

基于 PSD 的长距离多阴影照相站的空间坐标一致性标定方法

王小锋 沈 华 李建欣 朱日宏 黄 亚 荣四海

(南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要 目前弹丸运动姿态测量的主要方法是对多阴影照相站抓拍的系列图像进行处理分析,而只有当多阴影照相站处在同一空间坐标系中时,才能将系列图像的特征点与该点对应的空间坐标联系起来,从而得到准确的结果。针对这一问题,利用位置敏感探测器(PSD),提出一种长距离多阴影照相站的空间坐标一致性标定方法。分析了该标定方法的测量精度和重复性。搭建了一套系统并开展了相关实验,实验结果表明,该标定方法的位置校准误差小于 0.1 mm。

关键词 测量;光学测量;空间坐标一致性;阴影照相站;位置敏感探测器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.041201

Method for Calibrating the Spatial Coordinate Coherence of Shadowgraph-Taking Camera Stations at Long Distance with PSD

Wang Xiaofeng Shen Hua Li Jianxin Zhu Rihong Huang Ya Rong Sihai

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The main method of the attitude measurement is to get series of graphs for analyzing the changing attitude of the projectile by utilizing multiple shadowgraph-taking camera stations. However, the premise of accurate results is that feature points on graphs must match their spatial coordinates in a certain spatial coordinate. Aiming at this problem, we propose a method of calibrating the spatial coordinate coherence for the long distance and multiple shadowgraph-taking camera stations with position sensitive detector (PSD), and analyze the measurement accuracy and repeatability of this method. A system is developed to do some regular experiments. According to the results, the accuracy of this calibration method is superior to 0.1 mm.

Key words measurement; optical testing; spatial coordinate coherence; shadowgraph-taking camera station; position sensitive detector

OCIS codes 120.4820; 140.3300; 140.7010

1 引 言

弹丸外弹道飞行姿态变化测量的主要方法是沿弹道布置一组阴影照相站,每个测量站用正交摄影获得两幅弹丸阴影图像,通过对图像的计算处理,得出弹丸的飞行姿态角和质心空间坐标^[1]。用数学方法处理得到弹丸的质心轨迹及弹丸飞行姿态角变化曲线。然而,只有标定好阴影照相站的空间坐标一致性,才能将系列图像得出的不同位置的姿态换算到同一空间坐标上,从而得到理想的结果^[2]。所以阴影照相站空间坐标一致性的标定工作是所有工作的前提,也是本文所要解决的问题。

目前,国内外标定阴影照相站空间坐标的方法一般有两种,即载体型和悬线型。所谓载体型,是在沿靶

收稿日期: 2012-12-11; **收到修改稿日期**: 2013-01-06; **网络出版日期**: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(U1231112)资助课题。

作者简介: 王小锋(1988—),男,博士研究生,主要从事光学精密测试技术方面的研究。E-mail: wxf1988222@126.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学精密测试技术方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

道移动的小车上设置一个网格载体,并以此作为标准参考面。标定空间坐标时,将载体在靶道内阴影照相站精确定位,并将载体上的标准参考面记录在底片上。用此方法使得每一个阴影照相站所拍摄照片都联立到同一空间坐标系中^[3]。所谓悬线型,其基准参考物是由沿纵向及横向设置的悬线和悬线上精心校准的玻璃小球构成的,摄影记录时,基准参考物及实验弹丸同时记录在照片上。

欧洲各国实验靶道多使用载体型,而美国的一些实验靶道多使用悬线型。我国常规兵器弹道靶道的空间一致性标定方法选用的是载体型。载体在靶道内阴影照相站的精确定位是空间一致性标定工作中的重要一步,然而目前该标定方法在载体的精确定位上还存在很大问题。现有的定位方法是将载体搁置台调至水平,从载体搁置台上射出一道激光,调整系统姿态,使得校准每一照相站时激光最终打在同一个固定的点上。该方法完全靠实验人员目测,激光光束在长距离后会发散到很大,无法精确判定光点位置^[4]。针对这一问题,本文提出了基于光学杠杆原理和位置敏感探测器(PSD)的空间坐标标定方法,大大提高了载体的定位精度,从而使得标定工作更加有效。

2 空间坐标一致性系统

该空间坐标一致性系统包括激光发射系统和目标接收系统,如图1所示。激光发射系统发出一条准直的激光作为目标接收系统的基准。调节激光发射系统,使得激光达到水平状态,并且激光方向在弹丸的飞行方向上。目标接收系统将基准激光缩束,激光经过精密光学系统,分为两束最终射到两个PSD上,作为接收系统姿态调节的依据。

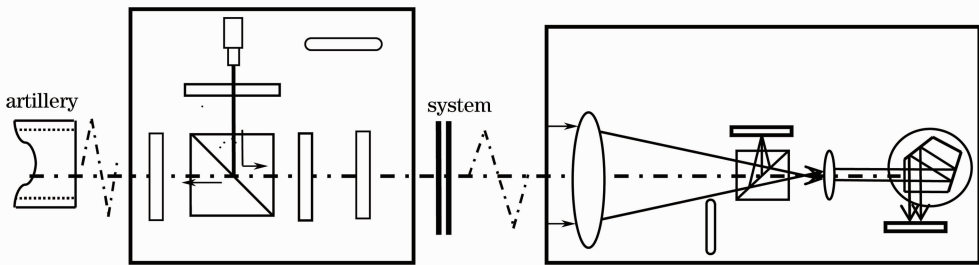


图1 系统总体结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of the system

激光发射系统射出一束发散角较小、能量较高的激光作为基准,对靶道内阴影照相站精确定位。该激光一部分射向炮筒中心,用于激光光束与火炮基线的重合,另一部分水平射向靶道作为空间基准线,如图2所示。

目标接收系统包括对准系统和提供相机标定的基准网格面,如图3所示。通过对准目标接收系统的姿态,使得其光轴与基准激光光轴共线,此时基准网格才可以作为标定相机的基准面。完成一个照相站的相机标定后,

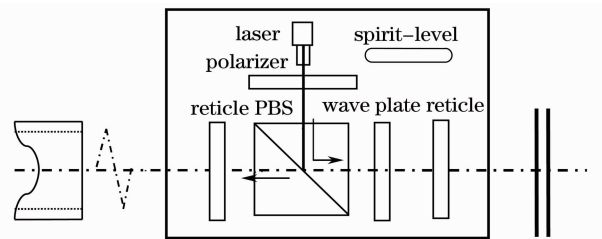


图2 激光发射系统示意图

Fig. 2 Sketch of laser emission system's

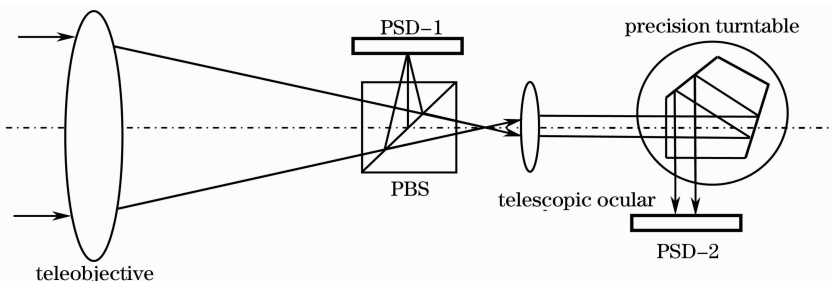


图3 目标接收系统示意图

Fig. 3 Sketch of the target receiver system

将目标接收系统移至下一照相站继续标定,直至完成所有参与摄像的照相站标定工作。

3 标定方法

用两个预先校准好的 PSD 作为光斑精确定位的工具。PSD 是一种连续的模拟式的光斑位置检测器件,工作原理是基于横向光电效应^[5]。PSD 检测到的是光斑重心,与光斑大小和形状无关。此处用高精度的 PSD,可以达到光斑位置的数字化精确定位。

分析可知,标定系统光轴与基准激光光轴存在两种情况:一种是两个光轴存在一定夹角;另一种是两个光轴平行但不共线^[6]。该方法将调校工作分为 3 部分,用两个 PSD 对此两种情况进行调校,分别记为 PSD-1 和 PSD-2。

3.1 校准两光轴存在夹角的问题

如图 4 所示,当系统光轴与基准激光光轴重合时,光线平行入射,经分光镜分光后聚焦在 PSD-1 上,此位置经过标定设置为 PSD-1 的标准位置,即此时 PSD-1 显示值为(0,0)[选用 PSD 为“SiTek-2L20”,其位置分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$,此处显示值(0,0)指(0.00 mm,0.00 mm),即允许小数点第三位在空中扰动造成光斑重心漂移的影响下有一个单位的跳动,下同]。若系统光轴与基准激光光轴存在夹角 θ ,主光线如图 4 中带箭头的粗虚线所示,经过分光镜分光后在 PSD-1 上的焦点发生偏移。PSD-1 检测到的光点位置坐标为 (x_1, y_1) 。

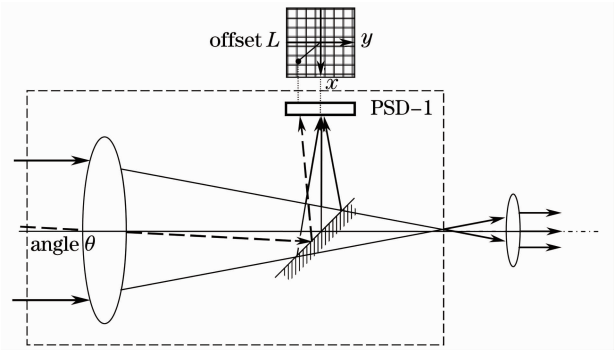


图 4 PSD-1 校准系统光轴与基准光轴平行原理图

Fig. 4 Parallel principle sketch of PSD-1 collimation optical axes between the system and standard laser beam

理论分析可知,夹角 θ 引起的聚焦点偏移量 L 为^[7]

$$L = f'\theta, \quad (1)$$

式中 f' 是缩束系统物镜焦距,则有

$$\theta = L/f' = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{f'}. \quad (2)$$

调整系统水平后,只有系统旋转带来的误差偏移量,即只有 x 轴上的分量。调整系统旋转,使得光点中心趋于 PSD-1 中心,直到 PSD-1 显示(0,0)为止。

由此即完成标定系统光轴与基准激光光轴的平行校准工作。

3.2 校准两光轴不共线的问题

系统光轴与基准激光光轴平行却不共线时,标定系统会存在无限种可能位置^[8]。此时可以用另一个 PSD 配合来解决这一问题。校准系统光轴与基准光轴共线原理如图 5 所示。

如图 5 所示,当系统光轴与基准激光光轴共线时,主光线被缩束,经五棱镜折转后的激光打在 PSD-2

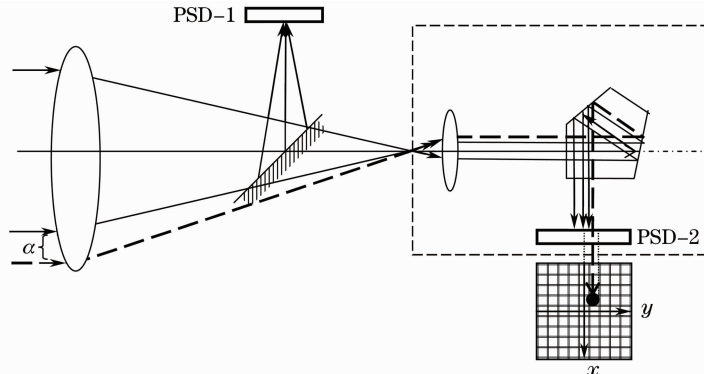


图 5 PSD-2 校准系统光轴与基准光轴共线原理

Fig. 5 Principle sketch of PSD-2 making optical axes of the system and standard laser beam collinear

上,此位置经过标定设置为 PSD-2 的标准位置,即此时 PSD-2 显示值为(0,0)。若系统光轴与基准激光光轴存在偏移量 a (边缘光线如图 5 中带箭头的粗虚线所示),最终激光落在 PSD-2 上的位置有一定的偏移,对应的坐标显示为 (x_2, y_2) 。由于该缩束系统是标准 $4f$ 系统,平行于光轴的入射光线的偏移量 a 对出射光线偏移量的影响也遵循望远镜的放大率公式,即 PSD-2 测得的光点偏移量 L 与 a 的关系如下:

$$a = AL = A \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad (3)$$

式中 A 为缩束系统的缩束比例。调整系统的上下、左右和平移,将 PSD-2 的位置调到(0,0)。

由于调整 PSD-1 的旋转姿态时会对系统的上下、左右姿态造成一定程度的偏差,而调整系统上下、左右姿态时也会不可避免地影响到系统水平、旋转的姿态,所以调整系统姿态时必须联合 PSD-1 与 PSD-2 共同调整,直到两个 PSD 的位置读数都为(0,0)。此时即完成了系统的光轴与基准激光光轴的共线调整。

3.3 校准高速相机的姿态

调整好系统姿态后,通过五棱镜将基准光线折转 90° ,此时光束垂直入射并透过标准参考面。此激光光束用来作为高速相机的位置基准。再配合标准参考面上的网格图像,调节高速相机位置以及姿态,使得高速相机的拍摄靶面与此光束垂直。用精密转台将此激光转至另一边的相机上,同理,按此法对阴影照相站的另一个相机完成标定工作。

依次按上述方法对每一个测量站的两架高速相机进行标定,并各自拍摄一幅包含标准物面投影在反射屏上的照片,供系列图像的处理使用。

4 系统与实验

为验证该方法的稳健性和实用性,设计并搭建了如图 6 和图 7 所示的光机电一体化系统,并做了相应实验。

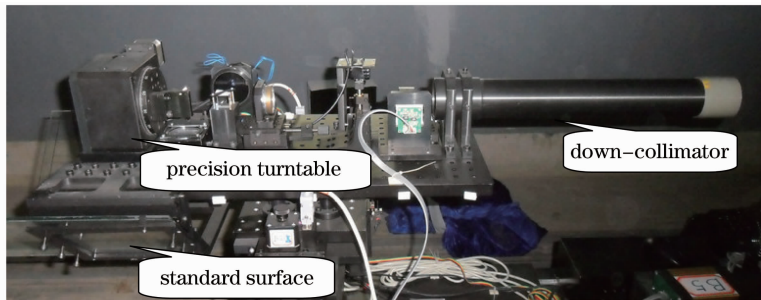


图 6 目标接收系统实物图

Fig. 6 Picture of the farget receiving system

通过实验验证系统的重复定位精度来推算空间坐标一致性的标定精度。实验时,去除实验室周围较大的振动源,调节好激光发射系统并将其姿态锁定,在接收端调节目标接收系统。选择一个照相站,将照相机姿态锁定,通过以上方法调节系统直至两个 PSD 显示(0,0)。此时拍摄一幅标准参考面的照片,选取照片中两线垂直相交的点 A、B、C 作为标准参考点。完成一组调校后,保持系统在基准激光光轴方向上的位置不变,将高度、倾斜和旋转姿态破坏并进行重新调整,重复以上实验 3 次,如图 8 所示。

实验采集图像的分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,对 3 次实验所得图像进行图像处理,选取其交点的中心像素,分别记为 A、B、C 3 点的像素,实验结果如表 1 所示。

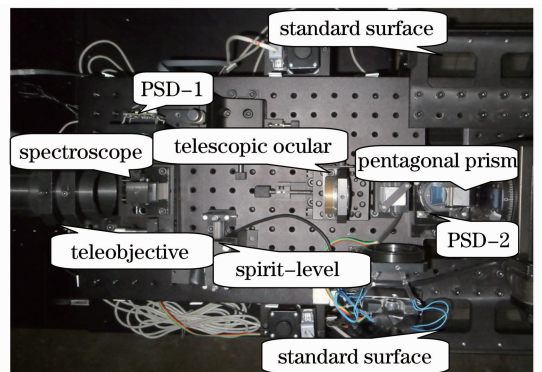


图 7 目标接收系统实物解析图

Fig. 7 Picture of specification of the farget receiving system

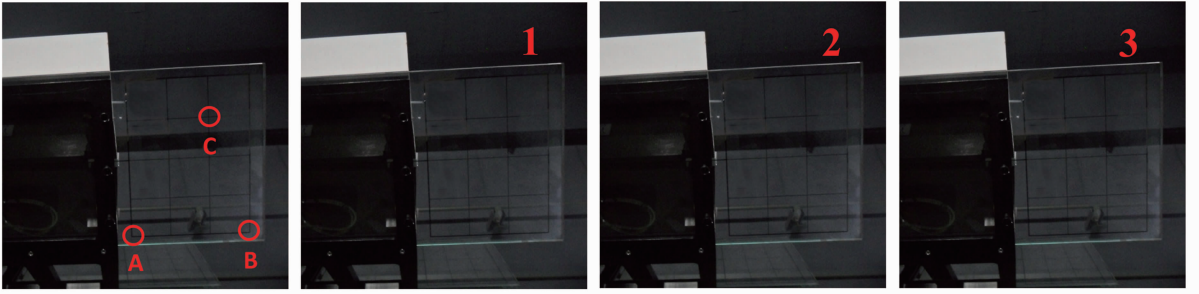


图 8 系统重复性实验

Fig. 8 Repeatability test of the system

表 1 系统重复性实验结果

Table 1 Repeatability test results of the system

Group number	PSD-1 / μm	PSD-2 / μm	Coordinates of A /pixel	Coordinates of B /pixel	Coordinates of C /pixel
1	(0, 1)	(1, 0)	(925, 372)	(1814, 397)	(1478, 1233)
2	(0, 0)	(0, 0)	(925, 373)	(1814, 398)	(1478, 1234)
3	(0, 1)	(1, 0)	(926, 372)	(1815, 397)	(1478, 1233)

实验拍摄实物大小经过标定为 200 mm, 3 次实验中 A、B、C 3 点坐标变化都在 1 pixel 以内, 则该实验中的精度应为

$$w = \frac{h}{R}, \quad (4)$$

式中 h 为实物大小, R 为采集图像的分辨率。将上述值代入(4)式计算可得

$$w = \frac{200}{2048} = 0.097 \text{ mm}. \quad (5)$$

此方法可以说明该系统在各个照相站所给相机基准面是基于同一基准, 即一束质量较好的激光, 并且该基准面的重复定位精度在 0.1 mm 以内。可见基于该方法的系统具有良好的重复性。

5 误差分析

系统的误差 Δ 由以下几个因素构成:

1) 激光发射系统光轴的水平误差 Δ_1 ;

激光发射系统的光轴通过高精度水准泡来判断, 故其水平误差 Δ_1 等于高精度水准泡的误差, 即 $\Delta_1 = 4''$ 。

2) 空间基准标定系统本身的共轴误差 Δ_2 ;

空间基准标定系统本身的共轴精度 Δ_2 受 PSD 的误差 Δ_{21} 以及六维调整机构的调节误差 Δ_{22} 影响。

PSD 的分辨率为 0.5 μm , 且 PSD 放置在望远缩束系统后约 150 mm 处, 故 Δ_{21} 经换算后约为 0.6^[9]。

六维调整机构的单方向步进分辨率较高, 其误差可忽略不计。其倾斜分辨率为 0.00125°, 故六维调整机构的调节误差 $\Delta_{22} = 0.00125^\circ = 4.5''$ 。

3) 五棱镜旋转扫描光束转向角精度 Δ_3 ;

五棱镜可实现光线的高精度 90° 折转, 其折转精度为秒级。选用的五棱镜的光束转向角误差 $\Delta_3 = 5''$ 。

4) 精密转台的误差 Δ_4 ;

高精度电控旋转台的最小分辨率为 0.33'', 重复定位误差为 1'', 故精密转台的误差 $\Delta_4 = 1''$ 。

5) 标准参考面与光轴的垂直误差 Δ_5 ;

标准参考面通过自准直法进行定位, 其定位精度为秒级, 故取标准物面与光轴的垂直误差 $\Delta_5 = 1''$ 。

6) 标准参考面网格图案误差 Δ_6 。

标准参考面的网格图案通过光刻技术刻写, 其刻写误差为 $\Delta_6 = 1 \mu\text{m}$ 。

由以上分析的误差极限加权平均得到此长距离多阴影照相站空间坐标一致性标定方法的校准误差为

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2}. \quad (6)$$

将各个误差分量值代入,计算可得 $\Delta=8''$

而阴影照相站相机与标准参考面的距离 $S\approx 2000\text{ mm}$,将校准精度 Δ 转换为弧度,并将弧度值近似为小角度的正切值,可得标定多阴影照相站的实际位置校准误差^[10],可按以下公式计算:

$$\omega_1 = \left(\frac{\Delta}{3600} \times \frac{\pi}{180} \right) \times S. \quad (7)$$

将 S 和 Δ 的值代入(7)式,计算可得用此标定方法可以达到的实际位置校准误差为 $\omega_1=0.07757\text{ mm}$ 。

6 结 论

阐述了一种利用 PSD 的长距离多阴影照相站空间坐标一致性的标定方法。该方法改变了以往靠实验人员目测判断来标定标准参考面的状况,改为用直线度较好的基准激光和精密的光学系统配合调校的数字化校准方式,从根本上解决了现有标定方法不能给载体精确定位的问题。理论分析该方法的实际校准误差可以小于 0.1 mm ,且具有优良的重复定位精度,标定效率较高,能为系列图像的分析提供可靠依据。

参 考 文 献

- Liu Shiping. Projectile Velocity Measurement and Data Processing[M]. Beijing: Enginery Industry Press, 1994. 13~16
刘世平. 弹丸速度测量与数据处理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994. 13~36
- Li Hanshan, Lei Zhiyong. Measurement of projectile burst coordinates by using multi-screen optical method and its error analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212003
李翰山, 雷志勇. 多幕光学法测量弹丸炸点坐标及误差分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0212003
- Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun *et al.*. Camera calibration based on flexible 3D target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3433~3439
孙军华, 刘震, 张广军等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3433~3439
- Ma Suodong, Zhu Rihong, Li Jianxin *et al.*. A multi-view measurement system for three-dimensional surface distributiodn of transient moving target[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3091~3097
马锁冬, 朱日宏, 李建欣等. 瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3091~3097
- Dong Lei, Liu Xinyue, Lin Xudong *et al.*. Improvement of performance and analysis of results of field experiments of Fourier telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0201004
董磊, 刘欣悦, 林旭东等. 傅里叶望远镜外场实验性能改进和结果分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0201004
- Liu Shiping, Yi Wenjun, Gu Jinliang *et al.*. A new method for image analysis and data extraction of projectiles in flight[J]. *Acta Armamentarii*, 2000, **21**(3): 201~204
刘世平, 易文俊, 顾金良等. 弹道靶道数据判读与处理方法研究[J]. 兵工学报, 2000, **21**(3): 201~204
- Yi Wenjun, Wang Zhongyuan, Qian Jisheng *et al.*. Test technique in ballistic range for missile models[J]. *J. Nanjing University of Science and Technology*, 2007, **21**(5): 537~540
易文俊, 王中原, 钱吉胜等. 导弹模型的靶道试验技术研究[J]. 南京理工大学学报, 2007, **21**(5): 537~540
- Yi Wenjun, Wang Zhongyuan, Yang Kai *et al.*. Research of flight characteristics of projectile with triangular cross-section [J]. *J. Ballistics*, 2007, **19**(2): 5~8
易文俊, 王中原, 杨凯等. 三角形截面弹丸的飞行性能研究[J]. 弹道学报, 2007, **19**(2): 5~8
- Zhang Dejin, Li Bijun, He Li. Application on laser measurement for large storage yard based on multi-sensor integration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208005
张德津, 李必军, 何莉. 基于多传感器集成的堆场激光测量技术应用[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0208005
- Wang Jianjun, Xu Lijun, Li Xiaolu. Impacts of random attitude measurement errors on airborne laser scanning image[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0314001
王建军, 徐立军, 李小路. 姿态角随机测量误差对机载激光扫描成像的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0314001