

基于非合作目标图像处理技术的大间距轴线一致性检测方法

张勇^{1*}, 吴浩², 牛刚¹

¹中国人民解放军 32181 部队, 河北 石家庄 050000;

²陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

摘要 在分析国内外大间距轴线一致性检测方法的基础上, 提出一种基于非合作目标图像处理技术的轴线一致性检测方法。该方法任意选择远场中具有典型特征的景物作为非合作目标, 利用不同光学传感器获取非合作目标图像, 比较非合作目标在图像中的空间位置差异, 进而得到轴线一致性检测结果。实验结果表明, 该方法可满足大间距轴线一致性检测需求。将 CCD 成像系统夹持在被测对象机械轴线上, 可实现机械轴线与光学传感器轴线间的一致性检测。该方法不受光学传感器工作波段限制, 避免了其他检测方法体积重量大、对环境要求高等缺点, 因此应用前景广阔。

关键词 测量; 轴线一致性; 检测; 图像处理; 多光学传感器; 大间距

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051203

Consistency Detection Method for Large Spacing Axis Based on Non-Cooperative Target Image Processing Technology

Zhang Yong^{1*}, Wu Hao², Niu Gang¹

¹32181 Unit of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;

²Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

Abstract On the basis of analyzing the current methods for large spacing axes detection at home and abroad, a method of axial consistency detection based on non-cooperative target image processing technology is proposed, which selects scenes with typical features in far field as non-cooperative targets arbitrarily, utilizes different optical sensors to acquire non-cooperative target images, and obtains axial consistency detection results by comparing the spatial position differences of non-cooperative targets in images. Experimental results show that this method can meet requirement of large spacing axis consistency detection. While the CCD imaging system is reliably clamped on the mechanical axis of the target to be detected, the consistency detection between the mechanical axis and the optical sensor axis can also be achieved. This method is not limited by the optical sensor's working band and avoids the disadvantages of large volume, heavy carrying and high requirements on environment for other detection methods, so it has broad application prospects.

Key words measurement; axis consistency; detection; image processing; multiple optical sensors; large spacing

OCIS codes 120.4630; 040.1880; 100.2000

1 引言

基于火炮、雷达、导弹以及无人机等某一特定平

台, 由多个信息互联的任务单元相互协作, 完成瞄准、侦察、跟踪、制导和标定等作战任务的平台光电装备, 在各型武器装备上得到了广泛应用。平台光

收稿日期: 2018-08-01; 修回日期: 2018-08-24; 录用日期: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51305455)、陆军装备部资助课题(ZS2014070140A12002)

* E-mail: bit10701159@163.com

电装备含可见光、微光、激光、红外和电视等光学传感器,而多光学传感器之间的轴线一致性是确保整个武器系统作战效能的重要保证。武器装备在安装、修理过程中需要进行轴线检测和调试,长时间野外环境影响也会造成轴线失调,需要适时进行校验。大跨度、宽光谱、多轴线是平台光电装备轴线一致性检测的主要特点。

目前,常用轴线一致性检测方法有投影靶板法^[1-2]、平行光管法^[3-6]、相交靶板法、惯性测量法^[7]以及摄影测量方法^[8]等。投影靶板法易受气候和场地条件限制,自动化程度低;平行光管法多用于实验室,要求被测对象中各光学传感器的物镜全部或部分包含在测试光路中,故需大通光口径,为适应宽波段且有效减轻重量,常采用折反式光学系统,并联合使用斜方棱镜、五角棱镜或平面反射镜组扩展平行光管口径;相交靶板法是一种解决大间距轴线一致性检测的有效手段,典型代表有以色列 CI 公司的先进武器轴线检测系统 O-AWBS^[9-10]、德国 Carl Zeiss 公司的武器装备视频校轴调整系统 WASVB^[11]和瑞典 SCHILL 公司的系列舰船轴线检测系统 aligner-308 等^[12];惯性测量法基于陀螺稳定与光路自准直技术,无需架设平台或三脚架调校被测对象,解决了大口径平行光管无法完成的大间距机械轴线与光电轴线间一致性测量,美国 AAI 公司研制的先

进校轴设备 ABE-301A 检测精度可达 $20''$ ^[13-14];摄影测量法具有非接触、测量范围大、测量快速和精度较高等特点^[15-16],该方法应用于轴线检测的关键是大视场范围内基于多靶板的位姿跟踪测量技术,如挪威 METRONOR 公司研制的 HarmoLign 武器校准系统测量精度优于 $20''$,已推广应用于 20 个国家的空军^[17-19]。

综上所述,大间距轴线一致性检测方法在测量范围、精度、便携性及价格方面各有优缺点,相比之下,相交靶板法结构简单、操作便携,但需较长的通视距离,若能在保证测量精度前提下,缩短通视距离,将会大幅提高设备野外在线检测的适用性。为此,本文提出一种基于非合作目标图像处理技术的轴线一致性检测方法,通过选择远场中具有典型特征的景物作为非合作目标,采集不同光学传感器获取非合作目标图像,比较非合作目标在图像中的空间位置差异,进而得到轴线一致性检测结果。

2 有限远图像测量法

有限远图像测量方法利用被测光学传感器采集远场中某一固定景物作为非合作目标,通过计算不同光学传感器对图像中目标特征点的成像位置差异进行轴线一致性检测。图 1 为非合作目标位于有限远 D 处时的示意图。

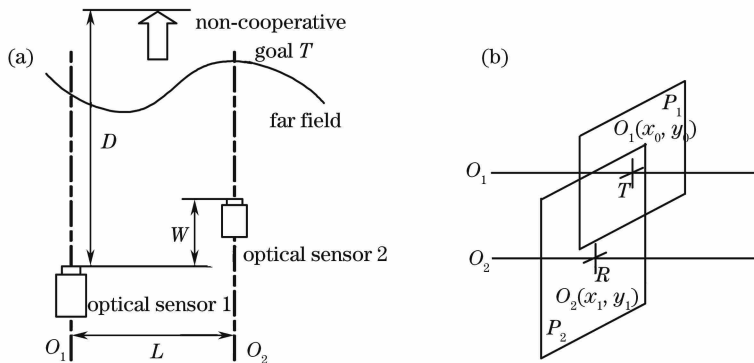


图 1 有限远图像测量法示意图(D 为有限远)。(a)整体;(b)截面

Fig. 1 Diagram of finite distance image measurement method (D is finite). (a) Overall schematic; (b) section

被测对象两根光轴分别为 O_1 和 O_2 ,轴间距为 L ,在轴线方向相距 W ,与目标距离 D 。通过其中一个光学传感器瞄准远场中明显特征目标 T (如建筑物屋顶、窗台棱角等),在与光轴垂直的图像平面 P_1 和 P_2 内, O_1 和 O_2 的分划坐标分别为 (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 。理想状态下,若 O_1, O_2 平行且 T 位于无穷远时, T 在 P_1 和 P_2 中的图像均应位于分划中心;若 O_1, O_2 平行而 T 位于有限远时, T 在 P_1 和

P_2 中的图像存在位置差异,该差异值应和投影靶板法在规定的测量距离下被测对象镜像轴线间距相同。如图 2 所示,匹配计算 P_1 和 P_2 ,求得 O_1, O_2 分划中心在 P_2 中的坐标分别为 $O_1(x_0, y_0)$ 和 $O_2(x_1, y_2)$ 。结合轴间距 L ,在某一特定观测距离 (D)上,若 O_1 和 O_2 不平行,则 O_1 分划中心位于 $O'_2(x_a, y_a)$ 处, O_1 与 O'_2 的欧氏距离为两根光轴偏差,即

$$a = R \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2}, \quad (1)$$

式中 R 为图像像素角分辨率。

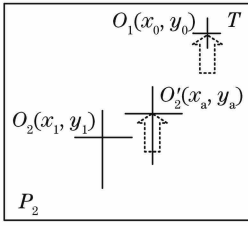


图 2 图像测量法原理图

Fig. 2 Schematic of image measurement

2.1 图像匹配算法

实际应用中,两根光轴的光学系统参数并不相同,所成像的放大倍率也不同,若要对两幅图像进行匹配计算,图像处理算法应具备仿射不变性。采用尺度不变特征变换(SIFT)算法匹配图像 P_1 和 P_2 。首先,建立图像的尺度空间表示;然后,在尺度空间中搜索图像极值点,建立特征描述向量;最后,寻找

两幅图像间的特征点对应关系。以 P_2 为基准图像,从 P_1 中选取含有光轴 O_1 十字分划的图像块(包含尽可能多的特征或细节信息)作为待匹配模板,与 P_2 进行模板匹配计算,选用标准平方差作为相似性度量函数,得到

$$\sigma = \sum_{x,y} [I(x,y) - I'(x,y)]^2 / \sqrt{\sum_{x,y} I(x,y)^2 \cdot I'(x,y)^2}, \quad (2)$$

式中 $I(x,y)$ 和 $I'(x,y)$ 分别为选取的图像块和待匹配图像块灰度值。图 3 给出了计算结果,当两个图形块达到最大相似度时,认为两个图像块达到了最佳匹配关系。

在 P_2 中求得最佳匹配图像块后,利用随机抽样一致性算法(RANSAC)求得变换矩阵,点对点配准两幅图像获得图像点的对应关系,所得结果如图 4 所示, A' 点为 O_1 分划中心在图像 P_2 上的坐标, B 点为 O_2 分划中心坐标。

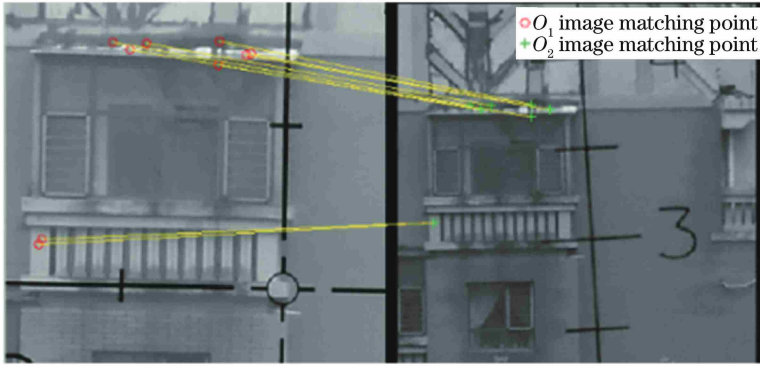


图 3 SIFT 计算结果

Fig. 3 Calculation result by SIFT



图 4 光学传感器采集图像及 RANSAC 配准后十字分划中心位置示意图。(a) O_1 采集图像;

(b) O_2 采集图像;(c) O_2 采集图像放大图

Fig. 4 Images acquired by optical sensors and center position of cross-section after registration of RANSAC.

(a) Image acquired by O_1 ; (b) image acquired by O_2 ; (c) enlarged image by O_2

2.2 目镜图像采集装置

光学传感器成像有目镜观察和视频输出两种方式。人眼通过目镜观察光学系统不能存储成像结果,无法实现事后回放、图像处理和分析等功能,因此,设计目镜图像采集装置^[20],利用磁性表座将其

固定在光学系统目镜出瞳位置代替人眼,CCD 相机将视频图像无线传输至数据处理系统处理并显示,利用接管组件及万向节组件调整 CCD 相机位置,确保 CCD 相机对准目镜出瞳。图 5 给出了目镜图像采集装置外观及示意图。

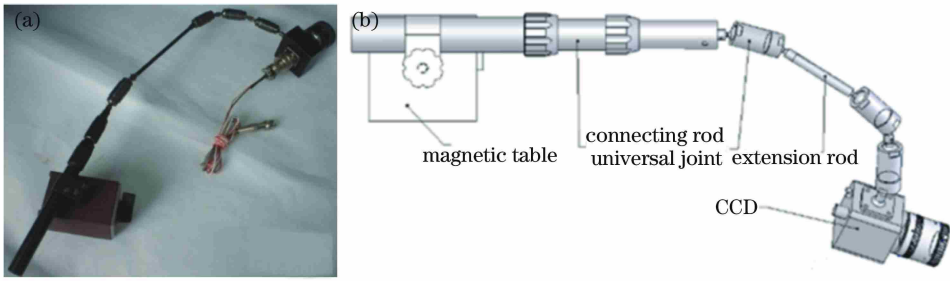


图 5 目镜图像采集装置外观及示意图。(a)装置外观;(b)装置结构

Fig. 5 Appearance and diagram of eyepiece image acquiring device. (a) Appearance of the device; (b) device structure

2.3 机械轴线可视化

实际应用中,不但要求平台光电装备内的各光学传感器共轴,有时还需调校火炮身管与平台光电装备之间的镜炮一致性。为测量机械轴线和多光学传感器轴线一致性,还需将机械轴线可视化。因此,设计带有准直光学系统的机械连接插轴,将机械轴线转换为光轴^[21],保证准直系统分划中心出射光线与火炮身管轴线平行。为实现与机械轴线内壁的紧密配合,可根据机械轴线形式和尺寸设计专用的膨

胀式插轴,利用插轴膨胀顶起实现刚性连接,机械连接轴外观和内部结构如图 6 所示。其中顶块和弹簧通过连接轴固定在连接板上,顶块与连接轴压下后在弹簧弹力作用下自行弹起,连接板与插杆采用螺纹连接固定,插杆通过连接筒以螺纹连接方式与 CCD 相机连接固定。使用时,将插杆插入机械轴线上腔,顶块受压后在弹簧弹力作用下自动顶紧内壁,从而实现紧定功能;拔出插杆时,顶块在弹簧弹力作用下自动弹起。

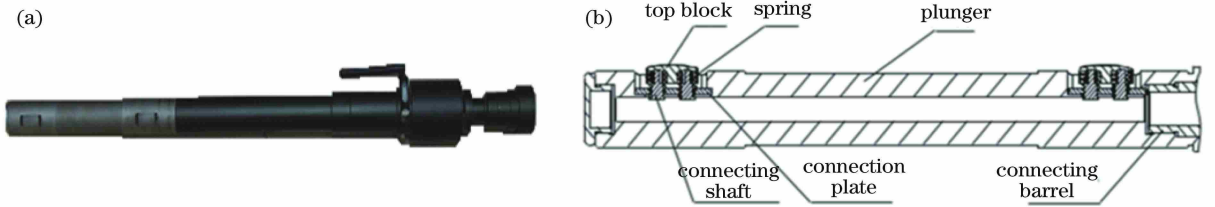


图 6 机械连接插轴外观及内部结构。(a)外观;(b)装置结构

Fig. 6 Appearance and internal structure of mechanical connection plug. (a) Appearance; (b) device structure

配合误差是影响轴线检测的主要误差源。设备出厂前必须进行自校准,即将机械连接插轴插入标准通孔中,前面放置平行光管,使其十字分划成像于 CCD 相机十字分划中心,然后顺时针转动 360°,若平行光管十字分划像相对机械连接插轴 CCD 相机十字分划中心摆动量小于阈值,即认为符合出厂精度要求。

3 实验结果与分析

将激光测距机和望远镜安装在光学平板上,望远镜可做高低、方位及俯仰调整,利用大口径平行光管调整两台设备共轴。然后将实验装置对准远场中的典型目标,利用激光测距机测量目标和实验装置的距离,利用目镜图像采集装置分别采集激光测距机光学瞄准系统目镜出瞳图像和望远镜右目镜出瞳图像。激光测距机和望远镜间距 $L = 300 \text{ mm}$ 。图 7 为实验装置图。在图像坐标系下进行计算,得到不同距离下的轴线偏差计算结果如表 1 所示。



图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental equipment

表 1 中坐标 A' 为 O_1 分划中心在 O_2 图像中所对应的坐标位置,坐标 B 为光轴 O_2 图像分划中心位置,参考坐标为光轴 O_2 分划密位读数为 2 的位置。分别计算 $L_{A'B}$ 和 L_{BC} 的像素长度,由图 8 可知, l_{BC} 对应 10 mil,则在某一距离上, $l_{A'B}$ 的空间长度即为像高 H , H 可表示为

$$H = D \cdot l_{A'B} / (l_{BC} \cdot 100), \quad (3)$$

式中 D 为实验装置与目标的测距值。由于两根光轴平行,则测量误差角为

$$\alpha \approx \arctan [(H - L) / D], \quad (4)$$

表1 两根光轴平行时轴线偏差计算结果

Table 1 Results of axis deviation when two optical axes are parallel

Coordinate A'	Coordinate B	Coordinate C	W /m	$L_{A'B}$ /pixel	$l_{A'B}$ /mm	Measurement /($''$)
2247,1560	2249,1540	2277,2013	900	20.10	381.78	18.74
2131,1464	2133,1446	2159,1871	900	18.11	382.81	18.98
2135,1474	2136,1458	2159,1833	900	16.03	384.03	19.26
1727,1562	1766,1535	1799,2176	390	47.43	288.22	6.23
1913,1631	1938,1612	1958,1984	390	31.40	328.73	15.19
2151,1593	2166,1573	2186,1939	390	25.00	265.99	17.98
2336,1385	2424,1347	2466,2080	220	95.85	287.22	11.98
2299,1663	2369,1619	2400,2203	220	82.68	311.03	10.34
2360,1653	2415,1614	2445,2131	220	67.42	286.43	12.72
1925,1504	1984,1481	2002,1774	145	63.32	312.79	18.20
1928,1526	1965,1512	1977,1697	145	39.56	309.42	13.39

式中 L 为实验装置两根光轴的间距。由表 1 结果可知,测量误差角均值为 $14.82''$,标准偏差为 $4.27''$ 。

为进一步验证本文方法的测量精度,调整望远镜与激光测距机不共轴,具体方法如图 8 所示,将激光测距机十字分划中心对准远处某一典型目标,望远镜右目镜十字分划中心与目标错开一定距离,采集两幅图像并计算偏差量,利用望远镜分划密位线

计算所得两根光轴的不平行偏差为 $1219''$ 。实验装置至目标距离为 2930 m,对同一目标计算 5 次并求均值。两根光轴不平行时,轴线偏差计算结果如表 2 所示,与理论值 ($1219''$) 之间的偏差均值为 $-15.37''$,标准偏差为 $26.84''$ 。对比表 1 和表 2 结果可知,本文方法测量精度满足绝大部分被测对象检测需求。



图 8 两根光轴不平行时的采集图像。(a) O_1 采集图像;(b) O_2 采集图像;(c) O_1 与 O_2 分划中心偏差示意图

Fig. 8 Captured images when two optical axes are not parallel. (a) Images captured by O_1 ; (b) images captured by O_2 ; (c) center deviation of O_1 and O_2

表 2 两根光轴不平行时轴线偏差

Table 2 Axis deviation when two optical axes are not parallel

Coordinate A'	Coordinate B	Coordinate C	W /m	$L_{A'B}$ /pixel	$l_{A'B}$ /mm	Measurement /($''$)	Deviation /($''$)
1680,1318	1900,1315	1915,1677	900	220	5165.4	1183.8	-35.2
1913,1432	2024,1429	2031,1613	900	111	5127.4	1175.1	-43.9
1991,1258	2269,1249	2288,1704	900	278	5197.0	1191.1	-27.9
2008,1420	2131,1416	2138,1600	390	123	2306.6	1219.9	0.9
1967,1265	2269,1238	2289,1691	390	303	2307.8	1220.6	1.6
1902,1102	2365,1053	2394,1744	390	465	2325.5	1229.9	10.9
1899,1425	2030,1419	2038,1604	220	131	1258.0	1179.5	-39.5
1774,1323	2029,1309	2043,1670	220	255	1255.2	1176.8	-42.2
1464,1093	1955,1069	1983,1762	220	492	1259.3	1180.7	-38.3
1878,1431	2024,1419	2032,1602	145	146	859.6	1222.8	3.8
1713,1330	1993,1297	2007,1661	145	282	822.3	1169.7	-49.3
1338,1126	1895,1057	1918,1749	145	561	875.4	1245.3	26.3

4 误差分析

影响测量精度的误差主要包括机械轴线装配误差、图像匹配误差、目标测距误差以及被测对象各轴间距误差等。机械连接插轴装配误差由加工精度和出厂前自校准精度确定,一般情况下可控制 $\sigma_1 < 30''$;图像匹配误差主要取决于 CCD 相机获取的图像显示精度,CCD 镜头光学系统焦距 $f = 80 \text{ mm}$,像元宽度 $w = 10 \text{ }\mu\text{m}$,则 CCD 图像显示精度为

$$\sigma_2 = \arctan(w/f) = 25.78'', \quad (5)$$

观测目标距离 D 由激光测距机测距获得,误差为 $\sigma_3 < \pm 1 \text{ m}$;轴间距 L 由机械加工图纸确定,误差为 $\sigma_4 < \pm 10 \text{ mm}$ 。除 σ_1 、 σ_2 外,轴间距误差 σ_3 和测距误差 σ_4 是影响精度的重要因素。将 σ_3 和 σ_4 分别代入(4)式中进行蒙特卡罗误差分析,样本数取 10^4 ,目标测距误差为正态分布,轴间距测量误差为均匀分布,所得结果如图9所示。

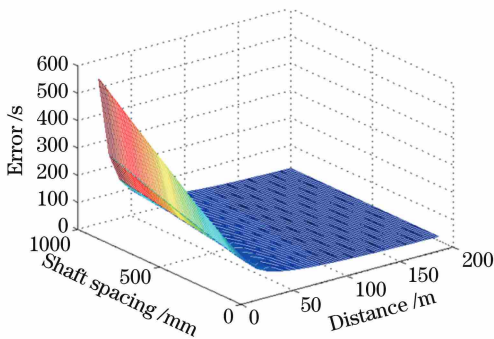


图9 轴间距测量误差为10 mm,测距误差为1 m时的误差分析结果

Fig. 9 Error analysis result for axis distance measurement error of 10 mm and range error of 1 m

由图9可知,当轴间距测量误差为10 mm,测距误差为1 m,轴间距为100~1000 mm,实验装置与远场目标距离100 m时,系统测量误差范围从 $20''$ 增大至 $29''$;实验装置与远场目标距离200 m时,系统测量误差范围从 $10''$ 增大至 $11''$;而在50 m时,系统测量误差范围从 $42''$ 增大至 $90''$,可见为保证测量精度,当轴间距增大时,要求系统具有更大的测量距离。另外,轴间距越小,两个光学传感器共有成像区域越大,此时被测对象与远场目标之间的检测距离较近;轴间距越大,两个光学传感器共有成像区域越小,检测距离则较远,该结果还与光学系统焦距、口径等参数有关。选择100 m左右的视距作为被测对象与目标的测量距离,即可满足绝大部分装备检测精度要求,同时,在较短的测量距离下,利

用半导体激光器可将测距误差控制在更小范围内,进一步提高测量精度,而轴间距的获得主要依靠被测对象设计图纸, $\pm 10 \text{ mm}$ 的测量误差有较大余量。

5 结论

归纳分析多轴线一致性检测技术,提出了一种基于非合作目标图像处理的多光轴一致性检测技术,为平台光电装备光轴一致性在线检测提供了有效技术途径,该方法实现了大空间跨度机械轴线与光学传感器轴线的自动检测,能够满足复杂光电观瞄系统的野外在线检测需求,同时,结合后续的图像处理技术,可进一步完成复杂轴线检测任务,适用于多种光电观瞄系统轴线检测。

下一步将研究含激光光轴的平台光电装备轴线一致性检测;优化火力轴线可视化过程中的共轴问题,进一步减少配合误差;同时,寻找含红外光轴的平台光电系统中更优的共有特征,优化图像匹配算法,提高测量精度。

参考文献

- [1] Ling J, Liu B Q, Zhao X L. The comparison and discussion of several testing methods about optical-axis parallelism[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(1): 43-45.
凌军,刘秉琦,赵熙林.几种光轴平行性测试方法的比较与探讨[J].应用光学,2003,24(1):43-45.
- [2] Jiang H B. Adjustment of optical axis parallelism with projected target plate[J]. Ship Science and Technology, 1995, (4): 61-65.
姜宏滨.用投影靶板调整光轴平行性[J].舰船科学技术,1995,(4):61-65.
- [3] Liu A M, Gao L M, Wu Y M, et al. ZEMAX auxiliary analysis for effect of rhombic prism surface shape error on parallelism of emergent beam[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(3):491-495.
刘爱敏,高立民,吴易明,等.ZEMAX辅助分析斜方棱镜面形误差对出射光平行度的影响[J].应用光学,2009,30(3):491-495.
- [4] Chang S, Cao Y P, Chen Y Q. Influence of beam turning error of pentagonal prism on wave-front measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 186-191.
常山,曹益平,陈永权.五角棱镜的光束转向误差对波前测量的影响[J].应用光学,2006,27(3):186-191.

- [5] Ma S B, Yang H, Yang Z J, *et al.* Multi-spectral axes parallelism calibration of electro-optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5): 917-921.
马世帮, 杨红, 杨照金, 等. 光电系统多光轴平行性校准方法的研究[J]. *应用光学*, 2011, 32(5): 917-921.
- [6] Wang T, Tian L D, Zhao J K, *et al.* Research on space target attitude simulation based on collimator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0612003.
王涛, 田留德, 赵建科, 等. 基于平行光管的空间目标姿态模拟研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0612003.
- [7] Chen Z B, Xiao W J, Ma D X, *et al.* A method for large distance multi-optical axis parallelism online detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112006.
陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大间距多光轴一致性野外在线检测方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112006.
- [8] Li M, Zhang A, Zhang J B, *et al.* Radial eccentricity error detection of primary mirror of large aperture telescopes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091103.
李敏, 张昂, 张俊波, 等. 大口径望远镜主镜径向偏心误差检测技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091103.
- [9] CI systems. Advanced weapon boresight system (AWBS)[EB/OL]. [2018-08-01]. <https://www.ci-systems.com/CI//userdata/SendFile.asp?DBID=1&LNGID=1&GID=608>.
- [10] Cabib D, Rahav A, Barak T. Broad-band optical test bench (OPTISHOP) to measure MTF and transmittance of visible and IR optical components [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6543: 654311.
- [11] Carl Zeiss. Calibration and alignment [EB/OL]. [2018-08-01]. www.zeiss.com/optronics.
- [12] Schill Reglerteknik. Aligner 308 ship alignment system[EB/OL]. [2018-08-01]. www.schill.se.
- [13] Jaklitsch J J, Ehart A F, Jones D A, *et al.* Gyroscopic system for boresighting equipment: US7065888[P]. 2005-07-14.
- [14] Jaklitsch J J, Paturzo V A. Non line of sight boresight based on inertial measurement technology [C] // *IEEE Systems Readiness Technology Conference*, 2003: 527-533.
- [15] Ahmadabadian A H, Yazdan R, Karami A, *et al.* Clustering and selecting vantage images in a low-cost system for 3D reconstruction of texture-less objects [J]. *Measurement*, 2017, 99: 185-191.
- [16] Cuesta F, Lopez-Rodriguez F, Esteban A. A new blondin system for surveying and photogrammetry [J]. *Sensors*, 2013, 13(12): 16894-16914.
- [17] Metronor. Next generation boresight system [EB/OL]. [2018-08-01]. www.metronor.com/military/.
- [18] Yang B W. Research on the key technologies of vision-based assembly pose measurement for large-scale equipments[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013: 22-28.
杨博文. 大型装备装配位姿视觉检测的关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 22-28.
- [19] Weng X, Ye N, Zhang L Y. Effects of the target position on the sensitivity of image point in monocular visual measurement system [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2015, 34(6): 969-973.
翁璇, 叶南, 张丽艳. 单目视觉测量系统中目标位姿对图像点灵敏度影响的研究[J]. *机械科学与技术*, 2015, 34(6): 969-973.
- [20] Zhang Y, Ma D X, Yan P C. Common detection device and detection method of gun barrel axis: ZL201310191768.7[P]. 2013-08-14.
张勇, 马东玺, 闫鹏程. 火炮身管轴线通用检测装置及其检测方法: ZL201310191768.7[P]. 2013-08-14.
- [21] Blevins W M, Fischer S G. Boresighting and pointing accuracy determination of gun systems: US8006427 [P]. 2011-08-30.