



DOI: 10.12086/oe.2019.180409

## 大间距轴线一致性检测技术 进展与分析

张勇<sup>1\*</sup>, 吴浩<sup>2</sup>, 马飒飒<sup>1</sup><sup>1</sup>中国人民解放军32181部队,河北石家庄050000;<sup>2</sup>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:** 多光学传感器轴线一致性是确保武器系统光电任务设备正常工作的重要保证。分析了国内外大间距轴线一致性检测方法及设备研制现状,提出了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。选择远场中具有典型特征的景物作为非合作目标,通过比较非合作目标在不同图像空间中的位置差异,得到轴线一致性检测结果。该方法避免了其它检测方法体积重量大、对环境要求高的缺点,特别适合于大间距平台光电装备野外在线轴线检测,应用前景广阔。

**关键词:** 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

**文献标志码:** A

**引用格式:** 张勇, 吴浩, 马飒飒. 大间距轴线一致性检测技术进展与分析[J]. 光电工程, 2019, 46(2): 180409

## Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology

Zhang Yong<sup>1\*</sup>, Wu Hao<sup>2</sup>, Ma Sasa<sup>1</sup><sup>1</sup>32181 Unit of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;<sup>2</sup>Department of Electronic and Optics Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

**Abstract:** The axis consistency of multiple optical sensors is an important guarantee to ensure the normal operation for photoelectric task equipment of weapon system. The presented status quo of methods and equipment are analyzed for measuring the consistency of large spacing axes. An axis consistency detection method is proposed based on non-cooperative target image processing technology. Specifically, it is available to select scenes with typical characteristics in the far field as non-cooperative targets. Then, the axis consistency detection results are obtained by comparing the position differences of non-cooperative targets in different image spaces. Compared with other detection methods and equipment, our method avoids many disadvantages including huge volume, heavy weight and the limited operation environment. Furthermore, it is especially suitable for axis detection of in field and on-line to large-distance photoelectric equipment, which shows a bright application prospect.

**Keywords:** axis consistency; detection; image processing; multiple optical sensors; large spacing

**Citation:** Zhang Y, Wu H, Ma S S. Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180409

收稿日期: 2018-07-28; 收到修改稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305455)

作者简介: 张勇(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光电检测与图形图像处理技术的研究。E-mail: bit10701159@163.com

# 1 引言

基于火炮、雷达、导弹、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、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。平台光电装备含可见光、微光、激光、红外、电视等光学传感器，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，长时间野外使用中受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。本文综述了投影靶板法、平行光管法、惯性测量法、摄影测量法、相交校靶法，由于传统方法无法满足野外在线检测需求，因此提出了一种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，为开展野外在线轴线检测提供了有效的技术手段。

## 2 光轴一致性检测的常规方法

目前轴线一致性检测方法主要有投影靶板法、平行光管法、惯性测量法、摄影测量、相交校靶法等。

### 2.1 投影靶板法

图 1 为投影靶板法。在远处放置一块靶板，将被

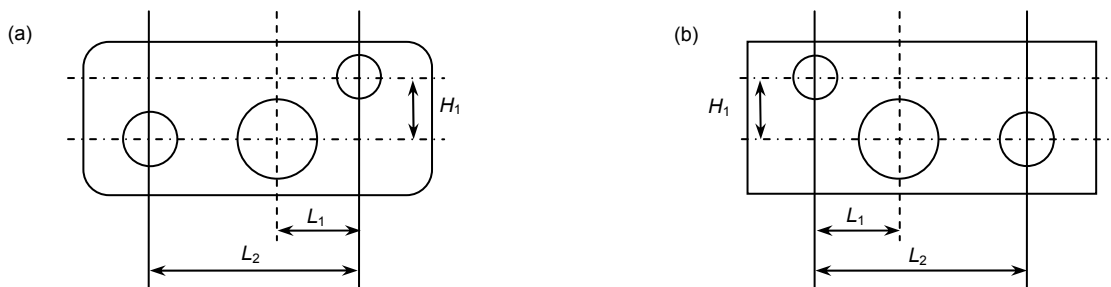


图 1 投影靶板法。(a) 被测对象；(b) 投影靶板

Fig. 1 Projection target method. (a) Measured target; (b) Projection target

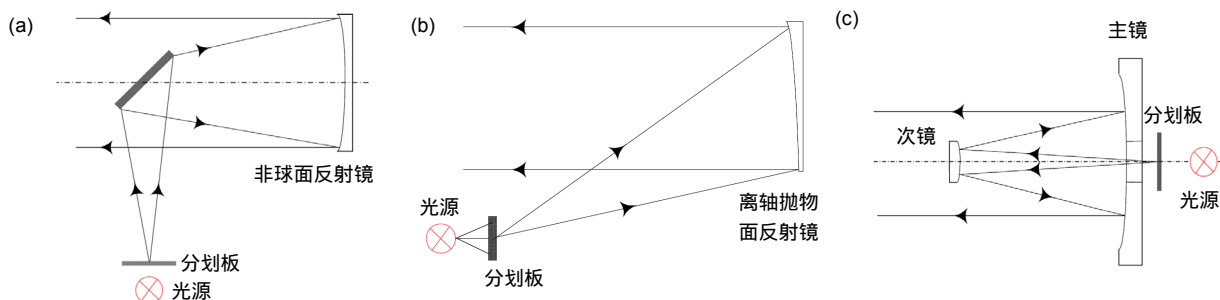


图 2 三种典型光学系统原理图。(a) 共轴式牛顿系统；(b) 离轴式牛顿系统；(c) 卡塞格林系统

Fig. 2 Three typical optical system schematics. (a) Coaxial Newtonian system; (b) Off-axis Newtonian system; (c) Cassegrain system

测对象各光学传感器轴线投影到靶板上，即各光轴的相互间隔是靶板上各光轴投影的间隔，沿光路方向看，各光轴与靶板上投影点之间是镜像关系。该方法通过比较间隔的差异程度判断轴线一致性，既可在野外，也可在室内使用<sup>[1]</sup>，造价低、直观方便，缺点是针对不同被测对象需绘制不同靶板，易受天气和场地条件限制，自动化程度低。由于引入了靶板标尺刻度误差、人眼观瞄误差、靶板倾斜与滚转误差等，实际应用中针对某型光电跟踪仪的测量误差约为 0.164 mrad<sup>[2]</sup>。

### 2.2 平行光管法

由于要将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，故平行光管需要大的通光口径。透射式平行光管存在色差，为适应宽波段且有效减轻重量，常采用折反式光学系统。其中，共轴式牛顿系统只有一个非球面光学元件，加工难度与成本较低，但存在中心遮拦；离轴式牛顿系统中心视场虽无遮拦，但存在彗差，且抛物面反射镜加工难度大、成本较高；卡塞格林系统对光路进行了折叠，结构紧凑，但视场较小，且非球面反射镜加工装配难度较大。图 2 是三种典型光学系统原理图。

以上三种典型光学系统虽然通过光路折转减小了体积重量，但平行光管口径不能无限制增大，为满足大间距轴线一致性检测需求，常采用斜方棱镜、五角

棱镜或平面反射镜组扩展平行光管口径<sup>[3-5]</sup>,斜方棱镜不改变入射光方向,适合小范围高精度光轴平移,两个斜方棱镜组合即可实现一定范围内任意距离的光轴平移;五棱镜只能对光轴进行一维大范围平移;平面镜组可在大空间范围平移光轴,但受装配工艺限制,易引入平移误差。

与采用光轴平移扩展平行光管口径不同,也有采用多个小口径固定平行光管进行多轴线检测的方法,即针对被测对象多轴线空间位置关系,利用多个固定平行光管分别模拟无穷远目标实现轴线检测,该方法体积重量大,各平行光管之间需严格共轴,且针对不同被测对象需研制不同工装,通用性差。若能利用一个小口径平行光管实现多轴线一致性检测,就需要在大空间范围内对平行光管进行高精度定位并完成姿态测量,为此文献<sup>[6-7]</sup>提出了工作空间测量定位系统(workspace measurement position system, WMPS)测量方法。WMPS 测量方法基于角度交汇与摄影测量多点透视(perspective-n-point, PNP)问题,利用单激光发射站结合多功能靶标构成空间坐标定位系统,将靶标安装在平行光管上,移动过程中靶标实时对平行光管进行位姿估计和调整以确保平行光管移动前后姿态不发生变化,从而实现光轴的高精度平移(精度  $\sigma \leq 0.2''$ ),WMPS 方法平移精度较高,但设备价格高、操作繁琐,难于大批量推广应用。

### 2.3 惯性测量法

AAI 公司在美国国防部支持下从上世纪 90 年代就开始研究基于惯性原理的校轴方法,解决了以往大口径平行光管无法完成的大间距机械轴线与光电轴线一致性测量,研制的先进校轴设备(advanced boresight equipment, ABE)累计订购 160 余套,保障了 20 余种

高技术兵器的打击精度<sup>[8-9]</sup>。AAI 公司研制的 310A 型 ABE 采用惯性测量技术,无需架设平台或三脚架、不用将被测对象顶起及水平,利用各型适配器可应用于多任务平台。其定制模块软件类似于 IETM,可逐步引导操作者完成自动化轴线测量任务,降低了对操作人员的素质要求,减少了架设时间和任务复杂度,另外惯性测量技术也为不需通视校轴提供了可能。图 3 是 310A 型 ABE 设备,主要包括动态惯性测量装置、基准惯性测量装置、数据处理运算装置、基准框架、手持式显示控制器及一系列校靶转接镜。

校靶转接镜与被测对象利用机械结构保证精确的装配关系,为基准惯性测量装置提供与被测对象姿态一致的安装面。基准惯性测量装置安装在基准框架上,通过内部的三轴陀螺传感器实时测量对象姿态角,建立校靶测量基准坐标系。动态惯性测量装置利用自准直原理发射平行光束,通过反射光束测量被测对象待校传感器的方位、俯仰角。测量时,首先使动态惯性测量装置中的惯性平台姿态与被测对象姿态对准,通过安装校靶转接镜或被测对象自带的发射接收装置,使手持动态惯性测量装置接收光束,从而测量出目标方位和俯仰角。310A 型 ABE 相比于其他测轴方法更为快捷准确,精度可达  $20''$ ,但在检测过程中需有效控制陀螺零漂以防止基准坐标系产生变化。

### 2.4 摄影测量法

摄影测量法具有非接触、测量范围大、测量快速、精度较高等特点,一般分为主动视觉测量和被动视觉测量。主动测量通常由一对光学投射装置与图像传感器组成。利用光学投射装置向被测物体投射结构光,结构光由物体表面调制产生形变,图像传感器记录下结构光形变并通过数据处理还原出被测物体的三维几

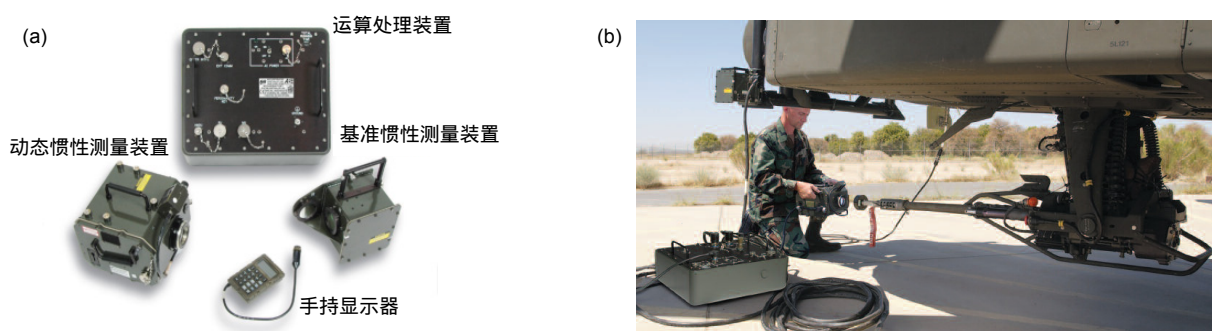


图 3 AAI 公司的 310A 型 ABE

Fig. 3 Model 310 A ABE of AAI

何尺寸<sup>[10]</sup>。相比之下,被动测量仅通过观测被测物体在自然光照下的成像即可实现被测物体的三维尺寸测量,通常使用单个或两个以上的图像传感器在多个位置观测同一被测物体,采用适配器、标记点和标定尺给被测物体提供测量基准,通过匹配各个图像传感器或各个位置图,直接获得被测物体的三维几何尺寸<sup>[11]</sup>。

摄影测量法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 METRONOR 公司研制的 HarmoLign 武器校准系统,测量精度 20",测量范围 25 m,其 7 个型号已推广用于 20 个国家的空军<sup>[12]</sup>。如图 4,该系统包括高分辨率相机、LED 靶板和适配器。LED 靶板和适配器共同组成一个平台协调板(platform harmonization pads, PHP)。将 PHP 安装在机载设备的机械接口处以及飞机的基准位置上,已知 LED 靶板、适配器和机械接口的转换关系,利用高分辨率相机检测 LED 靶板上靶点的空间位置信息,进而获得各机载设备坐标系及飞机坐标系在相机坐标系下的空间位姿,通过空间坐标系变换求得各机载设备的空间角度信息<sup>[13-14]</sup>。

HarmoLign 武器校准系统采用的摄影测量方法类似于激光跟踪仪测量原理,其区别有两点。一是利用多个 LED 靶板模拟不同任务设备轴线空间位置,取代了激光跟踪仪高精度双轴伺服系统,二是利用 LED 靶板上多个靶点已知位置信息通过 PNP 算法求解被测对象与相机的空间距离信息,取代了激光跟踪仪采用的激光干涉方法<sup>[15]</sup>。若采用激光跟踪测量系统进行轴线检测,应首先建立以激光跟踪测量系统为基准的基准坐标系,获得基准坐标系与被测对象坐标系之间的

转换关系,然后利用靶球测量 3 个或多个被测对象基准点相对于基准坐标系下的方位角、俯仰角和距离值,根据测得的基准点位置数据以及被测对象结构的相关技术参数,经坐标变换得到被测对象各系统校靶轴线。和 HarmoLign 武器校准系统不同,利用激光跟踪仪对大尺度空间对象进行测量时,往往需要设置多个测量站位,或采用多台跟踪仪联合工作并经过转站才能完成全机或某一对象的测量工作<sup>[16]</sup>。

### 2.5 相交校靶法

相交校靶法是解决大间距轴线一致性检测的另一种有效途径,图 5 至图 7 是具有典型代表性的 CI 公司的先进武器轴线检测系统(advanced weapon boresight system, AWBS)<sup>[17-18]</sup>, Carl Zeiss 公司的武器装备视频校轴调整系统(weapon adjustment system video boresight, WASVB)<sup>[19]</sup>和 SCHILL 公司的舰船轴线检测系统<sup>[20]</sup>。AWBS 通过 CCD 成像系统将空间大跨度枪(炮)轴与瞄具光轴联系起来,只需更换枪/炮管适配器即可实现多种类枪炮校准,共发展了 AWBS80、AWBS120、AWBS160 和 AWBS200 等四个型号,最高检测精度 0.05 mrad。和 AWBS 测量原理类似, WASVB 通过选择不同光学镜头匹配测轴系统,可实现 10 m、25 m 或 40 m 等短距离范围内的轴线检测,另外还可跟踪低速运动目标或飞行器,采集到的图像和通过其他手段获取的图像传输至 TFT 显示器,通过比较两组图像差异获得轴线检测结果,检测精度 0.1 mrad。WASVB 包括带有控制单元的 TFT 显示器,视频校轴相机、电源和增益器以及相应的连接线缆。

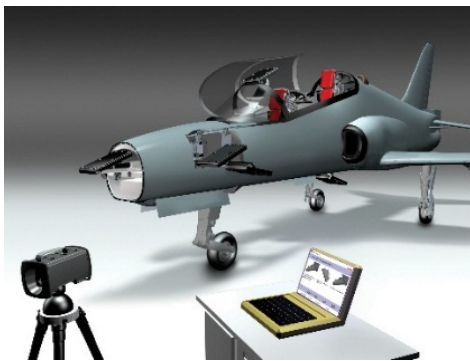


图 4 METRONOR 公司的 HarmoLign 武器校准系统  
Fig. 4 HarmoLign weapon calibration system of METRONOR



图 5 CI 公司的 AWBS  
Fig. 5 AWBS of CI



图6 Carl Zeiss公司的WASVB  
Fig. 6 WASVB of Carl Zeiss



图7 SCHILL公司的308型舰船轴线检测系统  
Fig. 7 Model 308 ship axis inspection system of SCHILL

SCHILL 公司研制的轴线检测设备多用于舰船武器系统,如经纬仪、雷达天线、光学瞄准镜等与火力轴线之间的平行性检测,产品包括 202 型轴线校正分析模块(ALIGNER 202 GYRO & SERVO CONTROL ANALYSER)、211 型炮管摄像机轴线校正仪(ALIGNER 211-GUN BORESIGHT CAMERA)及其改进型、224 型光学跟踪评估轴线校正仪(Aligner 224 Optical Tracking Evaluation System)和 308 型舰船轴线检测系统(Aligner 308 Ship Alignment System)等。其中 308 型舰船轴线检测系统包括一定数量的两轴伺服相机、数据获取单元(data acquisition unit, DAU)、便携式计算机和打印机。为了将两轴伺服相机可靠夹持在火炮身管上,还需一定数量的与之配套的机械适配器。使用过程中,两轴伺服相机分别获取待测轴线的视频图像,然后将图像数据传输至 DAU 中,利用 PC 机对输入图像进行分析处理,最终获得整个舰船武器系统所有待测轴线之间的偏差。

综上所述,以上大间距轴线一致性检测方法及设备在测量范围、测量精度、便携性及价格方面各有优缺点,如投影靶板法受场地和环境条件限制;平行光管法技术成熟,但多用于实验室条件;惯性测量法和摄影测量法能够满足大间距轴线检测需求,但成本较高,相比之下,相交校靶法结构简单、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,将会大大提高设备野外在线检测的适用性。表 1 给出了上述测量方法及设备之间的性能比较。

### 3 有限远图像测量法

基于相交校靶法测量原理,提出了一种基于有限远非合作目标图像处理技术的轴线检测方法,该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 8 是非合作目标位于有限远  $D$  处时的示意图。

表 1 轴线测量方法及设备性能比较

Table 1 Comparison of different axis measurement methods and equipment performance

测量方法	典型设备/单位	结构组成	测量精度	价格	应用场合
投影靶板法	-	靶纸或多波段集成靶板	31.3"	低	野外在线检测,受场地及气候制约
平行光管法	DLT&NPT/CI	折反光学系统、多波段集成靶标、承载台、光学平台或架设机构	10"	较高	后方基地或实验室使用,覆盖宽波段,但受被测对象轴间距制约
惯性测量法	ABE/AAI	动态惯性测量装置、基准惯性测量装置、运算装置、基准框架、手持式显示控制器及校靶转接镜	20"	高	机载武器轴线测量,需有效控制陀螺零漂
摄影测量法	HarmoLign/ METRONOR	光电摄像机、支架、LED 靶板及适配器	20"	高	机载任务设备相对位姿空间角度测量
相交校靶法	AWBS200/CI	光学单元、电子单元、炮管适配器、显示器和信号连接器	9.5"	较高	光学传感器及镜炮一致性野外在线检测,受场地及气候制约

如图 8,被测对象两根光轴分别为  $O_1$  和  $O_2$ ,轴间距  $L$ ,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有明显特征的目标  $T$ ,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,若轴线  $O_1$  和  $O_2$  平行且目标  $T$  位于无穷远时,目标  $T$  在图像  $P_1$  和  $P_2$  中均应位于图像分划中心。若轴线  $O_1$  和  $O_2$  平行而目标  $T$  位于有限远时,目标  $T$  在图像  $P_1$  和  $P_2$  中存在位置差异,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间距相同。如图 9,匹配计算图像  $P_1$  和  $P_2$ ,求得光轴  $O_1$  分划中心在图像  $P_2$  中的坐标值  $O_1(x_0, y_0)$ 。光轴  $O_2$  分划中心为  $O_2(x_1, y_1)$ 。结合被测两根光轴间距  $L$ ,在某一特定观测距离值  $D$  上,若光轴  $O_1$  和  $O_2$  不平行,则光轴  $O_1$  分划中心位于  $O'_2(x_a, y_a)$  处, $O_1$  与  $O'_2$  的欧氏距离即为两根光轴偏差,式(1)中  $\delta$  是图像单个像素在测距值  $D$  下的角分辨率, $\alpha$  为两根光轴角度误差值。

$$\alpha = \delta \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2} \quad (1)$$

如图 9,假设  $O_1$  与  $O'_2$  的图像像素长度为  $|O_1O'_2|$ ,图像  $P_2$  中可根据分划板上的密位刻度获得 10 个密位

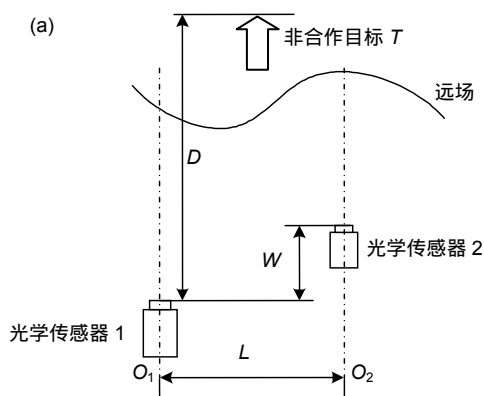


图 8 有限远图像测量法示意图( $D$  为有限远)

Fig. 8 Schematic diagram of finite distance image measurement ( $D$  is finite)

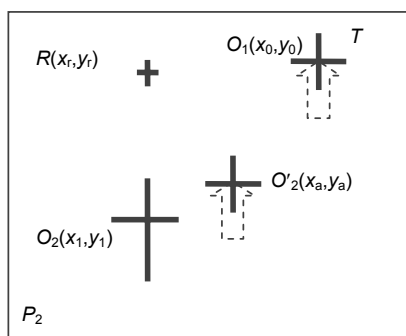


图 9 图像测量法原理图

Fig. 9 Schematic diagram of image measurement

的图像像素长度  $R(x_r, y_r)$ 是与  $O_2(x_1, y_1)$ 相距 10 个密位值的像素点,根据密位测距法,在某一观测距离上即可求得线段  $|O_1O'_2|$  的空间长度,即像高  $H$  为

$$H = \frac{D \cdot |O_1O'_2|}{|RO_2| \cdot 100} \quad (2)$$

式中  $D$  为实验装置与目标的测距值。由于两根光轴平行,则测量误差角度值为

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{H-L}{D} \right] \quad (3)$$

式中  $L$  为实验装置两根光轴之间的轴间距。为验证有限远图像测量方法的有效性,搭建包含激光测距机和双筒望远镜的共轴光学系统。首先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并利用激光测距机测量目标和实验装置的距离值。利用 CCD 相机在望远镜及激光测距机瞄准镜出瞳处采集远场图像。激光测距机和望远镜间距  $L=300$  mm。图 10 为实验装置图,图 11 为两台设备分别采集的远场目标图像,表 2 为不同观测距离下的轴线偏差计算结果。

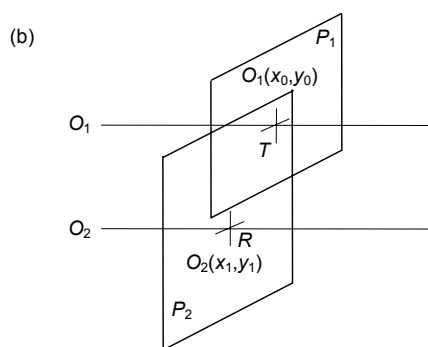


图 10 实验装置图

Fig. 10 Test device diagram



图 11 光学传感器采集图像及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. 11 Images by optical sensors capture and the diagram for center position of cross-section. (a) Images acquired by  $O_1$ ; (b) Images acquired by  $O_2$ ; (c) Schematic of enlarged images by  $O_2$

表 2 两根光轴平行时轴线偏差计算结果( $L=300\text{ mm}$ )

Table 2 Calculation results of axis deviation when two optical axes are parallel ( $L=300\text{ mm}$ )

测距 $D/\text{m}$	线段 $ O_1O_2 /\text{pixels}$	像高 $H/\text{mm}$	测量时间/s
900	18.11	382.81	18.98
900	16.03	384.03	19.26
390	31.40	328.73	15.19
390	25.00	265.99	17.98
220	95.85	287.22	11.98
220	67.42	286.43	12.72
145	63.32	312.79	18.20
145	39.56	309.42	13.39

根据表 1 计算可知,测量误差角度均值为  $15.96''$ , 标准偏差为  $2.80''$ 。实验装置到目标的观测距离  $D$  由激光测距机测距获得,误差  $\sigma_1 < \pm 1\text{ m}$ 。轴间距  $L$  由机械加工图纸确定,误差  $\sigma_2 < \pm 10\text{ mm}$ 。将  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别带入式(3)进行蒙特卡洛误差分析,取样本数  $10^4$ ,目标测距误差为正态分布,轴间距测量误差为均匀分布。图 12 和图 13 分别是误差分析结果。

由图 12 可知,当实验装置与远场目标相对距离大于  $100\text{ m}$ ,轴间距在  $300\text{ mm}$  到  $1000\text{ mm}$  范围内变化对测量结果无明显影响,测量误差不大于  $30''$ ,而当实验装置与远场目标相对距离  $50\text{ m}$  时,测量误差不小于  $45''$ ,可见为达到一定的测量精度应保证较远的观测距离。由图 13 可知,在相同测量距离下,轴间距变大则测量误差呈上升趋势,但在  $100\text{ m}$  处时测量误差

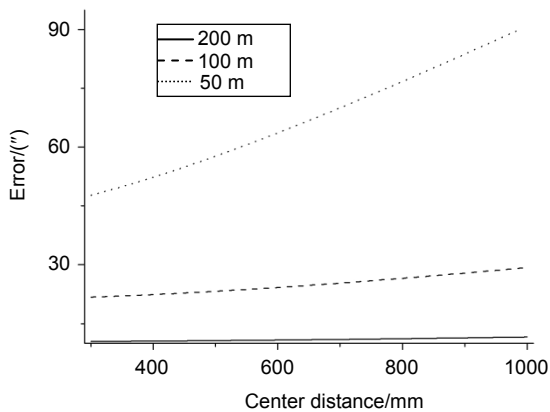


图 12 不同观测距离对测量结果的影响

Fig. 12 Influence of different observation distances on results

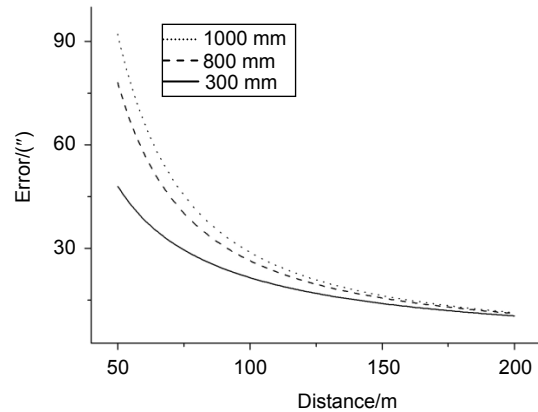


图 13 不同轴间距对测量结果的影响

Fig. 13 Influence of different axis spacing on results

不会大于 45", 可见选择合适的测量距离是确保测量结果的关键因素, 选择 100 m 左右的通视距离作为被测对象与目标的观测距离能够满足绝大部分光电装备检测精度要求。

## 4 讨论

平台光电装备各模块之间, 以及平台光电装备与火力轴线之间的一致性直接影响武器系统作战效能发挥, 因此开展野外在线条件下的平台光电装备光轴一致性检测技术与设备研制尤为迫切。基于有限远非合作目标图像处理技术的轴线检测方法摒弃了平行光管模拟无穷远目标的传统方法, 将其用于野外在线轴线检测, 避免了复杂费时的架设调校以及精密光学系统在高低温、震动冲击等野外环境中带来的检测精度下降问题。另外和惯性测量方法及摄影测量方法相比, 测量步骤简洁、测量原理简明、设备研制成本低, 为平台光电装备光轴一致性在线检测提供了有效的技术途径, 满足了野外条件下多种光电观瞄系统大间距轴线检测需求。接下来还需开展的工作包括两个方面: 一是含激光光轴的平台光电装备轴线一致性检测还需进一步研究; 二是优化图像匹配算法是提高测量精度的关键环节, 尤其对含红外光轴的平台光电装备如何寻找共有特征将是研究的重点。

## 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. adjusting optical axis parallelism with projection 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] Jin W Q, Wang X, Zhang Q Y, et al. Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3): 526–531.  
金伟其, 王霞, 张其扬, 等. 多光轴一致性检测技术进展及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(3): 526–531.
- [6] Yang L H, Yang X Y, Zhu J G, et al. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **23**(6): 758–764.
- [7] Zheng Y Y, Zhu J G, Xue B, et al. Network deployment optimization of indoor workspace measurement and positioning system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(5): 20–26.  
郑迎亚, 郝继贵, 薛彬, 等. 室内空间测量定位系统网络布局优化[J]. *光电工程*, 2015, **42**(5): 20–26.
- [8] Jaklitsch J J, Ehart A F, Jones D A, et al. Gyroscopic system for boresighting equipment: US7065888B2[P]. 2006-06-27.
- [9] Jaklitsch J J, Paturzo V M. Non line of sight boresight based on inertial measurement technology[C]//*Proceedings AUTO-TESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference*, Anaheim, USA, 2003: 527–533.
- [10] Ahmabadian 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.
- [11] Guan Y, Wang X J, Yin L, et al. Monocular position and pose measurement method based on surface topography of object[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(1): 170522.  
关印, 王向军, 阴雷, 等. 基于物体表面形貌的单相机视觉位姿测量方法[J]. *光电工程*, 2018, **45**(1): 170522.
- [12] Metronor. Next generation boresight system[EB/OL]. <http://www.metronor.com/military/>.
- [13] 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.  
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.
- [14] 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.
- [15] Hu Y, Xie T B, Liao Z P, et al. Research on aircraft boresight based on photoelectric tracking[J]. *Measurement & Control Technology*, 2016, **35**(10): 124–128.  
胡禹, 谢天保, 廖祖平, 等. 基于光电跟踪的飞机校靶技术研究[J]. *测控技术*, 2016, **35**(10): 124–128.
- [16] Huang P, Wang Q, Yu C J, et al. Accuracy analysis for digital boresighting of aircraft gun[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(12): 3102–3110.  
黄鹏, 王青, 俞慈君, 等. 飞机航炮的数字化校准分析[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(12): 3102–3110.
- [17] CI Systems. Advanced weapon optical boresight system (O-AWBS)[EB/OL]. (2015-10-12) [2016-07-20]. [http://www.ci-systems.com/Advanced-Weapon-Boresight-System-\(AWBS\)](http://www.ci-systems.com/Advanced-Weapon-Boresight-System-(AWBS)).
- [18] 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.
- [19] Carl Zeiss. Calibration and alignment[EB/OL]. <http://www.zeiss.com/optronics>.
- [20] Schill Reglertechnik. Aligner 308 ship alignment system[EB/OL]. <http://www.schill.se>.

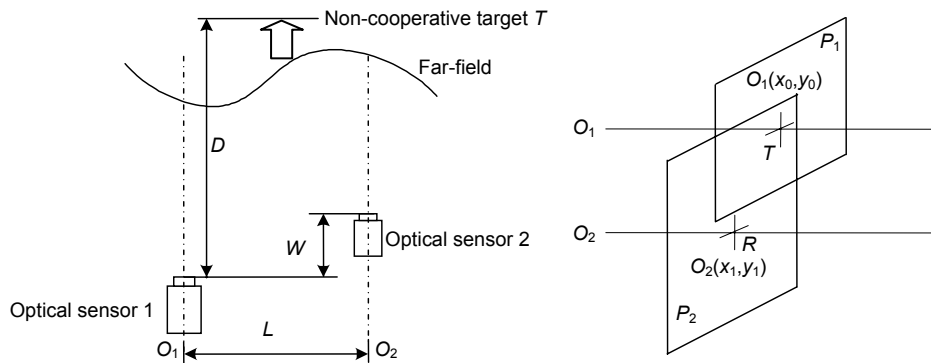


# Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology

Zhang Yong<sup>1\*</sup>, Wu Hao<sup>2</sup>, Ma Sasa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>32181 Unit of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;

<sup>2</sup>Department of Electronic and Optics Engineering, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China



Schematic diagram of finite distance image measurement ( $D$  is finite distance)

**Overview:** The axes consistency among different task modules in the platform photoelectric equipment and the axes consistency between the platform photoelectric equipment and gun barrel axis affect directly the operational effectiveness of weapon system. As a result, it is particularly urgent to carry out the research and equipment development of optical axis consistency detection technology of the platform photoelectric equipment under in field and on-line conditions. Obviously, large spacing, wide spectrum and multi-axis are the main characteristics of axis consistency detection for platform photoelectric equipment.

The presented status quo of methods and equipment are analyzed for measuring the consistency of large spacing axes. According to the above analysis, the large-spacing optical axis consistency measuring method and equipment have their own advantages and disadvantages respectively in terms of measuring range, measuring accuracy, portability and price. For example, the projection target plate measuring method is limited clearly by site and environmental conditions. Meanwhile, the collimator measuring method is used mostly in laboratory conditions. Furthermore, the cost of the inertial measuring method and the photogrammetry measuring method is high although they can meet the large-distance axis detection needs. In contrast, the intersecting target calibration method is simple in structure and portable in operation in spite of requiring a long visual distance. The applicability of axis detection equipment in field and on-line will be greatly improved if the visual distance can be shortened effectively on the premise of ensuring the measurement accuracy.

Therefore, an axis consistency detection method is proposed based on non-cooperative target image processing technology. Specifically, it is available to select scenes with typical characteristics in the far field as non-cooperative targets. Then, the axis consistency detection results are obtained by comparing the position differences of non-cooperative targets in different image spaces. The experimental results and error analysis show that the method can meet the requirements of large spacing axis consistency detection. The average value of angle measurement error is  $15.96''$  and the standard deviation is  $2.80''$  respectively for two parallel visible light axes. Meanwhile, it is available to select the visibility distance of about 100 m as the observation distance between the object to the measured target can meet the detection accuracy requirements of most photoelectric equipment. Compared with other detection methods and equipment, the method avoids many disadvantages including huge volume, heavy weight and limited operation environment. It is especially suitable for axis detection of in field and on-line to large-distance photoelectric equipment, which shows a bright application prospect.

**Citation:** Zhang Y, Wu H, Ma S S. Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(2): 180409

Supported by National Natural Science Foundation of China (51305455)

\* E-mail: bit10701159@163.com