

引文格式: 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.

HUANG Zhe, LI Jiaxiong, SHEN Xiaoling, et al. Research on boresight method of fighter plane weapon system based on binocular vision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(7): 73-79.

基于双目视觉的战斗机武器系统校靶方法研究

黄 喆, 李佳雄, 沈小玲, 徐叶倩, 赵世艺

(天津科技大学, 天津 300222)

[摘要] 针对战斗机制造、装配过程中测量任务繁重, 以及现有战斗机武器系统校靶时普遍存在的设备笨重、效率低下等问题, 提出一种基于双目视觉测量原理的战斗机武器校靶方法。设计了一种由红外 LED 构成的光电标靶, 并通过转接架与战斗机各工位连接。双目相机拍摄所有光电标靶, 进而获取 LED 点的三维坐标。利用基于最小二乘法的空间坐标转换原理解算出双目相机与各光电标靶的相对姿态关系, 并结合坐标系传递原理最终求得各待测工位轴线相对于战斗机基准工位轴线的水平、垂直偏差角度, 以完成校靶操作。根据校靶原理搭建 3D 仿真环境, 分析了在校靶的过程中可能存在的误差源, 并利用蒙特卡洛方法对校靶算法进行了仿真分析。仿真结果表明, 相机标定误差对水平、垂直偏差角测量精度影响最大, 标准差分别为 0.0397° 和 0.0268° 。该校靶方法能适用于战斗机武器校靶, 同时可提高装配与测量过程中的工作效率与可靠性。

关键词: 校靶; 战斗机武器系统; 双目视觉; 最小二乘法; 蒙特卡洛; 误差分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.07.073



黄 喆

讲师, 博士, 研究方向为地下掘进装备导航与监测和大尺度几何量精密测量。

随着国家工业发展及科技能力水平的不断提高, 智能装配技术的应用已逐渐成为航空制造业的发展趋

势。而在航空制造及装配过程中, 采用高精度的测量方法能够保证最终产品的装配精度及设备性能^[1]。战斗机作为空军的主力兵器, 其性能与威力也随着我国军事科技水平的提高实现了跨越式提升, 在战争中发挥着至关重要的作用^[2-3]。战斗机通常配备有机炮、导弹发射架等武器装备及雷达、综合航电系统等设备, 且战斗机武器系统的命中精度直接影响其在战场的生存能力。因此, 在战斗机制造及装配过程中, 需对武器系统进行不断修正、改进, 使其达到精度要求, 进而减小武器装置及火控系统装置在装配过程中产生的误差, 提高战斗机在战场上的作战性能。

而作为战斗机保障设备的重要组成部分, 校靶装置可通过对战斗机武器系统及火控瞄准装置等设备轴线方向进行校准, 调整各待校准工位

轴线方向至标准范围内, 进而提高战斗机制造及装配工作效率与精度。此外, 战斗机在经过维修拆装等操作后, 为确保战机的武器命中率^[4-5], 也需对战斗机武器系统进行校靶操作。

随着新兴技术的不断发展, 传统校靶装置(靶板-望远镜系统)由于系统结构复杂, 操作过程烦琐, 已严重制约校靶工作的效率, 难以满足部队作战模式与战术运用的需求^[6]。因此, 研制一种新型校靶系统是一项提高我军战斗机作战效能的基础性工程, 通过提高校靶作业的精度和效率, 简化校靶操作流程, 提升了战斗机制造及装配过程的可靠性, 对增强我军军事实力和国防力量具有重大意义。

目前, 国内外存在多种校靶技术, 按校靶方式可分为实弹校靶(热校靶)、仪器校靶(冷校靶)、自身校靶

等。实弹校靶是指采用实弹射击的方式进行校靶操作。该校靶方式对场地的要求较高,操作难度大。仪器校靶(冷校靶)用校靶镜代替实弹射击,将校靶板置于战斗机前方位置,通过对待校准装置角度进行调整,使靶镜十字中心落入靶图上对应位置的误差圆内,最终完成校靶操作。自身校靶是指战斗机以任意姿态停放后,借助战斗机机载设备及校靶装置来完成校靶操作的方法^[7-11]。与实弹校靶、仪器校靶方法相比,自身校靶无需将战斗机顶至水平、无需远距离立靶板,对校靶场地要求较低。为此,自身校靶也逐渐成为国内外学者的研究热点,如美国 AAI 公司的先进校靶设备系统(ABE)运用“测角法”原理,利用三轴惯性陀螺仪与自准直仪对待校准工位的偏差角度进行测量,简化了校靶操作步骤^[12-13]。胡宇群等^[14]提出一种基于激光雷达的机载设备安装姿态校准方法,有效避免了传统校准方法工作效率低、精度低等问题。航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司研制出一种光电惯性校靶系统,采用光学准直技术与惯性测量技术,能够实现飞机精准、快速校靶^[15]。

近年来,在光电检测技术中,视觉测量技术依靠其实时性强、精度高等优势正逐步成为行业研究热点。本文提出了一种基于双目视觉的战斗机武器系统校靶方法,设计了一种适用于校靶系统的光电标靶,通过双目相机拍摄标靶图像,利用基于最小二乘法的空间坐标转换原理完成战斗机校靶操作。该方法能有效简化校靶流程,提高了战斗机制造、装备过程的工作效率与可靠性,具备较高的工程实用性。

1 校靶方法

1.1 测量原理

该武器校靶系统主要由双目相机与校靶单元组成。图 1(a)所示

即为校靶单元的主要结构,包括光电标靶和转接架。光电标靶靶面装有 LED 光源,其中 A、B、C、D 4 点成矩形分布。光电标靶与转接架刚性连接,考虑到校靶过程中战斗机各待测工位处的安装底座结构不同,需对各工位的转接架进行专门设计与加工,使其具有精确的几何形状与尺寸。同时,各 LED 点在靶面的位置关系以及 LED 点与转接架轴线的空间位置关系均通过高精度三坐标测量仪进行了精确标定^[16-18]。此外,在设计光电标靶时使用红外 LED 作为标靶光源,以保证相机能够捕获到清晰

的 LED 点光斑图像。图 1(b)所示为武器系统校靶示意图。将双目相机左相机坐标系作为世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$;以光电标靶 LED 点 A 为原点建立标靶坐标系 $O_t-X_tY_tZ_t$,且 X_t 轴、 Z_t 轴分别与向量 \vec{AB} 、 \vec{AD} 平行;并记基准工位处标靶坐标系为 $O_{10}-X_{10}Y_{10}Z_{10}$ (简称 C_{10} 系),待校准工位处标靶坐标系 $O_k-X_kY_kZ_k$ (简称 C_k 系,其中 $k=1,2, \dots, m, m$ 为待测工位个数)。

校靶过程中,战斗机机身以任意姿态停放,双目相机置于战斗机前方位置,光电标靶通过转接架分别与战斗机基准工位及各待校准工位刚性连接(连接后,战斗机各工位的轴线方向与转接架轴线方向保持一致)。双目相机拍摄各光电标靶 LED 点的

光斑图像,根据双目视觉测量原理与基于最小二乘法的三维坐标转换原理即可求得 C_k 系与 C_{10} 系间的旋转矩阵 R_{10}^k ,进而求得战斗机待校准工位轴线相对于基准工位轴线的水平偏差角 $\Delta\theta$ 与垂直偏差角 $\Delta\phi$,通过对偏差角度进行调整,最终完成校靶操作。

1.2 LED 点坐标测量

双目视觉成像技术主要运用视差原理,采用三角法获得空间点的三维坐标值^[19-22]。图 2 所示为双目视觉测量原理图。

点 P 为空间中一点,基于相机投影模型可知各坐标系间的转换关系为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R_w^c \quad T_w^c] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, (u, v) 、 (X, Y, Z) 分别为点 P 在像素坐标系、世界坐标系中的坐标; f_x, f_y 为相机内参; R_w^c, T_w^c 为相机外参,其分别表示相机坐标系与世界坐标系间的旋转矩阵、平移矩阵。双目相机的内外参数可通过相机标定的方式求得。

基于上述算法,本文以左相机坐标系为世界坐标系,通过双目相机拍摄标靶 LED 点光斑图像并求得 LED 光斑质心点在左、右相机像素坐标系下的坐标 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 后,将其代入式(1)可得

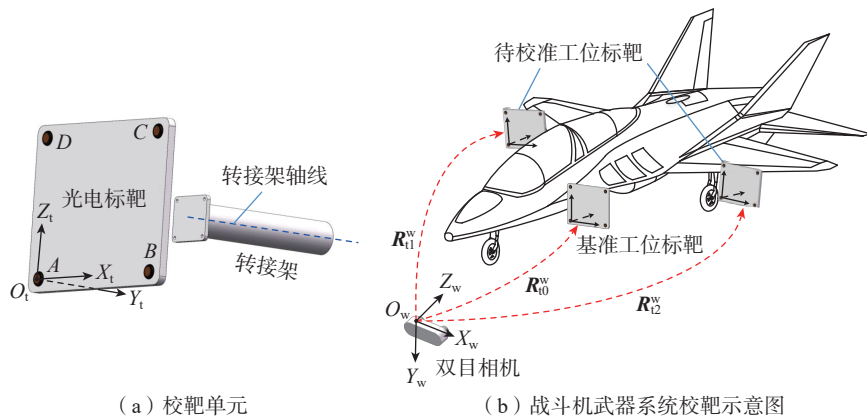


图 1 校靶系统结构图
Fig.1 Structure diagram of boresight system

$$Z_l \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R_w^1 \ T_w^1] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Z_r \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R_w^2 \ T_w^2] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, R_w^1 、 R_w^2 分别为左、右相机坐标系与世界坐标系间的旋转矩阵; T_w^1 、 T_w^2 代表平移矩阵。

联立式(2)和(3),最终解算出标靶 LED 点在世界坐标系下的三维空间坐标 (X, Y, Z) 。

在实际测量过程中,由于镜头属性及相机安装误差等原因,空间点 P 在像素坐标系中的实际成像点与理想成像点 (u, v) 之间存在一定的偏差,即获取的图像含有畸变。相机成像畸变又分为径向畸变和切向畸变两种。径向畸变校正公式为

$$\begin{cases} u' = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ v' = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (4)$$

式中, (u', v') 为畸变点的像素坐标; (u, v) 为理想情况下的像素坐标; k_1 、 k_2 、 k_3 为径向畸变参数; $r = \sqrt{u^2 + v^2}$ 。

切向畸变校正公式可表示为

$$\begin{cases} u'' = u + 2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2) \\ v'' = v + p_1(r^2 + 2v^2) + 2p_2 uv \end{cases} \quad (5)$$

式中, p_1 、 p_2 为切向畸变参数。

因此,在实际测量过程中,首先需对相机进行精确标定,进而获得相机内参数 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 、 p_2 ,以对双目相机获得的图像进行立体校正。

1.3 空间坐标转换

本研究利用基于最小二乘法的多公共点坐标转换方法,求得标靶坐标系与世界坐标系间旋转矩阵。 n 组公共点 $P_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 在世界坐标系与标靶坐标系下的三维坐标分别为 $\delta = [X \ Y \ Z]^T$, $\gamma = [X' \ Y' \ Z']^T$ 。根据空间坐标转换原理可知^[23-25]

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (6)$$

式中, \mathbf{R} 为世界坐标系与标靶坐标系之间的旋转矩阵; \mathbf{T} 为平移矩阵。将式(6)简化为 $\gamma = \mathbf{R}\delta + \mathbf{T}$ 。

已知有 n 组测量数据 $\{(\delta_i, \gamma_i), i=1, 2, 3, \dots, n\}$, 则

$$\begin{cases} \delta_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = [X_g \ Y_g \ Z_g]^T \\ \gamma_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i = [X'_g \ Y'_g \ Z'_g]^T \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)将世界坐标系与标靶坐标系下的三维坐标数据进行中心化处理,即

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [\delta_1 - \delta_g, \delta_2 - \delta_g, \dots, \delta_n - \delta_g]^T \\ \mathbf{L} = [\gamma_1 - \gamma_g, \gamma_2 - \gamma_g, \dots, \gamma_n - \gamma_g]^T \end{cases} \quad (8)$$

引入矩阵 $\mathbf{X} = \mathbf{R}^T$, 联立式(6)和(8)并简化,则有

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{L} \quad (9)$$

根据最小二乘原理,该方程的最小二乘解为

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}^T = [(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}]^T \quad (10)$$

根据式(6)和(10)可进一步求得平移矩阵 \mathbf{T} 。

在图1(a)中,标靶 LED 点在标靶坐标系下的空间坐标与世界坐标系下的坐标均为已知量。结合上述算法,即可解算出该标靶坐标系与世界坐标系间的旋转矩阵 R_{i0}^w 。将 C_{i0} 系与世界坐标系间旋转矩阵表示为 R_{i0}^w , C_{ik} 系与世界坐标系间旋转矩阵表示为 R_{ik}^w 。再结合空间坐标转换原理可知, C_{ik} 系与 C_{i0} 系间的旋转矩阵 R_{ik}^{i0} 可写为

$$R_{ik}^{i0} = (R_{i0}^w)^{-1} \cdot R_{ik}^w \quad (11)$$

1.4 偏差角测量

通过对标靶 LED 点与转接架轴线进行标定,可知转接架轴线在标靶坐标系中的水平角和垂直角。

如图3所示,基准工位轴线在 C_{i0} 系中的水平角、垂直角分别为 θ 、 ϕ ,待校准工位轴线在 C_{ik} 系中的水平角、垂直角分别为 θ_k 、 ϕ_k 。点 P 为待校准工位轴线上一点,且向量 $\overline{O_{ik}P}$ 模长为 1,则点 P 在待校准标靶系中的三维空间坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 可表示为

$$\begin{cases} X_0 = \cos \phi_k \cos \theta_k \\ Y_0 = \cos \phi_k \sin \theta_k \\ Z_0 = \sin \phi_k \end{cases} \quad (12)$$

则点 P 在 C_{i0} 系中的空间坐标 P' (X_1, Y_1, Z_1) 为

$$P' = P \times R_{ik}^{i0} \quad (13)$$

进而求得点 P' 在 C_{i0} 系中的水

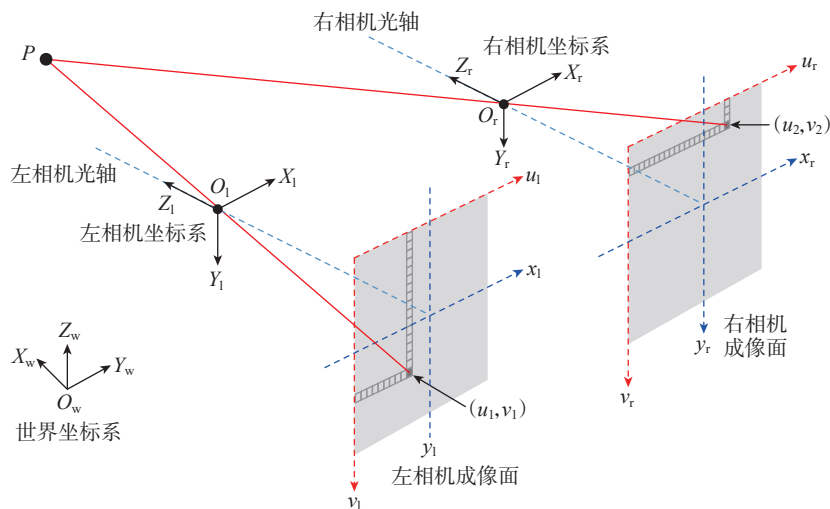


图2 双目视觉测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of binocular vision measurement

平角、垂直角 θ'_k, ϕ'_k 。

$$\begin{cases} \theta'_k = \arctan \frac{Y_1}{X_1} \\ \phi'_k = \arctan \frac{Z_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \end{cases} \quad (14)$$

因此,待校准工位轴线相对于基准工位轴线的水平、垂直偏差角度 $\Delta\theta, \Delta\phi$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta\theta = \theta - \theta'_k \\ \Delta\phi = \phi - \phi'_k \end{cases} \quad (15)$$

通过将待校准工位轴线的偏差角度 $\Delta\theta, \Delta\phi$ 调整至标准范围内,即可完成校靶操作。

2 误差分析

该武器系统校靶方法利用双目视觉测量原理实现了光电标靶 LED 点空间坐标测量,再根据基于最小二乘法的空间坐标转换原理,最终求得待校准工位轴线相对于基准工位轴线间的水平、垂直偏差角度,最终完成校靶操作。通过对校靶算法进行分析可知,影响校靶精度的误差源主要有相机标定误差、光电标靶 LED 点像素坐标提取误差以及光电标靶与转接架轴线标定误差,并分别简称为误差项 1、误差项 2、误差项 3。其中误差项 1 主要包括相机内参标定误差、畸变参数标定误差与相机外参标定误差。

为清晰直观地表示各误差源对测量结果的影响,采用 SolidWorks 软件搭建了校靶系统仿真模型。如图 4 所示,光电标靶 1、2 分别安装在战斗机基准工位与待校准工位处,双目相机置于标靶前方位置, O_l, O_r 分别为左、右相机光心,以左相机坐标系为世界坐标系。左右两相机型号相同,且两相机光心距离为 120 mm。具体的相机参数如表 1 所示。

仿真过程中,首先根据算法解算出无误差时校靶系统仿真模型的水平偏差角与垂直偏差角,并以此为参考值。利用蒙特卡洛方法对误差项 1、误差项 2、误差项 3 进行分析^[26-27],

并将上述误差源以随机数的方式分别代入程序中,进而解算出有误差时的水平、垂直偏差角,最后对数据进行处理,完成仿真分析。

图 5 为仿真过程中水平偏差角、垂直偏差角的数据图。表 2 所示为仿真过程中的试验数据统计值。分析数据可知:

(1) 误差项 1 是影响校靶精度的主要因素,而误差项 2、误差项 3

对校靶精度影响较小;

(2) 误差项 1 对水平偏差角、垂直偏差角测量精度影响较大,其标准差分别为 $0.0397^\circ, 0.0268^\circ$; 对误差项 2 而言,其对水平偏差角、垂直偏差角测量精度影响较小,其标准差分别为 $0.0063^\circ, 0.0075^\circ$; 误差项 3 对水平偏差角、垂直偏差角测量精度影响最小,其标准差均为 0.0006° ;

(3) 将全部误差叠加,即出现总

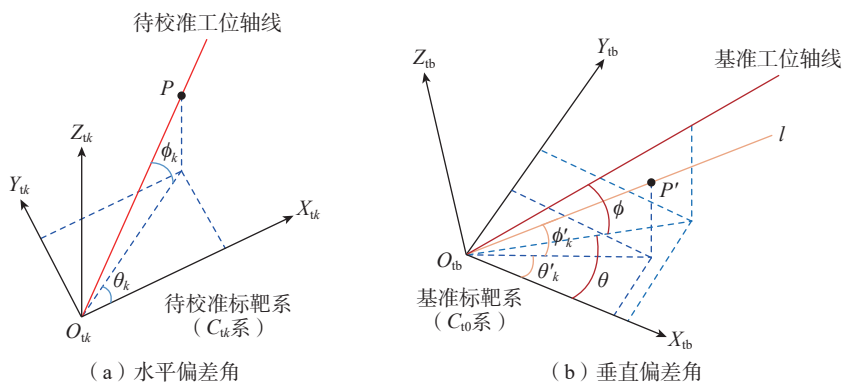


图 3 水平/垂直偏差角测量原理

Fig.3 Measurement principle of horizontal/vertical deviation angles

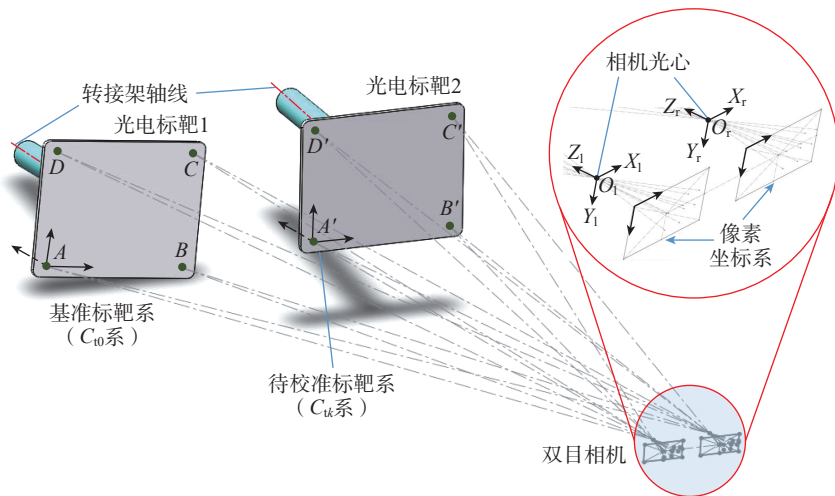


图 4 校靶系统仿真图

Fig.4 Simulation diagram of boresight system

表 1 相机参数

Table 1 Parameters of the camera

f_x	f_y	u_0/pixel	v_0/pixel	R	T
1509.4339	1509.4339	640	512	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$[-120 \ 0 \ 0]^T$

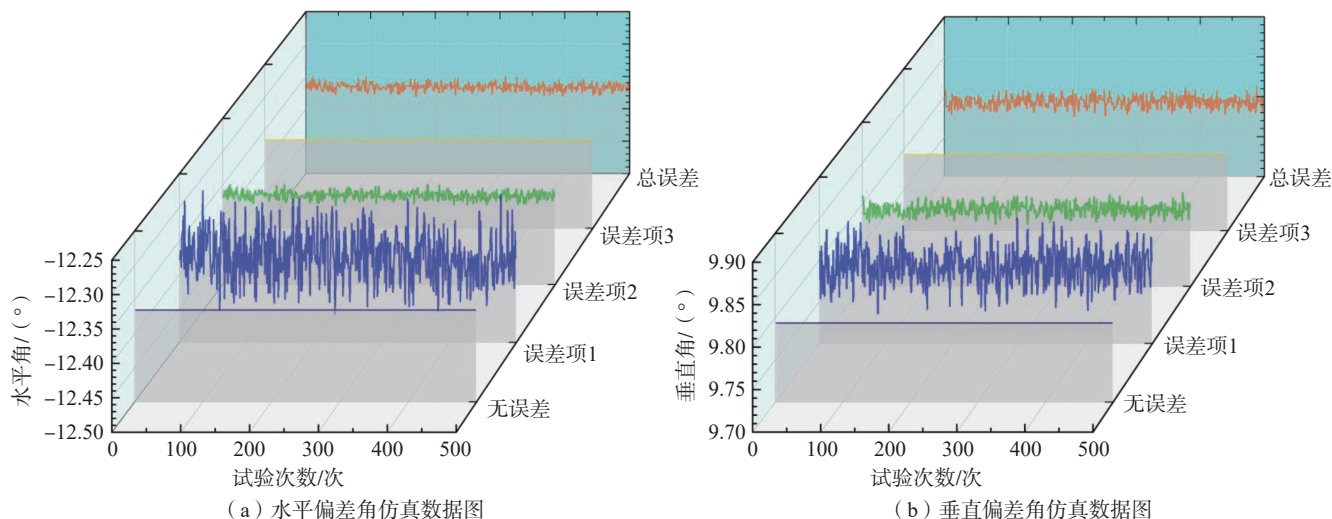


图5 仿真数据图

Fig.5 Diagram of simulation data

误差时,水平偏差角测量精度受影响较大,标准差为 0.0399° ,垂直偏差角测量精度受影响较小,标准差为 0.0241° 。

根据仿真分析结果可知,相机标定误差即相机内参、畸变参数、相机外参等参数的标定误差是影响测量结果的最主要误差源,后续可通过提高相机标定精度来有效减小本校靶方法的测量误差。

图6所示为基于本方法制作的校靶系统模拟装置,其中A、B、C、D为红外LED光源。测试工装用于模拟战斗机机身,校靶单元通过转接架与工装刚性连接,双目相机置于前方位置,用于拍摄光电标靶LED点光斑图像,从而进行校靶操作。受条件等原因限制,该校靶系统模拟装置还需进一步优化、改进。

3 结论

(1) 本文提出一种基于双目视觉的战斗机武器系统校靶方法,通过对光电标靶进行设计,利用基于最小二乘法的空间坐标转换原理解算出各校准工位处光电标靶相对于双目相机的姿态参数,并结合坐标系传递的方式求得待测工位轴线相对于战斗机基准工位轴线的水平/垂直偏差

表2 偏差角测量精度数据统计值

Table 2 Statistical value of deviation angle data

($^\circ$)

偏差角	统计项	无误差	误差项 1	误差项 2	误差项 3	总误差
水平偏差角	最大值	-12.3645	-12.2763	-12.3489	-12.3643	-12.2817
	最小值	-12.3645	-12.4599	-12.3826	-12.3664	-12.4638
	平均值	-12.3645	-12.3731	-12.3657	-12.3654	-12.3652
	标准差	0	0.0397	0.0063	0.0006	0.0399
垂直偏差角	最大值	9.7939	9.8533	9.8145	9.7949	9.8543
	最小值	9.7939	9.7357	9.775	9.7929	9.7171
	平均值	9.7939	9.7936	9.7941	9.7939	9.7921
	标准差	0	0.0268	0.0075	0.0006	0.0241

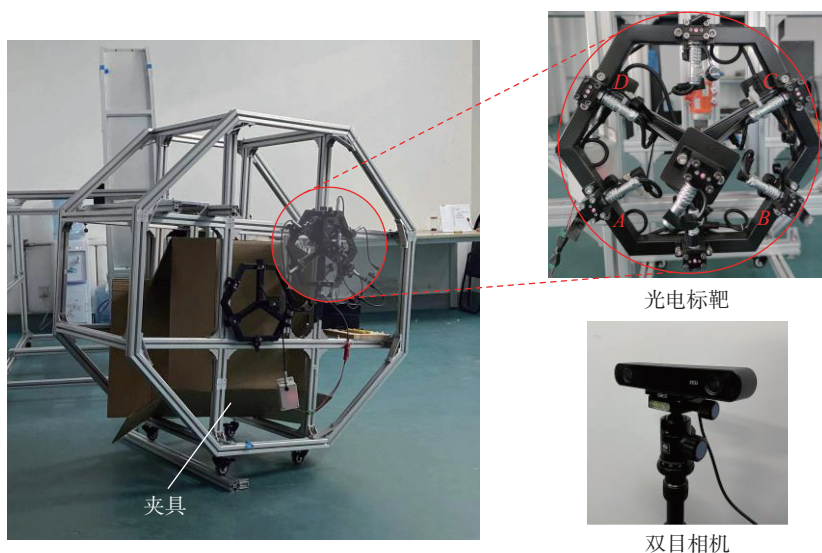


图6 校靶系统模拟装置实物图

Fig.6 Physical picture of boresight system simulation device

角度,通过调整角度完成校靶操作。

(2) 本文利用 SolidWorks 软件搭建了 3D 仿真环境,分析了校靶过程中可能存在的误差源,并利用蒙特卡洛方法对校靶算法进行了仿真分析。仿真结果表明,水平、垂直偏差角测量精度受相机标定误差影响较大,其标准差分别为 0.0397° 、 0.0268° ;而光电标靶 LED 点像素坐标提取误差以及光电标靶与转接架轴线标定误差对水平偏差角、垂直偏差角测量精度影响较小;当全部误差叠加时,水平偏差角测量精度受影响较大,标准差为 0.0399° ;而垂直偏差角测量精度受影响较小,标准差为 0.0241° 。

(3) 本文提出的战斗机武器系统校靶方法能够满足战斗机武器系统的校靶需要。此外,该校靶方法可在战斗机制造、装配过程中对武器系统安装精度进行校准,以提高装配与测量过程中的可靠性与生产效率。而在未来工作中,将对本文所提校靶方法及标靶设计进行优化,以减小校靶过程中各误差源对水平、垂直偏差角测量精度的影响;同时,基于本文提出的方法研制校靶系统,以对该系统的校靶精度与性能进行评定,并在本方法的基础上进行改进,使其具有一定的工程实用价值。

参考文献

[1] 梁青霄. 面向飞机制造的测量管理 M-BOM 构建[J]. 航空制造技术, 2020, 63(23/24): 72-79.

LIANG Qingxiao. Construction of M-BOM for aircraft manufacturing measurement management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(23/24): 72-79.

[2] 余丽山, 李彦彬, 赵永龙, 等. 战斗机的发展历程及趋势[J]. 飞航导弹, 2017(12): 49-53.

YU Lishan, LI Yanbin, ZHAO Yonglong, et al. The development course and trend of fighters[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(12): 49-53.

[3] 赵长辉, 邢晨, 孙颖. 现代战斗机保障设备发展综述[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(上册). 北京, 2017.

ZHAO Changhui, XING Chen, SUN Ying. Overview of the development of modern fighter support equipment[C]//2017 (the third) China Aviation Science and Technology Conference (Volume I). Beijing, 2017.

[4] 孟繁胜, 张玉福, 李彬, 等. 一种基于激光跟踪仪的火箭炮精度检测方法[J]. 新技术新工艺, 2020(11): 76-79.

MENG Fansheng, ZHANG Yufu, LI Bin, et al. A kind of method of rocket gun accuracy detection based on laser tracker system[J]. New Technology & New Process, 2020(11): 76-79.

[5] 李庆波, 樊瑞山, 李芳, 等. 光电导弹校靶方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 156-160, 165.

LI Qingbo, FAN Ruishan, LI Fang, et al. Research on target calibration method of photoelectric missile[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(7): 156-160, 165.

[6] 赵长辉, 段洪伟, 李波, 等. 飞机校靶装置技术的发展[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(2): 46-51, 24.

ZHAO Changhui, DUAN Hongwei, LI Bo, et al. Development of aircraft boresighting equipment technology[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(2): 46-51, 24.

[7] 胡一楠. 校靶镜检定系统的光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.

HU Yinan. Optical system design of the detection of checking target lens[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.

[8] 吕俊伟, 毕波, 宋庆善. 飞机平显综合靶标校靶设备设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(2): 56-59.

LÜ Junwei, BI Bo, SONG Qingshan. Design of integrated equipment for airplane HUD bore sighting[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(2): 56-59.

[9] 汪智超, 黄福贵. 直升机武器系统校靶技术研究[J]. 直升机技术, 2016(3): 56-62.

WANG Zhichao, HUANG Fugui. Research on checking target technology of weapon system on board helicopters[J]. Helicopter Technique, 2016(3): 56-62.

[10] 李岭, 余松, 王彦晓, 等. 一种新型校靶模式的研究[J]. 教练机, 2017(4): 37-41.

LI Ling, YU Song, WANG Yanxiao, et al. Research on a new type of boresighting mode[J]. Trainer, 2017(4): 37-41.

[11] 蔡恒鑫, 宋鹏详, 林成. 航炮地面热校靶的仿真分析[J]. 航空制造技术, 2012, 55(16): 90-93.

CAI Hengxin, SONG Pengxiang, LIN Cheng. Simulation analysis of aircraft gun thermal calibration in ground[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(16): 90-93.

[12] HAMILTON S B, JAKLITSCH J J, REED C J, et al. Gyroscopic system for boresighting equipment by transferring a frame of reference: US08/368410 [P]. 1997-04-08.

[13] JAKLITSCH J J, SCHULZ C E, STORKE R A, et al. Enhancing mission effectiveness through technology insertion: Advanced boresight equipment—A triservice solution[C]//IEEE Autotestcon 93. San Antonio: IEEE, 2002: 715-719.

[14] 胡宇群, 秦龙刚, 黄翔. 基于激光雷达的机载设备安装姿态校准[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 112-116.

HU Yuqun, QIN Longgang, HUANG Xiang. Mounted position calibration for airborne equipment with laser radar[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1): 112-116.

[15] 焦玉坤, 李波, 包湘琿, 等. 光电惯性校靶系统研制[Z]. 国家科技成果, 2017.

JIAO Yukun, LI Bo, BAO Xianghui, et al. Development of photoelectric inertial target calibration system[Z]. National Scientific and Technological Achievements, 2017.

[16] 向民志, 范百兴, 李祥云, 等. 激光跟踪仪与机器人坐标系转换方法研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(1/2): 98-101.

XIANG Minzhi, FAN Baixing, LI Xiangyun, et al. Study on coordinate transformation between a laser tracker and a robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1/2): 98-101.

[17] 杜福洲, 文科. 大尺寸精密测量技术及其应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(11): 16-24.

DU Fuzhou, WEN Ke. Large-scale precision measurement technology and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(11): 16-24.

[18] 徐宏图, 张琦, 罗伟, 等. 轴类零件直线度检测系统研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(23/24): 51-56.

XU Hongtu, ZHANG Qi, LUO Wei, et al. Research on straightness detection system for shaft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 51-56.

[19] 袁培江, 陈冬冬, 王田苗, 等. 基于双目视觉测量系统的孔径补偿研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(4): 41-46.

YUAN Peijiang, CHEN Dongdong, WANG Tianmiao, et al. Research on positional error compensation method based on binocular

vision measurement system[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(4): 41–46.

[20] 刘胜道, 邢成聪, 周国华. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统的测量精度分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 439–445.

LIU Shengdao, XING Chengcong, ZHOU Guohua. Measuring precision analysis of binocular vision system in remote three-dimensional coordinate measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 439–445.

[21] 张强. 基于双目立体视觉的三维特征点测量方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

ZHANG Qiang. Research on three dimensional feature point measurement method based on binocular stereo vision[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[22] 邹朋朋. 基于双目立体视觉的坐标测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

ZOU Pengpeng. Research on coordinate

measurement technology based on binocular stereo vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[23] 陈林宇. 基于罗德里格矩阵的三维坐标转换方法研究[J]. *地理空间信息*, 2018, 16(11): 107–109.

CHEN Linyu. Research on the 3D coordinate transformation method based on Rodrigues matrix[J]. *Geospatial Information*, 2018, 16(11): 107–109.

[24] 李永正, 许鹏, 杜彬. 基于罗德里格矩阵的三维坐标转换方法[J]. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(4): 192–194.

LI Yongzheng, XU Peng, DU Bin. 3D coordinate transformation method based on Rodrigues matrix[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2021, 44(4): 192–194.

[25] 李静. 基于最小二乘法的空间坐标转换的非迭代算法[J]. *数学的实践与认识*, 2022, 52(9): 115–120.

LI Jing. A non-iterative algorithm for spatial coordinate transformation based on least square method[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2022, 52(9): 115–120.

[26] 范晓龙, 刘韶光, 范欢欢. 一种基于激光跟踪仪的大飞机外形测绘建模方法[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(14): 69–74.

FAN Xiaolong, LIU Shaoguang, FAN Huanhuan. Large aircraft shape modeling technology from surveying and mapping based on laser tracker[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(14): 69–74.

[27] 陈远志, 黄杰, 章易镰, 等. 改进的粒子群算法求解飞机位姿评估问题[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(6): 90–96.

CHEN Yuanzhi, HUANG Jie, ZHANG Yilian, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for aircraft posture evaluation problems[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(6): 90–96.

Research on Boresight Method of Fighter Plane Weapon System Based on Binocular Vision

HUANG Zhe, LI Jiexiong, SHEN Xiaoling, XU Yeqian, ZHAO Shiyi

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

[ABSTRACT] Aiming at the heavy measurement task in the process of fighter manufacture and assemble, as well as the problems of heavy equipment and low efficiency in the existing methods of boresight for fighter plane weapon, a new method of boresight for fighter plane weapon based on the measurement principle of binocular vision is proposed. A photoelectric target composed of infrared LEDs is designed, which is connected with calibration station of the fighter through the adapter. The binocular cameras take pictures of all photoelectric targets, and then obtains the three-dimensional coordinates of the LED points. Then, the relative attitude parameters between the binocular cameras and each photoelectric target will be calculated by using the principle of space coordinate transformation based on least square method. And the horizontal/vertical deviation angles of the stations axes to be measured relative to the axis of the fighter's reference station can be finally obtained by combining the coordinate system transfer, and the boresight operation will be completed. Based on the principle of boresight, a 3D simulation environment is built, the possible error sources in the process of boresight are analyzed, and the boresight algorithm is simulated using Monte Carlo method. The simulation results show that the cameras calibration error has the greatest impact on the measurement accuracy of horizontal/vertical deviation angles, with the standard deviation of 0.0397° and 0.0268° , respectively. This proposed method can be applied to the boresight for fighter plane weapons, which can also improve the work efficiency and reliability in the process of assembly and measurement.

Keywords: Boresight; Fighter plane weapon; Binocular vision; Least square method; Monte Carlo; Error analysis

(责编 阳光)