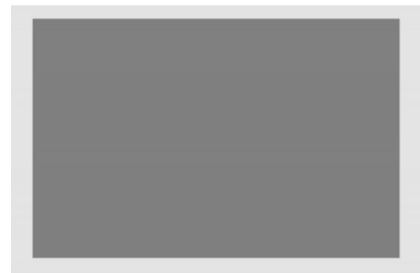


图 2 目标靶漫反射面成像示意图

Fig.2 Image of diffuse reflecting surface of target

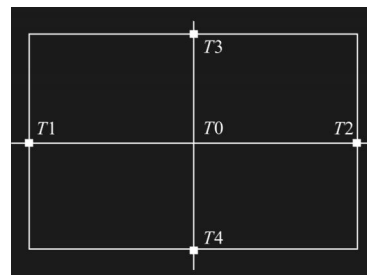


图 3 目标靶图像边缘提取及形心位置测量

Fig.3 Edge extraction of target's image and measurement of shape center location

在图像边缘上选取典型特征点像素坐标计算目标靶图像的形心像素坐标值。图 3 中,分别选择图像 4 个边缘的中点 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 作为边缘特征点。以

像面中心作为坐标原点,按照下式计算形心 T_0 的坐标值:

$$\begin{cases} X_{T_0}=(X_{T_1}+X_{T_2})/2 \\ Y_{T_0}=(Y_{T_1}+Y_{T_2})/2 \end{cases} \quad (1)$$

计算得到形心 T_0 的坐标值后,乘以像元分辨率即可得到目标靶形心位置相对 CCD 相机像面中心偏移量,将该值送至跟踪架伺服控制系统调整相机指向,使目标靶形心位于像面中心位置,反复测量、调整后即可保证发射的激光光斑落在目标靶形心位置。

2 形心位置测量的验证方法

由于利用 CCD 相机对目标靶形心位置的测量是激光光斑能够准确投射的基准,因此,需要对形心位置测量精度进行验证。

由于在试验场无法完成 CCD 相机相对目标靶形心位置的空间位置关系的精确测量,导致 CCD 相机测量的目标靶形心位置没有真值,也就无法对测量精度做出准确评价。为此,提出了文中的验证测量方法。

根据成像原理,目标靶放在 CCD 相机正前方并且在像面上成清晰的像,则目标靶图像上对称特征点到形心的像素坐标值相等。基于上述几何关系和成像原理,文中提出通过测量目标靶图像特征点的 CCD 相机像素坐标值并转换为空间角度,根据图像特征点到形心距离偏差计算出形心位置测量精度,从而完成对测量结果的验证。

为了保证检测过程与形心测量原理一致,并且保证特征点尽量覆盖整个靶面,目标靶特征点位置选择如图 4 所示。图 4 中,目标靶形状规则,并且能够准确测量目标靶形心位置 T_0 。测出目标靶 4 条边缘线的中心以及 4 个顶点作为边缘特征点 $T_1 \sim T_8$ 。则 T_1 、 T_5 、 T_2 、 T_6 、 T_3 、 T_7 、 T_4 、 T_8 分别关于 T_0 对称。

虽然目标靶上特征点位置可以准确测量,但是难于准确提取特征点像素坐标值,会给检测带来误差,并且不允许额外安装发光源。为此,采用形状类似的验证目标靶代替。按图 4 方式,准确测出形心及 8 个特征点位置后,在对应位置上安装高亮度 LED 光源。9 个 LED 光源的尺寸、发光强度、安装垂直度尽量保持一致。将验证目标靶放在 CCD 相机正前方,点亮 LED 光源,使 LED 光源在像面上成清晰的像,并保证 LED 光源图像尺寸便于图像质心坐标值

提取。此时可以直接选择 LED 光源的像素坐标作为特征点像面坐标进行形心位置测量精度计算。由于指标中一般给出的形心位置测量精度指标为角度值,为了便于计算和表述,下文中略去将坐标值转换为角度值的过程,直接按照空间角度公式描述。

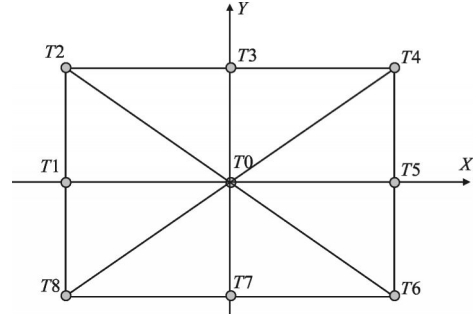


图 4 验证目标靶形心及特征点分布

Fig.4 Distributing of shape center location and feature points of simulated target

图 4 中,设形心及特征点相对 CCD 相机像面中心的方位角分别为 $\Delta A_{T_0} \sim \Delta A_{T_8}$, 俯仰角分别为 $\Delta E_{T_0} \sim \Delta E_{T_8}$, 重复测量 10 次作为数据处理样本。形心位置测量精度检测的数据处理方法如下:

(1) 分别计算 8 个特征点 $T_1 \sim T_8$ 相对形心 T_0 的像面角度偏差: α_{AT_i} 、 α_{ET_i} :

$$\alpha_{AT_i} = |\Delta A_{T_i} - \Delta A_{T_0}| \quad (2)$$

$$\alpha_{ET_i} = |\Delta E_{T_i} - \Delta E_{T_0}| \quad (3)$$

式中: $i=1 \sim 8$ 。分别对 10 次测量值进行计算处理。

(2) 计算 T_1 、 T_5 、 T_2 、 T_6 、 T_3 、 T_7 、 T_4 、 T_8 这 4 对对称特征点角度的偏差 β_{AT_i} 、 β_{ET_i} :

$$\beta_{AT_i} = \alpha_{AT_i} - \alpha_{AT_{4+i}} \quad (4)$$

$$\beta_{ET_i} = \alpha_{ET_i} - \alpha_{ET_{4+i}} \quad (5)$$

式中: $i=1 \sim 4$ 。并对 10 次测量值取平均值 $\bar{\beta}_{AT_i}$ 、 $\bar{\beta}_{ET_i}$:

$$\bar{\beta}_{AT_i} = \sum_{j=1}^{10} \beta_{AT_i} \quad (6)$$

$$\bar{\beta}_{ET_i} = \sum_{j=1}^{10} \beta_{ET_i} \quad (7)$$

(3) 分别对 4 对对称特征点角度偏差取 10 次测量的均方根 σ_{A_i} 、 σ_{E_i} :

$$\sigma_{A_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{10} (\beta_{AT_{ij}} - \bar{\beta}_{AT_i})^2 / 10} \quad (8)$$

$$\sigma_{E_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{10} (\beta_{ET_{ij}} - \bar{\beta}_{ET_i})^2 / 10} \quad (9)$$

(4) 计算形心测量精度 σ_A 、 σ_E ，将该值作为 CCD 相机形心位置测量精度验证结果：

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \sigma_{A_i}^2 / 4} \quad (10)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \sigma_{E_i}^2 / 4} \quad (11)$$

3 验证实验

利用该方法对某型号 CCD 相机的形心位置测量精度进行验证实验。CCD 相机主要参数指标及目标靶形心测量精度如表 1 所示。根据相机视场、像元数目计算得到像元分辨率为 0.028 mrad，目标靶形心位置测量精度要求为 0.05 mrad。

表 1 CCD 相机主要参数及形心位置测量精度指标
Tab.1 Main parameter index of CCD camera and measuring accuracy

Image array	Pixel resolving/mrad	Measuring accuracy/mrad
640×512	0.028	0.05

实验用的验证目标靶长 2 000 mm，高 1 700 mm，按照图 4 分布安装了 LED 光源。为减小误差，对 LED 光源灯芯位置进行了筛选，使其位置尽量保持一致。对 LED 光源安装位置要求准确测量、加工，经测量，安装误差在 0.5 mm 范围内。该安装误差引起的测量误差最大为 0.12 像元，也就是 0.003 4 mrad，相对 0.05 mrad 的测量精度满足要求。

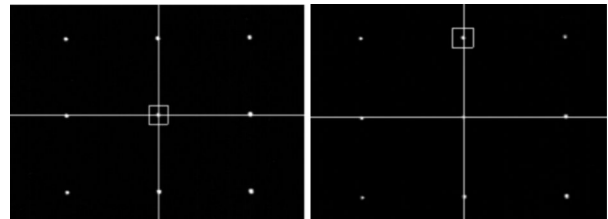
将验证目标靶放在 CCD 相机正前方适当距离位置，使 LED 光源在 CCD 相机上成清晰的像。调整验证目标靶位置，使验证目标靶形心尽量位于 CCD 相机像面中心位置，并且使验证目标靶与 CCD 像面平行。调节方法为目标靶边缘中点位置 4 个特征点 $T1$ 、 $T3$ 、 $T5$ 、 $T7$ 分别位于 CCD 像面十字丝上，并使 $T1$ 与 $T5$ 、 $T3$ 与 $T7$ 分别关于 $T0$ 对称，用于保证验证目标靶正对 CCD 相机像面，提高形心位置测量精度。

为保证 LED 光源清晰成像，选择在夜晚进行实验。CCD 相机拍摄的 LED 光源的像如图 5 所示。图 5 中，可以发现 LED 光源成像清晰、形状规则，适合图像质心坐标提取。

对于形心及特征点坐标提取采用亚像素内插细分算法中的质心法^[8-9]。灰度图像 $f(i, j)$ 中目标 S 的质心为 (x, y) ^[10-11] 为：

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{(i,j) \in S} if(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} f(i,j)} \\ Y = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jf(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} f(i,j)} \end{cases} \quad (12)$$

图 5(a)、(b)分别采用公式(12)对形心 $T0$ 、特征点 $T3$ 进行坐标提取。取 10 幅图像，以相同方法对每幅图像 9 个点全部提取完成后，特征点坐标值分布如图 6 所示。以形心 $T0$ 、特征点 $T3$ 为例，其坐标值分布分别如图 7、图 8 所示，其余特征点坐标分布类似。从图 7、图 8 中可以看出，坐标值随机分布，其主要是在外场环境下受地面振动、风阻等因素使目标靶和 CCD 相机相对位置发生变化引起的。



(a) 形心 $T0$ 的图像质心坐标提取

(b) 特征点 $T3$ 图像质心坐标提取

(a) Getting centroid coordinate of $T0$

(b) Getting centroid coordinate of $T3$

图 5 验证目标靶图像及质心坐标提取

Fig.5 Getting centroid coordinate of simulated target's image

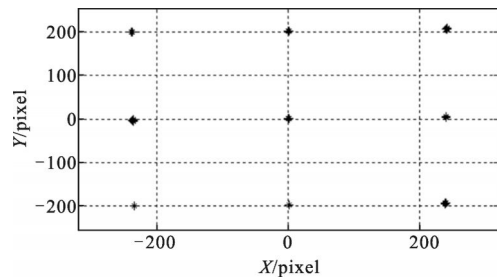


图 6 10 幅图像的形心及特征点图像质心坐标分布

Fig.6 Centroid coordinate's distribution of shape center location and feature points of 10 images

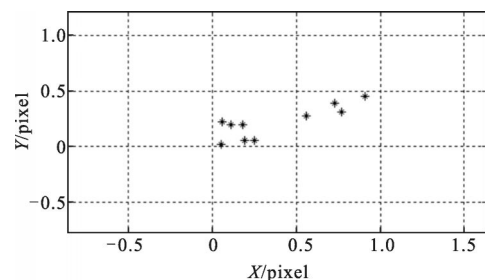


图 7 10 幅图像的形心 $T0$ 图像质心坐标分布

Fig.7 Centroid coordinate's distribution of shape center location $T0$ of 10 images

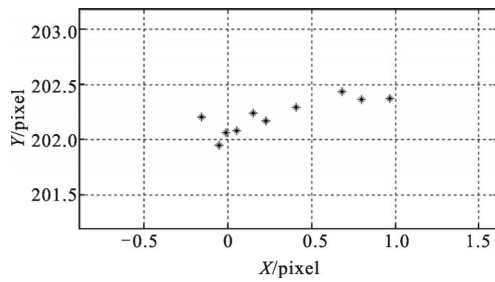


图 8 10 幅图像的特征点 T3 图像质心坐标分布

Fig.8 Centroid coordinate's distribution of feature point T3 of 10 images

对计算得到的坐标值按照第 2 节中描述的方法进行数据处理, 得到形心测量精度 σ_A 、 σ_E 。经计算, $\sigma_A=0.037$ mrad, $\sigma_E=0.021$ mrad, 满足 CCD 相机形心位置测量精度指标要求。

在相隔一段时间后又利用该 CCD 相机和验证目标靶进行了第二次形心位置测量精度验证实验。实验结果如图 9~11 所示。

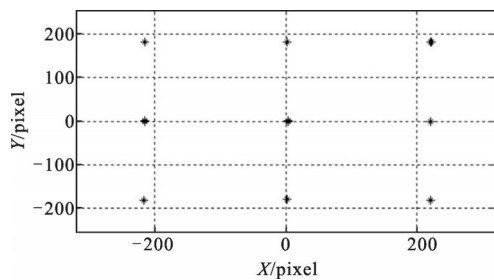


图 9 第二次实验中 10 幅图像的形心及特征点图像质心坐标分布

Fig.9 Centroid coordinate's distribution of shape center location and feature points of 10 images in the second experiment

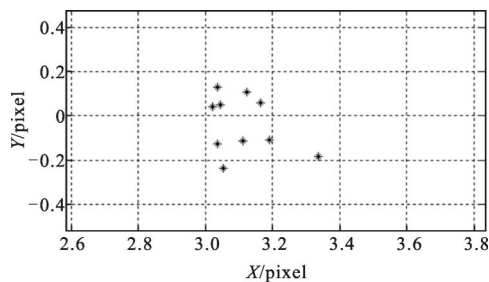


图 10 第二次实验中 10 幅图像的形心 T0 图像质心坐标分布
Fig.10 Centroid coordinate's distribution of shape center location T0 of 10 images in the second experiment

对第二次实验数据按照 3.2 小节中描述的方法进行数据处理后, 得到形心测量精度 $\sigma_A=0.032$ mrad, $\sigma_E=0.015$ mrad, 满足 CCD 相机形心位置测量精度指

标要求, 并且两次测量结果基本一致。同时也表明该验证方法可以用于对 CCD 相机目标靶形心位置测量精度的验证。

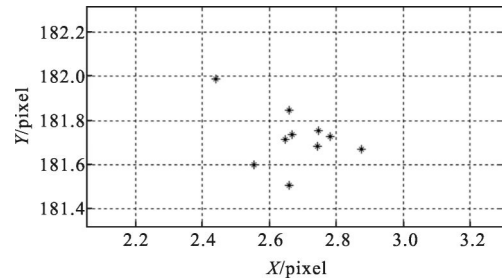


图 11 第二次实验中 10 幅图像的特征点 T3 图像质心坐标分布
Fig.11 Centroid coordinate's distribution of feature point T3 of 10 images in the second experiment

4 结 论

为了完成对 CCD 相机测量目标靶形心位置精度的验证, 文中提出了一种测量验证目标靶边缘目标特征点到形心位置的偏差的验证方法。通过提取验证目标靶图像形心及特征点坐标值并进行数据处理就可以完成对形心位置测量精度的验证。进行了两次实验测试, 形心测量精度分别 $\sigma_{A1}=0.037$ mrad, $\sigma_{E1}=0.021$ mrad, $\sigma_{A2}=0.032$ mrad, $\sigma_{E2}=0.015$ mrad。两次实验结果基本一致, 实验表明: 利用该方法可以完成对 CCD 相机目标靶形心位置测量精度的验证。

参 考 文 献:

- [1] Di Xu, Yu Weili, Liu Zhiying, et al. Research on the method of calculating laser spot center [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 31(3): 9-12. (in Chinese)
邸旭, 于伟莉, 刘智颖, 等. 激光光斑中心位置计算方法的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(3): 9-12.
- [2] Wang Kuangbiao. Status quo, key technology and development of laser guided weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 651-655. (in Chinese)
王狂飙. 激光制导武器的现状、关键技术与发展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 651-655.
- [3] Liu Zhaorong, Wang Zhiqian, Liu Shaojin, et al. Research of precise laser spot center location algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(5): 399-401. (in Chinese)
刘兆蓉, 王志乾, 刘绍锦, 等. 激光光斑中心精确定位算法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 399-401.

- [4] Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan, et al. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0915001. (in Chinese)
杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0915001.
- [5] Lin Yuchi, Cui Yanping, Huang Yinguo. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14 (3): 509–514. (in Chinese)
林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3): 509–514.
- [6] Dong Jing, Yang Xia, Yu Qifeng. Fast line segment detection based on edge connecting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315003. (in Chinese)
董晶, 杨夏, 于起峰. 基于边缘连接的快速直线段检测算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315003.
- [7] Demigny D. Onoptimal linear filtering for edge detection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(7): 728–737.
- [8] Xiao Fenggang, Liu Jianguo, Zeng Congyong, et al. Newdenosingmethod for improving speckle image centroid accuracy [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25 (12): 3683–3687. (in Chinese)
肖锋钢, 刘建国, 曾淙泳, 等. 一种新型提高光斑图像质心精度的去噪方法 [J]. *计算机应用研究*, 2008, 25 (12): 3683–3687.
- [9] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, et al. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2013, 40(3): 0205007. (in Chinese)
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0205007.
- [10] Tang Shengjin, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa, et al. Modified systematic error compensation algorithm for star centroidsub-pixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1503–1507. (in Chinese)
唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1503–1507.
- [11] Wang Xijun. Computation and comparison of laser speckle with sub-pixel measurement methods [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 653–657. (in Chinese)
王希军. 激光散斑的亚像素位移法计算及比较[J]. *中国光学*, 2012, 5(6): 653–657.