

基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法研究

黄婷^{1,2}, 叶南¹, 赵鹏飞²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007)

摘要: 为保证飞机武器系统射击、投放的准确性, 在飞机地面校靶过程中, 需要寻找适合进行射击测试的地点, 并满足特定的安全要求; 此外, 为消除飞机在制造、安装和使用中产生的误差, 提出了一种基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法; 设计光电跟踪瞄准设备, 在构建的飞机地面校靶坐标系下, 利用光电跟踪瞄准技术确定地面标靶位置, 获取飞机实际瞄准标靶位置数据; 通过不同视角下位置数据的对比, 计算飞机地面定位误差, 通过误差补偿实现飞机地面校靶; 通过校靶效果测试实验得出结论: 所提设计方法的校靶误差降低了 23.6 m, 且明显提升了地面校靶飞机的航炮射击精度。

关键词: 光电跟踪瞄准技术; 飞机跟踪; 地面校靶; 误差补偿; 直方图均衡化函数; 图像去噪

Research on Aircraft Ground Target Calibration Method Based on Optoelectronic Tracking and Aiming Technology

HUANG Ting^{1,2}, YE Nan¹, ZHAO Pengfei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. State owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China)

Abstract: To ensure the accuracy of shooting and delivery in aircraft weapon systems, it is essential to identify suitable locations for shooting tests during the process of aircraft ground target calibration, while meeting specific safety requirements. In addition, a ground calibration method for aircraft based on optoelectronic tracking and aiming technology is proposed to eliminate the errors of aircraft manufacturing, installation, and operation. This paper designs optoelectronic tracking and aiming equipment, determines the position of ground targets, obtains displacement data of actual aiming aircraft targets by using optoelectronic tracking technology in the constructed aircraft ground calibration coordinate system, calculates aircraft ground positioning error by comparing position data from different perspectives, and achieves aircraft ground calibration through error compensation. Calibration effect testing experiment show that the proposed method reduces the calibration error by 23.6 m and significantly improves the accuracy of aircraft ground calibration for aerial gun shooting.

Keywords: optoelectronic tracking and aiming technology; aircraft tracking; ground target calibration; error compensation; histogram equalization function; image denoising

0 引言

飞机校靶指的是利用机外测试设备保证光轴或武器轴线与飞机的纵轴有规定空间位置关系的过程。其目的在于确保飞机在空中的导航和瞄准精度, 从而保障飞行安全。飞机地面校靶的意义在于其是飞机维护和保养的重要环节, 能确保飞机航电设备的性能符合要求, 避免

因设备故障或误差导致的不安全事件。此外, 通过飞机地面校靶, 可以在飞行前及时发现问题并加以解决, 避免问题在飞行中扩大或恶化, 提高飞机的维护水平和安全性, 延长飞机的使用寿命。同时, 准确的航电设备状态信息还可以为飞行员提供支持, 帮助他们作出正确的判断和决策。因此, 飞机地面校靶对于保障飞行安全和提高飞行效率都具有重要的意义。

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-02-26。

作者简介: 黄婷(1989-), 女, 硕士研究生, 工程师。

叶南(1982-), 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 黄婷, 叶南, 赵鹏飞. 基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(3): 190-196.

现阶段应用到军事飞机中的飞机地面校靶方法主要包括: 杨钧智等人^[1]提出的基于多尺度圆周频率滤波与卷积神经网络的飞机地面校靶方法, 利用多尺度的圆周频率滤波器对遥感影像中的复杂背景进行滤波, 得到了不同尺度下的目标候选点; 在此基础上, 建立卷积神经网络模型, 对候选区域进行高效的分类, 从而实现飞行器目标的准确定位, 通过与飞机实际位置误差的计算与补偿, 实现对飞机地面的校靶工作。赵鹏飞等人^[2]提出的基于图像技术的飞机校靶方法, 实现对靶板调整的原理和现状的充分分析, 利用机器视觉和图像处理技术, 完成距离测量、靶板与大地水平的自适应连续调整, 从 3 个维度上实现自动对准, 实现飞机地面校靶。黄喆等人^[3]提出的基于双目视觉的校靶方法, 利用红外线发光二极管组成的光电标靶, 通过转接座与战机各个工作站相连接; 双摄像机采集了全部的目标, 并获得了 LED 点的 3 维坐标。通过最小二乘法的空间坐标变换, 计算出双眼摄像机和各个光电标靶之间的相对位姿, 再根据坐标系的转换原则, 最后获得各个被测台轴线到战机参考台轴线的水平和竖直偏差角, 从而实现靶位的标定。依据标靶理论, 建立三维模拟实验环境, 对标靶过程中可能出现的各种误差来源进行了分析, 采用蒙特卡洛法对其进行修正。然而上述传统校靶方法在实际应用中存在明显的校靶准确性低的问题, 导致飞机航炮存在明显的射击偏差现象。

因此, 引入光电跟踪瞄准技术, 提出一种基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法。光电跟踪瞄准技术是一种利用光电探测器元件作为敏感元件, 通过光学系统对目标进行观测和跟踪的技术。利用光电传感器对目标成像, 并通过信号处理和控制系统对目标进行高精度测量和稳定跟踪。将光电跟踪瞄准技术应用到飞机地面校靶方法的优化设计工作中, 以期能够提升对飞机的校靶精度, 进而提升飞机的实际攻击效果。

1 飞机地面校靶方法设计

此次校靶方法的研究目标是通过综合应用视觉图像处理 and 计算机系统技术, 提出一种飞机自动校靶模型, 实现机载设备、安装架校准数据分析, 辅助机载设备、安装架的调整, 并实现飞机靶板自动校准, 以提高校靶的准确性和效率。通过利用机器视觉和图像处理技术对靶板进行机器识别和角度判断, 及计算机系统运算实现自动调整飞机的倾斜和方位水平, 以降低目视校准误差。利用机器视觉和图像处理技术分析飞机与靶板之间的距离, 并通过计算机系统运算实现自动调整飞机到靶板的距离, 以提高校准精度和效率。通过机器视觉和图像处理技术判断飞机机载设备的显示画面的垂直位置, 并通过计算机系统运算进行垂直对准调整, 从而确保靶

板自身方位和俯仰方向与大地水平对齐。优化设计飞机地面校靶的基本原理为: 在构建的飞机地面校靶坐标系中, 利用光电跟踪瞄准设备执行瞄准技术, 获取飞机视角下的地面标靶位置和坐标系下标靶的实际位置, 综合考虑飞机与地面标靶间距之间的位置, 计算两者之间的误差, 采用误差补偿与调整的方式, 完成对飞机地面校靶工作。在优化设计方法中, 通过光电跟踪瞄准技术的应用, 获取飞机视角下的精准标靶信息, 从而保证飞机地面校靶的精准度。

1.1 光电跟踪瞄准设备设计

为了支持飞机地面校靶方法中光电跟踪瞄准技术的运行, 需要设计光电跟踪瞄准设备。优化设计的光电跟踪瞄准设备由光电探测、瞄准和跟踪等多个部分组成, 采用线阵 CCD 作为光电探测器, 通过对目标表面面积、像素大小等进行设计, 使其在近程工作时角度范围与目标表面面积相关, 而像素尺寸又是其最小分辨能力的关键, 进而影响光电追踪瞄准的实施效果。CCD 的目标表面面积和系统焦距的大小, 决定了光电追踪瞄准的最大视场, 最大视场的设置值 C 为:

$$\tan C = \frac{x_{\text{target surface}}}{f_{\text{detection}}} \quad (1)$$

式中, $x_{\text{target surface}}$ 为靶面在水平方向上的尺寸, $f_{\text{detection}}$ 为光电探测器的焦距值。

光电瞄准单元的主要任务是对目标进行捕捉, 并对其定位^[4]。该方法通过对目标镜面反射光信号的采集, 准确地检测出镜面运动引起的位置变化量, 并通过信号处理电路将其转化为数字量偏移量, 并将其输出到跟踪伺服控制单元中, 实现对运动轨迹的实时测量。光电跟踪瞄准设备中标靶的瞄准跟踪光路如图 1 所示。

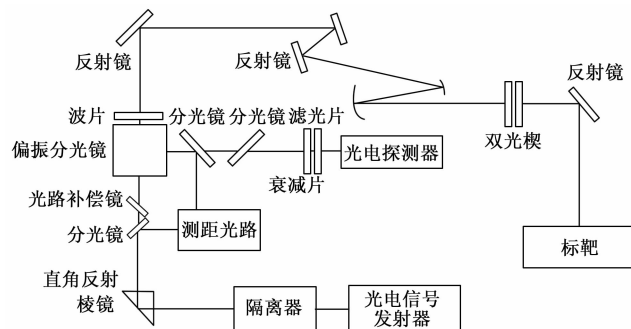


图 1 光电跟踪瞄准设备中标靶瞄准跟踪光路图

瞄准跟踪单元采用半导体光源, 发射出的偏振光通过法拉第光隔离器后, 再通过一个直角棱镜将其反射到分束器上, 然后再将其发射到分束器上。它将光束分成两部分: 一部分是反射光, 用于向测距基准光检测器分配; 通过光学补偿镜, 通过偏振分光棱镜, 通过 1/4 波片后, 变成圆偏振光^[5]。圆偏振光在 45 度镜面的作用

下，通过一对可调的镜面，将光束的指向调整到六面反射镜上，然后再通过二次光楔、窗玻璃，再通过反射镜输出，实现对目标的追踪与检测。其中，双光楔起着调整轨道转轴与轨道垂直轴线的功能。分光片与一种补偿反射镜相匹配，用于修正分光镜后的射束偏差。除上述元件外，还需要安装陀螺稳定伺服控制装置，为光电探测、瞄准的协同运行提供支持。

1.2 构建飞机地面校靶坐标系

分别构建飞机视角坐标系和世界坐标系，其中飞机视角坐标系主要用来获取飞机视角下的标靶位置信息，而世界坐标系则是确定飞机和标靶的实际位置坐标。飞机视角坐标系的原点位于飞机的质心， x 轴指向飞机的正前方， y 轴指向飞机的正右方， z 轴指向飞机的正上方。世界坐标系以地球为中心的坐标系， x 轴指向地球的北极， y 轴指向东， z 轴指向天顶，构建的世界坐标系要求能够实现对飞机姿态与飞行状态的描述^[6]。构建的飞机视角坐标系和世界坐标系之间的空间关系如图 2 所示。

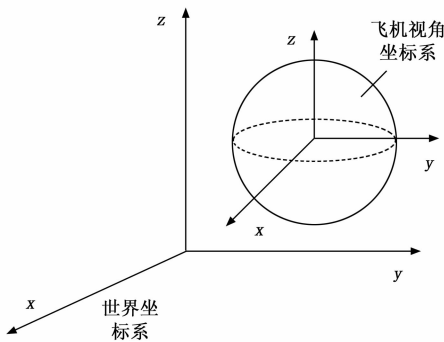


图 2 坐标系的时空关系图

根据图 2 表示关系，飞机视角坐标系中任意一点 $P_{\text{aircraft}}(x_a, y_a, z_a)$ ，该点在世界坐标系中可以表示为：

$$\begin{cases} x = x_a + x_f \cos\theta \\ y = y_a + y_f \sin\theta \\ z = z_a + z_f \end{cases} \quad (2)$$

式中， x_f 、 y_f 和 z_f 对应的是飞机在世界坐标系中的位置坐标， θ 表示的是飞机视角坐标系和世界坐标系之间的夹角，该变量的具体取值可通过两坐标系横坐标之间的夹角计算得出^[7]。按照上述方式可以实现坐标系的构建。

2 基于光电跟踪瞄准技术的地面校靶方法

2.1 基于光电跟踪瞄准技术的地面标靶位置确定

利用设计的光电跟踪瞄准设备，按照图 3 表示原理在飞机视角下生成标靶图像，通过对图像的处理与分析，得出飞机系统定位的标靶信息。

在开始跟踪前，需要先对光电跟踪瞄准系统进行初始化，包括调整光学系统的焦距、光圈大小等参数，以

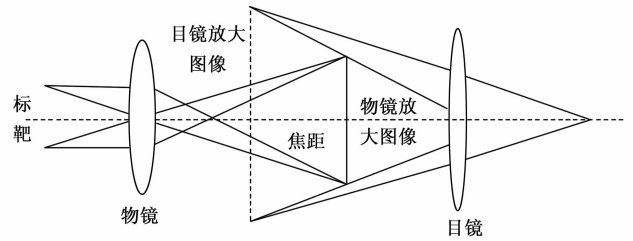


图 3 光电跟踪瞄准技术原理图

及设置跟踪参数和控制系统的工作模式等。光电跟踪瞄准设备的两对电极分别布置在光电跟踪瞄准装置的感光表面和背面，并在其两侧流过对应的光电流，故被称为“双面并流”式光电跟踪瞄准装置^[8]。双面分流式光电跟瞄装置能够提供高精度的点位信息，是目前连续式 2D 光电跟瞄装置中最精确的测量精度。这主要是由于该装置的结构特征，使得其更像是两台一维光电追踪装置，其输出讯号与入射点的位置坐标相对应^[9]。在目标捕获阶段，光电跟踪瞄准系统通过捕捉目标的图像，并利用图像处理算法对目标进行识别和定位利用图 4 表示原理，得出飞机视角下的标靶图像为：

$$I(x, y) = \begin{cases} \kappa_g \lambda \cdot x_b \cdot z_b \cos\vartheta \\ \kappa_g \lambda \cdot y_b \cdot z_b \cos\vartheta \end{cases}, x, y \in C \quad (3)$$

其中： κ_g 和 λ 分别表示光电系数和光电信号的发射波长， (x_b, y_b, z_b) 为标靶的实际位置坐标， ϑ 为标靶的成像角。按照上述方式可以得出飞机地面对应标靶的成像结果^[10]。

为保证飞机识别地面标靶位置的精准度，降低环境中的其他因素对光电跟踪成像结果产生的影响，需要对光电跟踪图像结果进行预处理，预处理步骤包括：图像去噪、图像增强等环节，采用高斯滤波的方式对光电跟踪图像进行去噪处理，高斯滤波是一种基于高斯分布的平滑滤波器，其基本思想是将高斯函数与图像卷积，以对图像进行平滑处理。高斯函数是一种钟形曲线，其形状由标准差决定，标准差越大，函数越扁平，滤波效果越强烈^[11]。光电跟踪图像去噪过程如下：

$$I_{\text{denoising}}(x, y) = \sum \omega(x, y) I(x, y) \quad (4)$$

其中： $\omega(x, y)$ 表示的是高斯权重函数，该变量的计算公式如下：

$$\omega(x, y) = \exp\left(\frac{-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}}{(2\kappa_{\text{Gaussian}} \cdot \sigma^2)}\right) \quad (5)$$

式中， σ 为高斯滤波器的标准差， κ_{Gaussian} 为高斯系数。通过式 (3)、式 (4) 和式 (5) 的联立，实现地面标靶图像噪声和细节的降低，同时平滑图像表面^[12]。采用直方图均衡的方式通过改善图像的对比度和亮度分布，实现初始图像的增强。图像增强处理结果如下：

$$g(x, y) = h_{\text{Equalize}}[g_0(x, y)I_{\text{Denoising}}(x, y)] \quad (6)$$

其中: $g_0(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 分别表示图像灰度的初始值和输出值, $h_{\text{Equalize}}[\]$ 直方图均衡化函数^[13]。

采用背景差分的方式对图像中的标靶目标进行提取, 通过将当前帧与背景帧进行相减, 得到前景目标, 目标提取结果为:

$$M = h_{\text{abs}}[g(x, y) - B(x, y)] \quad (7)$$

式中, $h_{\text{abs}}(\)$ 为差分函数, $B(x, y)$ 为光电跟踪图像中的背景区域。针对前景图像中的标靶内容, 确定标靶在飞机视角中的位置坐标, 定位结果为:

$$\begin{cases} x_{\text{Aircraft-Target}} = x_{\text{left}} + d_x \\ y_{\text{Aircraft-Target}} = y_{\text{left}} + d_y \\ z_{\text{Aircraft-Target}} = z_{\text{Aircraft}} \times \tan\beta \end{cases} \quad (x_{\text{left}}, y_{\text{left}}) \in M \quad (8)$$

其中: $(x_{\text{left}}, y_{\text{left}})$ 为前景图像中的最左侧节点坐标, d_x 和 d_y 对应的是前景图像在水平和竖直方向上的距离, z_{Aircraft} 为飞机的飞行高度, β 为飞机成像的俯仰角^[14]。

重复上述流程, 可以根据飞机的飞行状态和标靶成像结果, 得出飞机视角下地面标靶位置的定位结果。

2.2 飞机实际瞄准标靶位置数据获取

在世界坐标系下, 根据飞机的实时飞行位置数据确定对应瞄准标靶的位置数据, 假设飞机在任意时刻的飞行位置为 $(x_{\text{flight}}, y_{\text{flight}}, z_{\text{flight}})$, 那么飞机与瞄准标靶之间距离 d_{f-b} 的测量结果为:

$$d_{f-b} = v_{\text{signal}} \left(\frac{t_{f-b}}{2} \right) \quad (9)$$

其中: v_{signal} 表示的是距离测量信号在大气环境中的传输速度, t_{f-b} 为飞机距离测量信号的传输时间, 可通过反馈信号接收时间和发送时间的差值, 得出变量 t_{f-b} 的具体取值^[15]。根据反馈信号的接收角度确定飞机与标靶之间的方向角, 记为 θ_b 。那么, 世界坐标系下瞄准标靶位置的求解结果为:

$$\begin{cases} x_{\text{Target}} = x_{\text{flight}} + d_{f-b} \cos\theta_b \\ y_{\text{Target}} = y_{\text{flight}} + d_{f-b} \sin\theta_b \\ z_{\text{Target}} = z_{\text{flight}} + d_{f-b} \tan\theta_b \end{cases} \quad (10)$$

将实时获取的飞机飞行数据代入到式 (10) 中, 得出飞机实际瞄准标靶位置数据的实际获取结果^[16]。

由于飞机初始动态飞行状态, 因此与瞄准标靶之间的位置关系会发生实时变化, 重复上述操作得出任意飞行状态下瞄准标靶位置数据的实际获取结果。

2.3 飞机地面定位误差计算

以可视光学轴为参照对红外光学轴线进行标定时, 旋转对象光源设为可视光源, 旋转对象设为十字目标; 再调节可视光轴, 将它的视场中心与十字标靶的中心对齐, 并在这个时候记录十字标靶的位置^[17]。将旋转靶光源设为黑色, 十字标靶的位置相同; 用红外线光轴对齐了的十字目标, 如果在这个时候, 十字目标的中心和

红外线轴线的视野中心是一致的, 那么红外光轴就是平行于可视光轴的; 反之, 则将十字标靶的位置调整到红外线光轴视场内的中央, 同时将十字标靶的中心位置记为第二位。通过对位置 1 和位置 2 的横向和纵向位移的测定, 可以求出两个光轴的偏移量^[18]。采用坐标转换的方式, 将飞机视角下的标靶定位坐标转换到世界坐标系中, 通过两者之间的比较, 得出飞机地面定位误差的计算结果为:

$$\begin{cases} \gamma_x = x_{\text{Target}} - x_{\text{Aircraft-Target}} \\ \gamma_y = y_{\text{Target}} - y_{\text{Aircraft-Target}} \\ \gamma_z = z_{\text{Target}} - z_{\text{Aircraft-Target}} \end{cases} \quad (11)$$

若式 (11) 的计算结果取值为 0, 则无须执行校靶操作, 否则需执行校靶操作, 根据定位误差计算结果的正负情况, 确定飞机地面的校靶方向。按照上述方式得出定位误差的计算结果, 并根据标靶的定位情况对误差计算结果进行动态更新。

2.4 实现飞机地面校靶

以飞机地面定位误差的计算结果为校靶对象, 利用飞机地面校靶原理如图 4 所示, 完成对飞机的地面校靶工作。

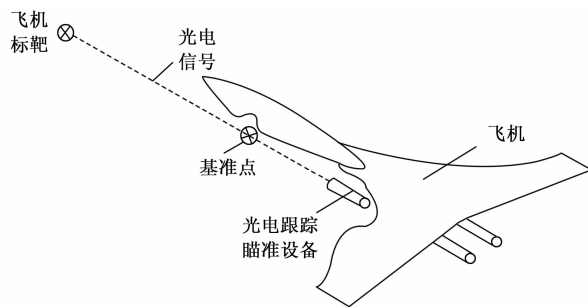


图 4 飞机地面校靶原理图

在校靶过程中, 根据目标标定的需要, 设计适当的反馈控制算法, 并将其发送到计算机系统中, 完成对飞行器姿态的调节与标定^[19]。通过对多源多源数据的分析, 实现多目标多目标检测, 并通过实验验证, 实现多源多目标联合标定, 以实现多场景下多目标标定的自适应和可扩展性。为便于操作及对靶位进行实时监测, 设计了一种与微机相结合的人机对话接口, 实现了对靶位检测结果、报警等信息的显示, 以及对靶参数的设定与调节。在此基础上, 从目标校正的实时、稳定角度出发, 研究目标校正过程中的数据传输与处理方法, 以保证校靶方法对目标的快速响应与处理, 并实现实时的校靶调整。下面给出基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法的整体流程如图 5 所示。

3 校靶效果测试实验分析

为了测试优化设计基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法的校靶效果, 将该方法应用到多个不同类型

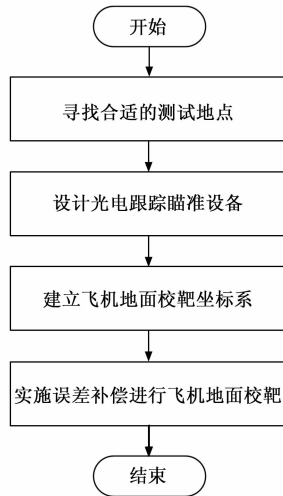


图 5 基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法的整体流程

的飞机中,体现出优化设计方法的适配性和校靶性能。此次测试实验的基本流程为:选择多个不同类型的飞机作为校靶对象,采用人为调整的方式将准备的飞机均调整至瞄准偏差状态,在地面环境中设置对准标靶,作为飞机校准与发射攻击对象。为支持飞机地面校靶方法中光电跟踪瞄准技术的正常运行,需要安装并调试相关的光电跟踪瞄准设备,通过优化设计校靶方法的应用完成对飞机样本的校靶,通过对校靶误差和航炮射击精度的量化测试,得出反映校靶效果的测试结果,并与传统方法进行比对,体现出优化设计方法在校靶准确性和适用性方面的优势。

3.1 选择飞机校靶对象

此次实验选择歼击机、轰炸机和强击机 3 种类型的飞机作为校靶对象,歼击机是专门为了在空中消灭敌机和其他飞航式空袭兵器而设计的军用飞机。轰炸机用于对地面、水面目标进行轰炸,可进行常规轰炸、俯冲轰炸、水平轰炸和电视轰炸等。强击机主要是从低空和超低空对敌人进行攻击,或在浅、深战斗中对敌人进行攻击,并对地面部队进行直接支援。强击机在低空机动性能好,稳定性好,对地小目标搜寻能力强,装备多种对地武器。此次实验选择歼-31 型号歼击机、B-52 轰炸机和强-5 攻击机作为校靶对象,其中歼-31 型号歼击机的动力装置包括 8 台 TF33-P-3 涡扇发动机,单台推力 75.6 千牛,推重比 42.6 牛/公斤,低空突防速度为 660 公里/小时。B-52 轰炸机翼展长度为 56 米,机长和机高分别为 49 米和 12 米,最大飞行速度为 1014 公里/小时,作战半径为 7 400 公里^[20]。初始选择飞机均处于正常瞄准与运行状态,为满足校靶操作需求,采用人为调节的方式将飞机调整至失调状态,满足校靶方法的运行要求。为保证实验结果的可信度,3 种类型飞机的准备数量分别准备 3 台,飞机型号相同,但飞行状态及使用程

度存在差异,并对飞机进行编号处理。

3.2 设置地面标靶

选择一个开阔、平坦的场地,确保标靶能够清晰地被飞机上的传感器所识别。同时,为了方便后续的测量和校准,应将标靶安装在固定的支架上。选择一个具有明显特征的球体,并将其固定在标靶上。确保目标物的位置和姿态与实际作战环境相符。标记地面标靶的位置信息,各个飞机对应地面标靶的设置情况如表 1 所示。

表 1 飞机地面标靶位置信息表

飞机编号	x	y	z
歼击机 Q01	550	400	0
歼击机 Q02	600	700	0
歼击机 Q03	700	500	5
轰炸机 H01	500	600	0
轰炸机 H02	400	500	0
轰炸机 H03	350	550	5
强击机 J01	280	450	0
强击机 J02	300	350	0
强击机 J03	360	650	5

表 1 中地面标靶坐标均处于世界坐标系中,单位为米。从表 1 中可以看出,各飞机对应地面标靶均处于静态状态。在标靶安装过程中,需要确保标靶牢固地固定在支架上,同时要确保标靶的位置和姿态精度。使用水平仪和铅锤等工具进行校准,可以确保标靶的稳定性和精度达到要求。为了使飞机传感器能够准确识别目标,需要在标靶上选择一些特征点进行标记。这些特征点可以是标靶的边缘、中心或其他具有明显特征的位置。标记特征点有助于传感器更准确地识别目标。如果标靶具有反射面,需要确保反射面的平整度和光洁度,以便于传感器进行准确测量。

3.3 装设并调试光电跟踪瞄准设备

将优化设计的光电跟踪扫描设备安装在选择的飞机校靶对象内部,首先,需要将光电跟踪瞄准设备合理地安装到飞机样机中。这一步骤需要具备专业的机械设计和加工技能,以确保设备的安装位置和固定方式既满足使用要求,又不会对飞机的结构强度和气动性能产生负面影响。安装的光电跟踪瞄准设备为海康威视的枪式网络混合型相机 DS-2CD4026 是一款具有 1/1.8 二百万像素的 CMOS 传感器,在彩像状态下最低亮度可以达到 0.002 Lux,在黑白状态下最低亮度可以达到 0.000 2 Lux,并且具有智能透雾的智能功能。该瞄准装置装备有一个 25 倍变焦的长焦镜头,在 30~750 毫米之间。在安装过程中,需要考虑到设备的供电需求,以及与其他航电设备的接口连接。此外,还需要考虑到设备的维护和检修需求,以便于未来对设备进行定期的检查和维护。安装完成后,需要对光电跟踪

瞄准设备进行调试, 调试内容包括: 镜头和光学元件的整洁性、电源供应稳定性等, 同时在飞机样机上进行飞行测试, 以验证光电跟踪瞄准设备在飞机样机上的运行情况。

3.4 描述校靶效果测试实验过程

根据实验需求和安全要求, 确定飞机飞行的航线。在飞行航线周围要设置安全区域, 以避免意外情况的发生。这是保证实验安全的重要步骤。根据实验要求, 将标靶放置在合适的地点。要确保标靶的位置和姿态与实验计划相符, 同时要考虑到风向、风速等因素对飞机瞄准精度的影响。这是确保实验数据准确的关键步骤。在实验开始前, 需要检查飞机与地面设备的连接情况, 包括电源、数据传输线等。确保连接稳定可靠, 避免出现意外情况。这是保证实验顺利进行的重要步骤。在实验过程中, 需要制定应急措施以应对可能出现的意外情况, 如设备故障、恶劣天气等。应急措施包括备用电源、备用数据传输线路、应急着陆场地等, 这是保证实验安全的重要措施。在实验过程中, 需要在不同的飞行高度和速度下对目标进行识别和定位, 如果识别和定位精度不满足要求, 需要对传感器的参数进行调整, 并对标靶的位置和姿态进行重新校准。优化设计基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法的开发使用 VisualStudio2008 和 2.4.1 版本 OpenCV, 程序执行最长周期为 52 ms, 其中光电跟踪瞄准技术平均每帧耗时不允许超过 32 ms。通过优化设计飞机地面校靶方法对应程序的运行, 得出飞机样机的地面校靶结果, 其中歼击机 Q01 的地面校靶结果如图 6 所示。

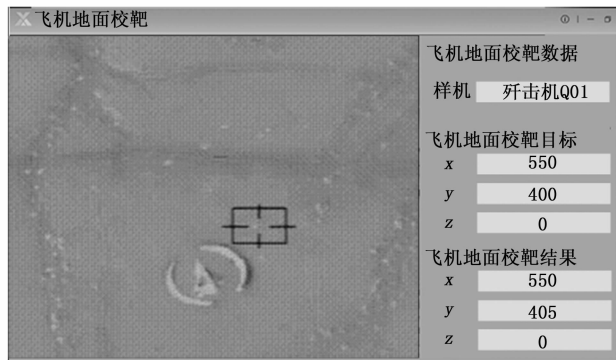


图 6 歼击机 Q01 地面校靶结果

按照上述方式可以得出实验准备其他飞机样机的地面校靶结果。实验设置传统的文献 [1] 基于多尺度圆周频率滤波与卷积神经网络的飞机地面校靶方法和文献 [2] 基于图像技术的飞机校靶方法作为实验的对比方法, 在相同的实验环境下, 完成两种对比方法的开发, 并得出相应的校靶结果。

3.5 设置飞机地面校靶效果测试指标

此次实验设置校靶误差和航炮射击精度两个指标作

为实验的两个量化测试指标, 其中校靶误差表示的是飞机实际校靶结果与目标校靶结果之间的差距, 该指标的数值结果为:

$$\epsilon = |x_{\text{boresight}} - x_{\text{set}}| + |y_{\text{boresight}} - y_{\text{set}}| + |z_{\text{boresight}} - z_{\text{set}}| \quad (12)$$

式中, $(x_{\text{boresight}}, y_{\text{boresight}}, z_{\text{boresight}})$ 和 $(x_{\text{set}}, y_{\text{set}}, z_{\text{set}})$ 分别表示的是飞机的实际地面校靶结果和设定的标靶位置。针对完成地面校靶的飞机, 发布多个射击指令, 通过计算飞机精准射击在全部射击任务重的占比, 计算航炮射击精度指标的测试结果, 即:

$$\eta = \frac{N_{\text{PRECISE SHOT}}}{N_{\text{Shooting mission}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, $N_{\text{PRECISE SHOT}}$ 和 $N_{\text{Shooting mission}}$ 分别表示精准射击次数和总射击任务数量。最终计算得出校靶误差越小、航炮射击精度越高, 证明对应方法的地面校靶效果越优。

3.6 飞机地面校靶效果测试实验结果与分析

1) 校靶误差测试结果:

综合歼击机、轰炸机和强击机 3 种类型飞机, 得出地面校靶任务的执行结果, 如表 2 所示。

表 2 飞机地面校靶任务执行结果

飞机编号	基于多尺度圆周频率滤波与卷积神经网络的飞机地面校靶方法			基于图像技术的飞机校靶方法			基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Q01	530	420	5	540	410	0	550	405	0
Q02	615	715	0	605	705	0	600	700	0
Q03	720	520	0	710	505	5	700	500	5
H01	520	615	0	505	610	5	505	600	0
H02	420	515	0	405	510	0	400	505	0
H03	340	530	0	360	560	5	350	550	5
J01	260	440	0	285	455	5	280	450	0
J02	320	330	0	305	340	0	305	350	0
J03	350	630	5	350	640	5	360	655	5

将表 2 中的数据代入到式 (12) 中, 计算得出两种传统方法的平均校靶误差分别为 36.1 m 和 16.7 m, 优化设计基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法校靶误差的平均值为 2.8 m。

2) 航炮射击精度测试结果:

优化设计方法完成地面校靶后, 飞机的航炮射击任务的执行结果如图 7 所示。

同理可以得出传统校靶飞机对应的射击任务执行结果。记录飞机航炮的实际射击位置和目标位置, 通过式 (13) 的计算得出航炮射击精度的测试结果, 如图 8 所示。

从图 8 中可以直观的看出, 与两种传统方法相比, 优化设计方法校靶作用下航炮射击精度更高, 始终高于 99%, 由此证明优化设计方法具有较高的地面校靶效果。

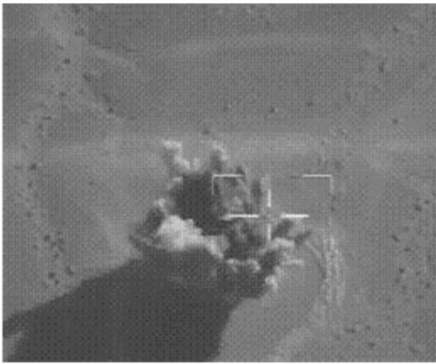


图 7 地面校靶飞机航炮射击任务执行实景

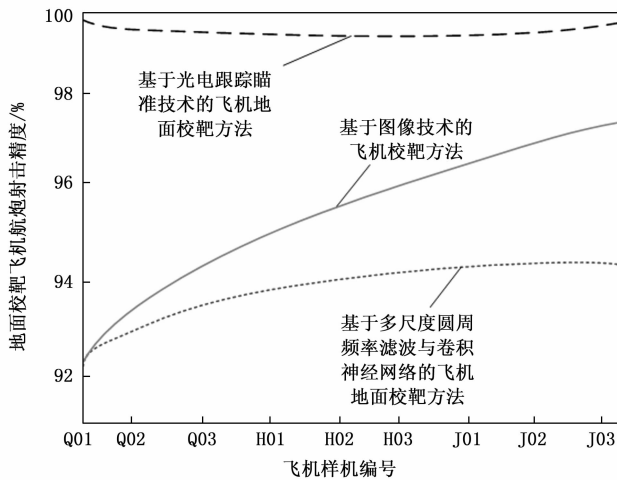


图 8 地面校靶飞机航炮射击精度测试对比曲线

4 结束语

为保证飞机武器系统射击、投放的准确性,提出一种基于光电跟踪瞄准技术的飞机地面校靶方法。光电跟踪瞄准技术是一种利用光电原理对目标进行探测、识别、跟踪和瞄准的高精度技术。它在飞机地面校靶方面发挥了重要作用,旨在提高飞机的瞄准精度和跟踪性能。该研究设计了光电跟踪瞄准设备,利用其确定地面标靶位置,并获取飞机实际瞄准标靶位置数据。通过比对不同视角下的位置数据,计算飞机地面定位误差,并通过误差补偿实现飞机地面校靶。实验结果表明,该方法成功降低了校靶误差 23.6m,并明显提升了地面校靶飞机的航炮射击精度。在此次研究中,通过光电跟踪瞄准技术的应用,有效提升飞机地面校靶方法的校靶效果,对于飞机的航行具有积极意义。

参考文献:

[1] 杨钧智, 吴金亮, 智 军. 基于多尺度圆周频率滤波与卷积神经网络的遥感图像飞机目标检测方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (5): 1397-1404.

[2] 赵鹏飞, 郭海利, 李津平, 等. 基于图像技术的自适应综

合校靶系统设计 [J]. 军民两用技术与产品, 2022 (2): 56-60.

[3] 黄 喆, 李佳雄, 沈小玲, 等. 基于双目视觉的战斗机武器系统校靶方法研究 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (7): 73-79.

[4] 张英杰, 余诚刚, 古 强, 等. 某型飞机航炮地面校靶方法研究 [J]. 中国测试, 2021, 47 (s1): 219-222.

[5] 李国栋, 张 勇, 张 玺. 基于光电跟踪的火炮轴线空间角测量方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30 (5): 695-700.

[6] 李 锋, 徐 伟, 于海涛, 等. 武器系统校靶原理及方法 [J]. 飞机设计, 2022, 42 (2): 58-63.

[7] 宋 瑛, 范 增. 基于光电自准直原理的校靶方法分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (s1): 78-81.

[8] 祁若龙, 张 珂, 赵吉宾, 等. 双工位 4-PPPS 飞机装配对接系统几何参数标定方法 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (7): 33-43.

[9] 时光煜, 史光普, 李明月. 飞机光电系统对地无缝扫描控制算法 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (6): 79-81.

[10] 熊子珺, 刘 磊, 杨鸿杰. 基于自适应 LMS 算法的空间光束快速精扫描跟踪控制方法 [J]. 中国空间科学技术, 2021, 41 (5): 95-102.

[11] 陈 姣, 龚 芝, 高祥斌. 一种弱增强图像下的特征提取方法设计与仿真 [J]. 计算机真, 2022, 39 (4): 197-200.

[12] 易 芳, 姜宏伟, 李卢丹. 飞机操纵参数联合在线校准技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (5): 146-153.

[13] 王怀鹏, 周 旭, 姚志明, 等. 阵列式柔性力敏传感器的平衡校准标定方法 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (6): 719-724.

[14] 齐 媛, 王惠林, 黄维东, 等. 机载光电稳瞄平台减振技术研究 [J]. 应用光学, 2022, 43 (4): 611-617.

[15] 张向阳, 郎 野. 光电跟踪瞄准系统中的光学传感器误差分析 [J]. 电视技术, 2022, 46 (6): 157-160.

[16] 梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 等. 无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展 [J]. 光电工程, 2022, 49 (8): 25-47.

[17] 吴 浩, 张 勇, 李 欣, 等. 光电跟踪系统高精度模板匹配跟踪算法 [J]. 红外技术, 2022, 44 (12): 1301-1308.

[18] 王 琳, 周 俊, 胡雷刚, 等. 直升机光电系统网络协同目标瞄准方法 [J]. 应用光学, 2022, 43 (1): 17-22.

[19] 陈晓阳, 高 明. 机载双波段共口径光电瞄准光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50 (5): 155-164.

[20] 杨开栋, 王德恩, 杨 英, 等. 光电跟踪系统中的惯性稳定技术 [J]. 强激光与粒子束, 2022, 34 (8): 46-53.