

文章编号:1002-2082(2018)03-0326-06

一种针对高速小目标的偏航角测算方法

张 潇¹, 王灿召¹, 张 兵¹, 蔡 勇²

(1. 中国电子科技集团公司 第二十七研究所, 河南 郑州, 450047;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安, 710068)

摘 要: 射弹偏航角是影响电磁轨道发射装置发射精度的关键参数, 为实时、高精度测量射弹偏航角, 提升电磁轨道发射装置发射精度, 基于双目视觉原理提出一种无需目标速度的射弹偏航角测算方法。利用高速射弹轨迹图像, 通过构建像机线性成像模型解算高速射弹图像坐标, 实现目标偏航角的测量。分析了光学系统参数对测量精度的影响, 理论误差约为 $14.5 \mu\text{rad}$ 。偏航角测量实验结果表明该方法能够实时、准确测算射弹偏航角, 测算量偏差平均值为 0.58 mrad 。

关键词: 电磁轨道; 高速小目标; 偏航角; 双目视觉; 光学系统误差

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201839.0301005

Yaw angle calculation method for high-speed small target

Zhang Xiao¹, Wang Canzhao¹, Zhang Bing¹, Cai Yong²

(1. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy Science, Xi'an 710068, China)

Abstract: The yaw angle of projectile is a key parameter that affects the launch accuracy of the electromagnetic rail launcher. In order to measure the yaw angle of the projectile timely and precisely, and to improve the launch accuracy of the electromagnetic rail launcher, a method based on binocular vision theory without target velocity was proposed. Utilizing the high-speed projectile trajectory images and establishing the camera linear imaging model to solve the high-speed projectile image coordinates, the measurement of the target yaw angle was realized. According to the proposed method, the influences of the optical system parameters on the measurement accuracy were also analyzed, with a theoretical error of approximately $14.5 \mu\text{rad}$. The experiment of the yaw angle measurement shows that this method can calculate the yaw angle of the projectile with accuracy and timeliness, and the average of the calculated deviation is 0.58 mrad .

Key words: electromagnetic rail launch; high speed small target; yaw angle; binocular vision; optical system error

引言

电磁轨道发射技术是全部或部分利用电磁能量加速并发射弹丸的技术^[1]。目前, 国外研究机构对电磁发射装置进行了大量理论和实验工作, 并已取得了显著研究成果, 有望在今后几年内走

向实用化。国内也进行了大量相关研究, 已初步具备高速发射能力。

射向精度作为电磁轨道发射技术的关键指标之一, 是电磁轨道发射装置实用化进程研究中的重要课题。提高射向精度首先需要获取射弹的偏

收稿日期: 2017-11-21; 修回日期: 2018-01-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2015AA0866)

作者简介: 张潇(1983—), 男, 河南信阳人, 工程师, 硕士, 主要从事光电控制与数字信号处理等方面的研究工作。

E-mail: rnd_sue@qq.com

航角度,传统的射弹偏航角测算多使用纸靶、木板靶和网靶等接触式测算方法,这些方法虽然可靠性高,但耗费材料多、安装不便,且做不到数据的实时处理。自 20 世纪 90 年代起,随着 CCD 成像技术的发展,国内外逐渐出现了利用光学成像技术,基于数字图像处理的测算方法,包括光幕立靶测量法和 CCD 立靶测量法等^[2]。这些方法能够测量飞行弹丸的多个参数,灵敏度和测量精度较高。但系统结构复杂,使用维护不便,且测量装置不能随发射装置一体化安装。

针对当前测算方法存在的不足,结合工程实际需求,本文提出一种利用高速 CMOS 双目成像探测体制测算偏航角度的方法。该方法通过双目像机获取高速射弹轨迹图像,并构建目标与发射装置的坐标矩阵映射,实时解算目标偏移射向基准轴的三维角度数据,实现目标偏航角的测量。

1 测算方法

1.1 原理

本方法是通过像机线性成像模型,对电磁发射装置射弹轨迹与发射轴的夹角进行测量,实现高速小目标偏航角测量。目标经光学系统成像于 CMOS 上,首先通过检测目标的像位移量计算出目标相对标定基准的二维偏离距离,继而利用双目像机视觉测量原理提取目标三维坐标信息,并最终折算为目标偏航角度^[3],系统结构如图 1 所示。

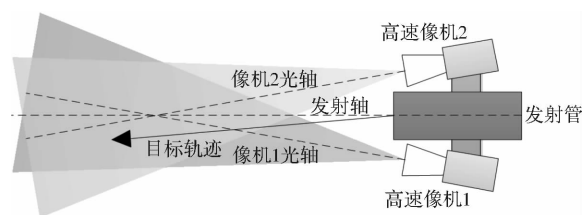


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system structure

为说明双目像机测量原理,现建立射弹在像机光轴与发射轴交平面的投影偏航角计算模型。如图 2 所示,构建笛卡尔坐标系(O, X, Y),定义射弹出膛点 O 为坐标原点,发射轴为 X 轴,发射方向为 X 轴方向。点 A, B 为物镜中心,位于坐标系 Y 轴, A, B 距坐标原点长度均为 h 。两像机光轴与 X 轴交于点 N 。光轴与 Y 轴夹角为 γ 。 P 为射弹的平面投影点, α 为射弹投影偏航角。

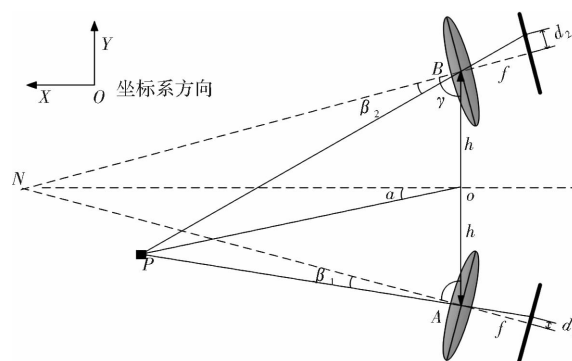


图 2 投影偏差量计算模型

Fig. 2 Calculation model of projection deviation

d_1, d_2 为目标像高, f 为物镜焦距, β_1, β_2 为目标相对像机光轴的偏角。根据三角关系可得:

$$\tan \beta_1 = \frac{d_1}{f} \quad (1)$$

$$\tan \beta_2 = \frac{d_2}{f} \quad (2)$$

依据像机安装位置, $\triangle ABN$ 可被确定, 继而结合(1)式、(2)式可确定 $\triangle ABP$ 。最终可计算得出偏航角, 其计算表达式为

$$\sin \alpha = \frac{OP^2 + h^2 - AP^2}{2 \cdot OP \cdot h} \quad (3)$$

$$AP = [2h \cdot \sin(\gamma - \beta_2)] / \sin[2\gamma + \beta_1 - \beta_2] \quad (4)$$

$$OP = \sqrt{AP^2 + h^2 - 2 \cdot AP \cdot h \cdot \cos(\beta_1 + \gamma)} \quad (5)$$

1.2 像机线性成像模型

在双目像机视觉测量系统中, 每一成像点对应了空间中某一确定坐标点^[4], 要计算这种对应关系, 需建立像机线性成像模型, 通过空间坐标变换并结合像机参数, 最终确定成像点的空间坐标值。该模型中需要定义的坐标系包括: 图像坐标系(o, x, y)、像机坐标系(O_c, X_c, Y_c, Z_c)和发射轴坐标系(O_w, X_w, Y_w, Z_w)^[5]。

图像坐标系(o, x, y)为二维坐标系, 原点 o 定义在像机光轴与 CMOS 像面的交点。定义图像左上角为像素计算起始点, 每一像素在坐标系(o, x, y)上对应物理尺寸为 δ 。若原点 o 的像素为(u_0, v_0), 则图像中任一像素点(u, v)与其在图像坐标系下的坐标(x, y)间的对应关系可表示为

$$u = \frac{x}{\delta} + u_0; v = \frac{y}{\delta} + v_0 \quad (6)$$

用齐次坐标表示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\delta & 0 & u_0 \\ 0 & 1/\delta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

如图3所示,像机坐标系(O_c, X_c, Y_c, Z_c)中一点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 与其像面投影点 $p(x, y)$ 之间关系:

$$x = \frac{f \cdot X_c}{Z_c}; y = \frac{f \cdot Y_c}{Z_c} \quad (8)$$

式中 f 为物镜焦距。

用齐次坐标表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

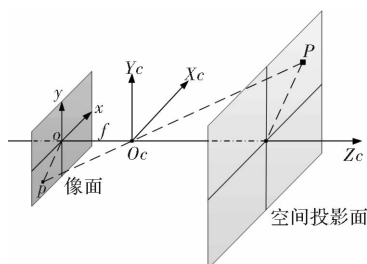


图3 像面坐标空间投影示意图

Fig. 3 Schematic diagram of space projection of image coordinates

像机坐标系(O_c, X_c, Y_c, Z_c)与发射轴坐标系(O_w, X_w, Y_w, Z_w)之间的关系可用旋转矩阵 R 与平移向量 T 来描述^[6]。因此, P 点在发射轴坐标系与像机坐标系下的齐次坐标存在关系式:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_A \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

结合式(7)和式(9),射弹像素点(u, v)与其在发射轴坐标系对应坐标(X_w, Y_w, Z_w)间的转换关系为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\delta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{\delta} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{\delta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_B M_A X_w \quad (11)$$

式中: T 为像机坐标系原点在发射轴坐标系各坐标轴上的平移参数; R 为绕发射轴坐标系旋转参数, 绕 X_w, Y_w, Z_w 轴分别旋转 α, β, γ , 得到:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

至此,我们得到了射弹图像像素点到其在发射轴坐标系坐标的变换方程,并可解算出空间点 P 坐标(X_w, Y_w, Z_w)。

1.3 偏航角计算

如图4所示,发射轴坐标系(O_w, X_w, Y_w, Z_w)中,点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 与 O_w 连线即发射轨迹线,轨迹线在 $X_w O_w Z_w$ 面上的投影线与 Z 轴夹角为所求 X 向偏角,记为 γ_x ,其余弦值可表示为

$$\cos\gamma_x = \frac{Z_w}{\sqrt{X_w^2 + Z_w^2}} = \frac{1}{\sqrt{(X_w/Z_w)^2 + 1}} \quad (13)$$

同理可得轨迹在 Y 向的偏航角为

$$\cos\gamma_y = \frac{Z_w}{\sqrt{Y_w^2 + Z_w^2}} = \frac{1}{\sqrt{(Y_w/Z_w)^2 + 1}} \quad (14)$$

由此,根据双目像机同时获得的2幅图像解出两向偏角。

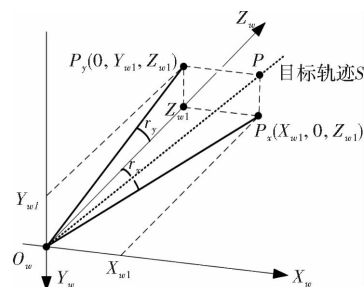


图4 发射轴坐标系内偏航角计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of yaw angle calculation in launch axis coordinate system

2 光学系统误差分析

由上节论述可以知,像机参数的变化影响其采集目标的物像关系,并最终影响偏航角提取精度。因此,对像机参数,特别是光学系统误差的分析对提高偏航角提取精度有着重要意义。光学系统误差主要包含光学系统畸变和光学系统综合相差。

2.1 光学系统畸变

在实际应用中,光学系统畸变是测量的重要误差源^[7],必须提取畸变系数并修正镜头畸变以抵消该误差。无像差像点坐标 \bar{x}_1, \bar{y}_1 可表达为

$$\bar{x}_1 = x + \delta_x(x, y), \bar{y}_1 = y + \delta_y(x, y) \quad (15)$$

式中: x, y 为实际图像点坐标; $\delta_x(x, y), \delta_y(x, y)$ 为像差带来的非线性畸变值。在图像中不同的位置其畸变程度不同,可表示为

$$\begin{aligned} \delta_x(x, y) &= k_1 x(x^2 + y^2) + (p_1(3x^2 + y^2) + \\ &\quad 2p_2 xy) + s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_y(x, y) &= k_2 x(x^2 + y^2) + (p_2(3x^2 + y^2) + \\ &\quad 2p_1 xy) + s_2(x^2 + y^2) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: k 代表径向畸变系数; p 代表偏心畸变系数; s 代表薄棱镜畸变系数。对于本方法中使用的非广角的小视场近轴系统,偏心畸变与薄棱镜畸变影响微弱^[8], (16)式可简化为

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x(1 + k_1 r^2) \\ \bar{y} &= y(1 + k_2 r^2) \end{aligned} \quad (17)$$

通过合理的光学系统设计,可将(17)式中 k_1 和 k_2 缩小到0.2%以内。软件仿真的畸变曲线如图5所示,表明各色光全视场畸变均小于0.14%。以光学系统视场为18'(10.47 mrad),对应带来的测角误差计算如下式:

$$\begin{aligned} \Delta_d &= \arctan(d \cdot \tan \omega) = \arctan(0.14\% \cdot \\ &\quad \tan 0.01) \approx 2.9'' \approx 14.02 \mu\text{rad} \end{aligned} \quad (18)$$

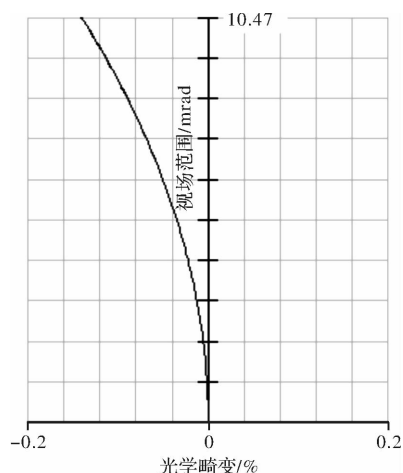


图5 畸变曲线仿真

Fig.5 Simulation diagram of distortion curve

2.2 光学系统综合像差

光学系统综合像差包含慧差、像散及场曲等^[9]。通过合理光学设计可有效减小光学系统各

种像差对成像质量的影响。利用软件对像机光学系统进行分析,图6显示了在工作温度为+60℃,测量距离为64 m时,光学系统弥散斑分布情况。光学系统综合像差引起的弥散斑最大半径 $R_{rms} = 5.565 \mu\text{m}$ 。

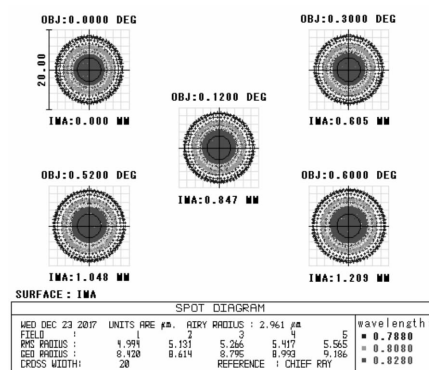


图6 光学系统弥散斑分布

Fig.6 Distribution of diffuse spots in optical system

弥散斑将影响质心提取算法精度,从而造成系统测量误差。标准弥散斑对质心提取误差范围 $<10\%R_{rms}$,即 $0.57 \mu\text{m}$,当光学系统焦距 $f = 148.5 \text{ mm}$ 时,最大测量误差为

$$\begin{aligned} \Delta_T &= \arctan\left(\frac{0.1R_{rms}}{1000 \times f'}\right) = \\ &\quad \arctan\left(\frac{0.1 \times 5.565}{1000 \times 154}\right) \times \frac{180}{\pi} \approx \\ &\quad 0.7'' \approx 3.39 \mu\text{rad} \end{aligned} \quad (19)$$

综合以上两点,光学系统引起综合最大测量误差^[10]:

$$\delta = \sqrt{\Delta_d^2 + \Delta_T^2} \approx 2.98'' \approx 14.5 \mu\text{rad} \quad (20)$$

3 实验与验证

偏航角测量装置实验布局如图7所示,双目相机对称安装于发射轴两侧,距发射轴水平距离为0.8 m。射弹收集靶板距离发射管出口45 m,用于测算实际着弹点与发射基准轴投影点间的位置关系^[11]。标校靶板距离发射管出口35 m,用于校准发射基准轴投影点与双目像机成像中心处于同一位置^[12],如图8所示。

电磁轨道发射装置启动同时,利用同步信号触发高速像机工作,如图9所示,实现了对高速射弹的捕获,图中亮斑即为射弹。

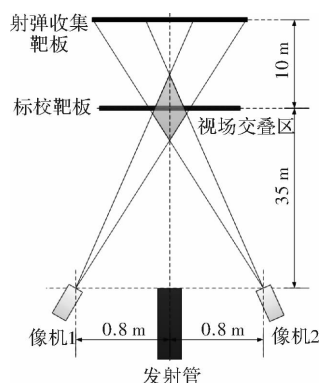


图7 实验布局示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experiment layout

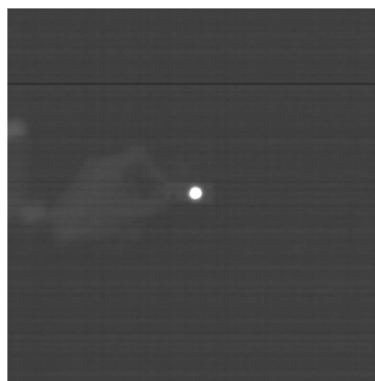


图8 投影中心成像图

Fig. 8 Image of projection center

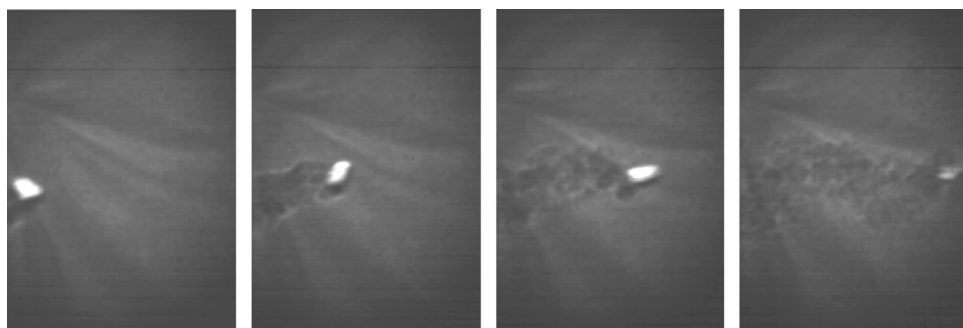


图9 射弹动态飞行轨迹

Fig. 9 Flight path of projectile

本次实验共进行4次发射,对收集靶板位置处着弹点进行测量,得到4次着弹点位置坐标。根据收集靶板距发射口位置可计算出4次发射的偏航角分别为

$$\begin{aligned}\tan\theta_{1x} &= 0.226/45, \theta_{1x} = 5.02 \text{ mrad} \\ \tan\theta_{1y} &= 0.282/45, \theta_{1y} = 6.27 \text{ mrad}\end{aligned}\quad (21)$$

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \sqrt{\theta_{1x}^2 + \theta_{1y}^2} = 8.03 \text{ mrad} \\ \tan\theta_{2x} &= 0.251/45, \theta_{2x} = 5.58 \text{ mrad} \\ \tan\theta_{2y} &= 0.267/45, \theta_{2y} = 5.93 \text{ mrad}\end{aligned}\quad (22)$$

$$\theta_2 = \sqrt{\theta_{2x}^2 + \theta_{2y}^2} = 8.14 \text{ mrad}$$

$$\begin{aligned}\tan\theta_{3x} &= 0.205/45, \theta_{3x} = 4.56 \text{ mrad} \\ \tan\theta_{3y} &= 0.291/45, \theta_{3y} = 6.47 \text{ mrad}\end{aligned}\quad (23)$$

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \sqrt{\theta_{3x}^2 + \theta_{3y}^2} = 7.91 \text{ mrad} \\ \tan\theta_{4x} &= 0.229/45, \theta_{4x} = 5.09 \text{ mrad} \\ \tan\theta_{4y} &= 0.313/45, \theta_{4y} = 6.96 \text{ mrad}\end{aligned}\quad (24)$$

$$\theta_4 = \sqrt{\theta_{4x}^2 + \theta_{4y}^2} = 8.62 \text{ mrad}$$

双目像机帧频 1 123 f/s, 焦距 $f=148.5 \text{ mm}$, 目标速度约 1.5 km/s, 通过相机线性模型对数据进行分析, 计算得到4次实验的偏航角, 与实际测量值对比如表1。

表1 测量数据对比

Table 1 Comparison of measured data

实验序号	收集靶实测值			像机测算值	偏差量/mrad
	X/cm	Y/cm	偏航角/mrad	偏航角/mrad	
1	22.6	28.2	8.03	8.71	0.68
2	25.1	26.7	8.14	8.69	0.55
3	20.5	29.1	7.91	8.58	0.67
4	22.9	31.3	8.62	9.03	0.41

本次实验实现了射弹图像的抓取, 给出了偏航角计算值。计算结果与实际着弹点测量法给出的结果具有较强的一致性, 平均偏差量为

0.58 mrad, 证明了该测算方法的可行性。偏差量的产生归因于多种因素, 从射弹发射方面考虑, 由于射弹受重力加速度及空气阻力等因素影

响,加之射向基准轴标校存在一定误差,其飞行轨迹与理论计算轨迹存在一定偏差。从测算方法考虑,发射期间的冲击振动、射弹出膛弧光以及飞行过程中的翻转等因素均会对测量精度造成不同程度的影响。在后期工作中,需进一步完善误差模型分析,并结合多次实验数据,逐步提高测量精度。

4 结论

本文提出一种利用双目成像手段实现高速小目标偏航角测量的方法。该方法基于高速像机所采集的二维目标图像,首先构建空间几何坐标系,给出多维度坐标系间的转换方法。然后建立像机线性系统投影模型,实现图像二维坐标向空间点坐标的转换,最终提取出目标飞行偏角。通过分析光学系统参数对测量精度的影响,得出其理论误差约为 $14.5 \mu\text{rad}$ 。为了验证本文提出方法的可行性,搭建了基于双目视觉的偏航角测量实验装置,实验表明:该方法能够实时解算射弹偏航角,测量偏差平均值约为 0.58 mrad 。本文方法已成功应用于电磁轨道发射装置的射向标校系统,为电磁轨道发射装置实现高精度打击提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-6.
马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-6.
- [2] WANG Tieling, AN Ying, LIU Qunhua, et al. Measuring fire accuracy with fiber coding [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 30(11): 1401-1405.
王铁岭, 安莹, 刘群华, 等. 光纤编码武器射击命中精度测试系统[J]. 光子学报, 2011, 30(11): 1401-1405.
- [3] ASADA M, TANAKA T, HOSODA K. Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual serving[C]. US: IEEE, 2002.
- [4] LI Jing, WANG Wei, ZHANG Maojun. 3D reconstruction method combined by binocular stereoscopic vision and coded-structured light[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(S2): 154-158.
李靖, 王炜, 张茂军. 双目立体视觉和编码结构光相结合的三维重建方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(增刊2): 154-158.
- [5] LIU Yong, CHEN Xiaojun, YIN qing, et al. Applications of three-dimensional coordinate transform in space device's geometry measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S1): 147-150.
刘勇, 陈晓军, 殷晴, 等. 三维坐标变换在航天器机械测试中的应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊1): 147-150.
- [6] HAN Yanxiang, ZHANG Zhisheng, DAI Min. Monocular vision system for distance measurement based on feature points[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1110-1117.
韩延祥, 张志胜, 戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1110-1117.
- [7] LI Chunyan, WANG Li, LU Xin, et al. A binocular stereo camera calibration method[J]. Aerospace Control and Application, 2010, 36(3): 51-54.
李春艳, 王立, 卢欣, 等. 一种双目立体视觉相机标定方法[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(3): 51-54.
- [8] QIU Maolin, MA Songde, LI Yi. Overview of camera calibration for computer vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43-55.
邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
- [9] TU Yuaning, WANG Xiang. Polarization aberration compensation method for lithographic projection lens based on a linear model[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622002.
涂远莹, 王向. 一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622002.
- [10] WANG Huihui. Error theory and measurement adjustment [M]. 1st ed. Shanghai: Tongji University Press, 2010.
王穗辉. 误差理论与测量平差[M]. 第一版. 上海: 同济大学出版社, 2010.
- [11] HU ZhanYi, WU Fuchao. A Review on some active vision based camera calibration techniques [J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(11): 1149-1156.
胡占义, 吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1149-1156.
- [12] MA Shibang, YANG Hong, YANG Zhaojin, 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.