

文章编号:1001-5078(2024)11-1737-07

· 光电技术与系统 ·

二维大角度快反镜双线性插值拟合标定法

冀佳琦, 刘洋

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要:为满足光电对抗设备中大转角范围的需求,对基于电涡流传感器的二维大角度快速反射镜角度测量系统的标定技术进行研究。设计了二维大角度快速反射镜标定系统,分析了标定系统的角度测量原理,通过对多项式拟合和双线性插值标定模型进行理论和残差分析,结合两种方法进行模型构建和实验测试。结果表明,在 $\pm 7^\circ$ ($\pm 25200''$)角度范围内,运用双线性插值拟合法整体误差小于 $30''$ 。通过与传统多项式拟合和双线性插值比对实验,表明双线性插值拟合法标定误差更小,定位精度更高,更适用于二维大角度快速反射镜标定。

关键词:快速反射镜;二维大角度;双线性插值拟合;电涡流传感器;标定技术

中图分类号:TN202;TN97 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.014

Bilinear interpolation fitting calibration of two-dimensional large angle fast steering mirror

Ji Jia-qi, Liu Yang

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to meet the demand of large turning angle range in optoelectronic countermeasure equipment, the calibration technology of two-dimensional large-angle fast steering mirror angle measurement system based on eddy current sensors is investigated, and the two-dimensional large-angle fast steering mirror calibration system is designed. The angular measurement principle of the calibration system is analyzed, and model construction and experimental testing are carried out by combining the two methods through theoretical and residual analyses of polynomial fitting and bilinear interpolation calibration models. The results show that the overall error of applying the bilinear interpolation fitting method is less than $30''$ in the angular range of $\pm 7^\circ$ ($\pm 25200''$). Comparison experiments with the traditional polynomial fitting and bilinear interpolation show that the bilinear interpolation fitting method has a smaller calibration error, higher localization accuracy, and is more suitable for two-dimensional large-angle fast reflector calibration.

Keywords: FSM; 2D large angle; bilinear interpolation fitting; eddy current sensors; calibration techniques

1 引言

在光电侦查对抗系统中^[1],快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM, 快反镜)作为十分关键的伺服

执行单元,是一种工作在光源和接收器之间的装置,主要通过对光束精密控制,从而实现稳瞄、稳像、精密指向等功能^[2-5]。角度测量系统作为FSM系统

基金项目:光电信息控制和安全技术重点实验室资助项目(No. 202105509)资助。

作者简介:冀佳琦(1997-),女,满族,硕士研究生,主要研究方向为光电探测技术。E-mail: jiaqiji2022@163.com

通讯作者:刘洋(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向为光电探测技术。E-mail: 20141891@bistu.edu.cn

收稿日期:2023-12-26

的闭环控制反馈核心,其量程、分辨率、重复性及线性度等参数直接决定了系统整体性能。随着光电侦查对抗装备的简化结构和缩小体积重量的需求,大角度 FSM 替代框架、转台等指向机构的方案被提出,其工作角度范围由角秒级提升到 5° 级别以上,从而在驱动、测量、结构等多个关键技术方面提出了新的挑战。

目前 FSM 由于采用柔性铰链等共枢转式结构,因此通常采用电涡流传感器^[6],通过测量与被测量面之间的距离实现转角的高精度测量^[7]。在角度转动范围较小的时候线性度较好,通过标定和数据处理后可获得较高的测量精度^[8];但随着 FSM 角度转动范围增大,当角度扩大到超过 3° 级别时,其拟合结果的线性度及精度均无法满足使用需求,呈现的二维非线性度已经严重影响标定结果。

传统 FSM 的标定方法一般采用拟合法^[7]。于鹏采用的分段式拟合法实现对电涡流传感器的标定,但是分段选取困难且会产生较大误差^[9];刘学、邢海斌等人采用曲线拟合、分段标定拟合等方法对 FSM 系统标定参数进行拟合修正,但对于测角范围超过 3° 以上的二维 FSM 系统来说,随着测量量程的增大,电涡流传感器的非线性度也会增加,采用其标定的误差均不理想^[10-11]。由此可见,对于大转角范围 FSM 标定技术的研究以提高大角度定位精度具有十分重要的意义。

论文描述了一种基于 $\pm 7^\circ (\pm 25\ 200'')$ 的二维大角度 FSM 的标定方法,分析了二维大角度 FSM 的测量原理,并对多项式拟合和双线性插值法进行残差分析,在此基础上运用双线性插值拟合法进行标定,并进行实验验证。

2 二维大角度快反镜角度测量

二维大角度 FSM 系统主要由反射镜、驱动元件、角度测量元件等组成^[12]。FSM 系统的 X 、 Y 两轴垂直分布,驱动元件为音圈电机,角度测量元件为电涡流传感器^[13]。

二维大角度 FSM 采用两轴四驱动器,其驱动元件为四个音圈电机,位置呈正交分布,采用两两推拉的方式进行控制^[14]。为精确测量 FSM 的运动角度,将四个电涡流传感器的分别放置在四个音圈电机位置的对称线上,如图 1(a)所示,其与旋转轴呈 45° ,使其连接线形成一个米字^[15]。为了获得二维大角度 FSM 在 X 轴和 Y 轴上的运动角度,需要对对称线上的两个电涡流传感器的数值进行差分运算,如图 1(b)所示为 FSM 单轴方向上的截面。

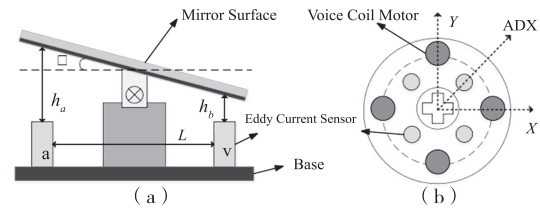


图 1 电涡流传感器安装示意图

Fig. 1 Installation diagram of eddy current sensor

如图 1 所示音圈电机运动轴线与电涡流传感器之间的夹角为 45° ,音圈电机 X 轴正向出力的大小 \vec{F} ,电涡流传感器 ADX 轴正向读数 \vec{S} , λ 为固定值,其关系如公式:

$$\vec{F} = \lambda \cos 45^\circ \vec{S} \quad (1)$$

通过电涡流传感器的位移非接触测量的原理,传感器线圈阻抗 Z 与电导率 σ 、磁导率 μ 、激磁电流频率 f 以及探测间距 h 如公式^[16]所示:

$$Z = F(\sigma, \mu, f, h) \quad (2)$$

阻抗的变化通过电涡流内置处理转换成电压输出,输出信号的大小随探头到被测表面之间的间距而变化,由麦克斯韦尔公式,可求得此函数为非线性关系式,其曲线为“S”形曲线,在一定范围内可以近似为一线性函数^[16-17],可见,当 σ, μ, f 参数保持不变时,线性范围内电涡流传感器的输出电压 U 是探测间距 h 的单值函数,超出一定范围时,其就是非线性的关系。在实际应用中,通常选取非线性曲线中近似线性的一段来进行分析和处理。

在 ADX 轴上线性范围内将电压 U 转换为输出 AD 信号值 S_{AD} ,探测间距 h 与 S_{AD} 的关系可表示为:

$$h = g(S_{AD}) \quad (3)$$

FSM 在 ADX 轴方向上做角度 α 摆动时,电涡流传感器 a 和电涡流传感器 b 与反射镜表面的距离分别为 h_a 和 h_b ,电涡流传感器的读数值为 S_{AD} ,由公式(4)~(6)传感器测量的位移变化量转换为 FSM 的角度变化量^[14]:

$$h_a - h_b = G(S_{AD}) \quad (4)$$

$$\tan \alpha = \frac{h_a - h_b}{L} \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan \frac{h_a - h_b}{L} = \arctan \frac{G(S_{AD})}{L} \quad (6)$$

电涡流传感器与运动轴线呈 45° 夹角, α 分解在 X 和 Y 轴方向上的转动角度 α_x 和 α_y 与电涡流传感器的读数值 S_{AD} 关系为:

$$\alpha_x = \cos 45^\circ \cdot \arctan \frac{G(S_{AD})}{L} \quad (7)$$

$$\alpha_y = \sin 45^\circ \cdot \arctan \frac{G(S_{AD})}{L} \quad (8)$$

进行标定时,FSM 在 X 和 Y 轴方向上角度值 ΔX 和 ΔY , 其中二维 FSM 在 X 和 Y 轴的电涡流变化量为 S_x 、 S_y , FSM 在 X 和 Y 轴的系数 k_x 和 k_y , 目前常用的测量公式如下:

$$\Delta X = k_x \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & \sin 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Delta Y = k_y \begin{bmatrix} -\sin 45^\circ & 0 \\ 0 & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

如公式(7)~(10)所示,FSM 的角度值和电涡流传感器的读数值是非线性的关系,转动角度不超过 1° 时,常采用线性逼近的方法, $\arctan \alpha \approx \alpha$, 此时 α 与 S_{AD} 呈现线性关系,当驱动器带动反射镜转动的角度超过到一定程度时,其非线性度会逐渐增加,此时再采用线性逼近法将会产生很大的误差。且电涡流探头与反射镜表面的距离会发生变化,远端电涡流探头会因为探测距离过远而出现无法响应的情况,导致 FSM 的角度变化量 α 和电涡流传感器测量的位移变化量不再是线性关系,进而导致测量结果的非线性度增大。

FSM 转动角度随电涡流传感器读数 AD 值的变化曲线图如图 2 所示,FSM 转动角度不超过 1° 时呈现线性关系,随着 FSM 转动角度的增大呈现非线性关系。

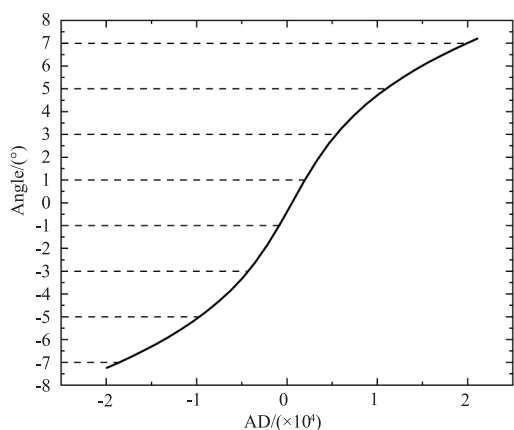


图 2 角度随 AD 变化曲线图

Fig.2 Angle variation curve with AD

3 二维大角度快反镜角度标定

二维大角度 FSM 属于高精度仪器,在正式测量前需要进行角度标定,标定是在测量过程中对 FSM 的精度及时进行误差消除和复核的动态过程。FSM

标定实质就是明确反射镜运动角度和电涡流传感器读数之间的对应关系^[18-19]。由于二维大角度标定的非线性问题,传统的标定方法并不完全适用,需要对标定系统进行设计。

二维大角度 FSM 的转动范围 ($\pm 7^\circ$) 远超光自准直仪的测量范围 ($\pm 2.5^\circ$),无法使用传统的标定方法进行测量,需要结合转台来实现系统标定。如图 3 所示通过高精度二维转台与光自准直仪相配合,通过分区采样的方式完成 $\pm 7^\circ$ 范围的角度标定。

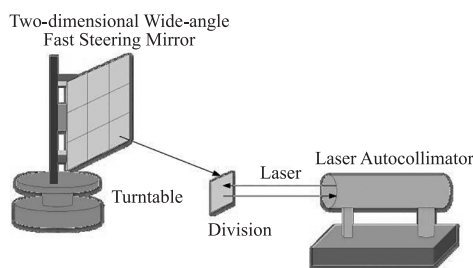


图 3 分区标定示意图

Fig.3 Partition calibration diagram

3.1 多项式拟合

一般 FSM 系统的标定方法为多项式拟合法^[11]。通常对电涡流传感器采用多项式拟合法来进行非线性标定,多项式拟合法一般有直线拟合法和曲线拟合法,由于直线拟合法的非线性误差值很大,因此大多采用曲线拟合法。为了使误差的平方和最小,利用 N 次多项式和最小二乘法来计算,在已知电涡流传感器的输入输出关系的情况下^[10],采用三阶多项式拟合法,将电涡流传感器两个方向轴的 AD 值数据与对应运动轴上的 FSM 角度数据导入到 MAYLAB 中,运用其自带的曲线拟合工具箱分别对 X 和 Y 轴角度值进行数据拟合,如公式(11)和(12)所示,可以得到两个方向轴对应的 3 阶多项式关系^[19], p_{ij} 和 q_{ij} 分别为 X 轴和 Y 轴多项式系数, $f_x(x,y)$ 和 $f_y(x,y)$ 分别为 X 轴和 Y 轴的拟合多项式。

$$f_x(x,y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 p_{ij} x^i y^j \quad (11)$$

$$f_y(x,y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 q_{ij} x^i y^j \quad (12)$$

均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 是用于衡量测量精度的指标,其可以衡量拟合值和真实数据之间的偏差程度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f(x_i) - g(x_i)]^2} \quad (13)$$

其中, n 代表样本数量; $f(x_i)$ 为拟合值; $g(x_i)$ 为采样值; $RMSE$ 越小代表预测的模型越准确, 其拟合效果越好。使用 3 阶多项式拟合法对二维大角度 FSM 单轴方向上对 $\pm 7^\circ$ 整个量程范围内进行仿真拟合的残差图如图 4 所示, ADX 和 ADY 分别是 FSM 在 X 和 Y 轴的电涡流传感器的读数, AGX 为 FSM 在 X 的偏转角度值, 如图 4(a) 所示, AGY 为 FSM 在 Y 轴的偏转角度值, 如图 4(b) 所示。

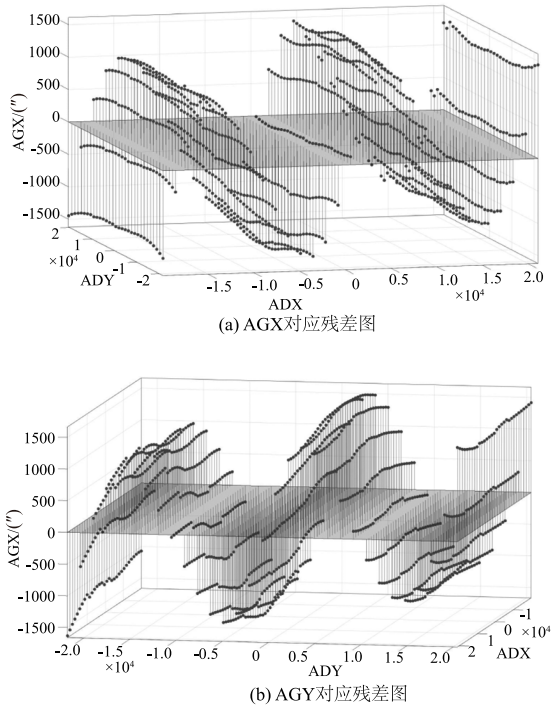


图 4 多项式拟合残差图

Fig. 4 Polynomial fitting residual plot

图 4 可以说明仿真拟合预测值与实际值之间的残差, 使用 3 阶多项式拟合法的 X 轴和 Y 轴角度数据 $RMSE$ 值分别为 $920.8233''$ 和 $947.717''$; 对数据进行分析, 二维大角度 FSM 在 X 轴和 Y 轴上的角度变化量的最大残差值为 $1773.2''$ 和 $1827.9''$, 远超出系统重复定位精度的数量级, 异方差性极不稳定, 因此使用多项式拟合法进行大角度测量标定的数据残差极大。

3.2 双线性插值

FSM 系统获取的采样点数据为二维离散数据, 可以采用双线性插值法来进行计算, 且此方法适用于线性系统和非线性系统。

双线性插值法是两个单轴方向上线性插值的叠加, 分别沿着 X 轴和 Y 轴做一次线性插值, 进而得出插值点的坐标值。对于 $P_{11} = (x_1, y_1)$, $P_{22} = (x_2, y_2)$, $P_{33} = (x_3, y_3)$, $P_{44} = (x_4, y_4)$ 四点的坐

标, 设 $P_1 = (x, y_5)$, $P_2 = (x, y_6)$, 首先通过已知四点在 X 轴方向上进行线性插值, 可得出如下^[19]:

$$f(P_1) = \frac{x_3 - x}{x_3 - x_1}f(P_{11}) + \frac{x - x_1}{x_3 - x_1}f(P_{33}) \quad (14)$$

$$f(P_2) = \frac{x_4 - x}{x_4 - x_2}f(P_{22}) + \frac{x - x_2}{x_4 - x_2}f(P_{44}) \quad (15)$$

$$f(P) = \frac{y_6 - y}{y_6 - y_5}f(P_1) + \frac{y - y_5}{y_6 - y_5}f(P_2) \quad (16)$$

这样可以得到插值点坐标:

$$f(x, y) = \frac{(y_6 - y)(x_3 - x)}{(y_6 - y_5)(x_3 - x_1)}f(P_{11}) + \frac{(y_6 - y)(x - x_1)}{(y_6 - y_5)(x_3 - x_1)}f(P_{33}) + \frac{(y - y_5)(x_4 - x)}{(y_6 - y_5)(x_4 - x_2)}f(P_{22}) + \frac{(y - y_5)(x - x_2)}{(y_6 - y_5)(x_4 - x_2)}f(P_{44}) \quad (17)$$

使用双线性插值法对二维大角度 FSM 单轴方向上对 $\pm 7^\circ$ 整个量程范围内进行仿真拟合的残差图如图 5 所示, ADX 和 ADY 分别是 FSM 在 X 和 Y 轴的电涡流传感器的读数, AGX 为 FSM 在 X 轴的偏转角度值, 如图 5(a) 所示, AGY 为 FSM 在 Y 轴的偏转角度值, 如图 5(b) 所示。

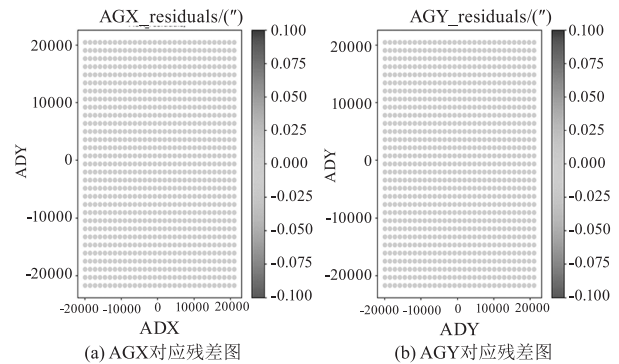


图 5 双线性插值残差图

Fig. 5 Bilinear interpolation residual plot

使用双线性插值进行仿真的残差值近似为 0, 这是由于双线性插值法的插值点与邻近 4 个真实二维离散采样点的信息值有关^[19], 其仿真插值曲面会经过真实采样点, 再用采样 ADX 和 ADY 去进行匹配时的数据就是原始采样点数据, 但当二维大角度 FSM 的角度增大时, 其偏转角度会超出标定设备的测量范围, 此时插值点的数据就会出现较大误差进而影响 FSM 的指向精度。

4 实验测试与分析

4.1 模型构建

在大角度测量中随着角度的增大, 多项式拟合法的恒定误差和线性误差, 会导致标定精度降低; 双线性插值法在插值过程中可能引入插值误差, 且在

某些情况下无法准确再现角度与电涡流信号值之间的关系。两种方法均存在误差。针对这一问题,构建了一个针对二维大角度 FSM 的标定数学模型,该模型将多项式拟合法与双线性插值技术相结合。通过对比 X 轴和 Y 轴的 AD 值以及二维大角度 FSM 的运动角度值,对多项式拟合曲线进行优化,以提高边缘数据的处理精度。假设二维大角度 FSM 的运动范围为 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$, 其中 θ_{\max} 为反射镜的最大偏转角度。用 x 和 y 表示反射镜在 X 轴和 Y 轴上的运动位置, θ 表示反射镜的运动角度。

(1) 数据采集

在 $[-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$ 范围内, 等间隔地分区采集数据点。设采集到的数据点为 (x_i, y_i, θ_i) , 其中 i 表示数据点的序号。

(2) 处理反射镜采集不到的数据

针对四个角的数据采集问题, 先计算已采集到的附近数据点的和, 记为 S 。设目标位置的数据点为 (x_i, y_i) , 则有:

$$\theta_i = \frac{S}{NM} \tag{18}$$

其中, N 和 M 分别为已采集到的附近数据点的数量。

(3) 多项式拟合法

对于采集不到的边缘数据点 (x_i, y_i, θ_i) , 采用多项式拟合法进行处理, 以提高后续数据精度。假设多项式拟合函数为:

$$\theta = a_0 + a_1 x + a_2 y + \dots + a_{n-1} x^m + a_n y^m \tag{19}$$

通过最小二乘法求解系数 a_0, a_1, \dots, a_n , 使得拟合函数满足采集到的边缘数据点。

(4) 双线性插值法

运用双线性插值法进行处理, 设数据的坐标为 $(x_{\text{interp}}, y_{\text{interp}})$, 利用双线性插值公式, 计算对应的二维大角度快速反射镜的运动角度值:

$$\theta_{\text{true}} = \text{BilinearInterp}(x_{\text{interp}}, y_{\text{interp}}) \tag{20}$$

该模型构成的系数矩阵如下, 其中 n 为单轴采样点数:

$$\begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & \dots & A_{0(n-2)} & A_{0(n-1)} \\ A_{10} & A_{11} & \dots & A_{1(n-2)} & A_{1(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ A_{(n-2)0} & A_{(n-2)1} & \dots & A_{(n-2)(n-2)} & A_{(n-2)(n-1)} \\ A_{(n-1)0} & A_{(n-1)1} & \dots & A_{(n-1)(n-2)} & A_{(n-1)(n-1)} \end{bmatrix} \tag{21}$$

双线性插值拟合法可以有效解决二维大角度 FSM 由于角度偏转过大, 非线性度增加而造成的标定精度下降的问题, 通过上述数学模型的构建, 可以更精确地对二维大角度 FSM 的偏转角度进行标定, 从而提高其应用效果。

4.2 实验测试

为了验证所构建的数学模型的有效性, 在实验室搭建了系统标定平台, 对二维大角度 FSM 进行标定, 实验平台如图 6 所示, 测试范围为 $\pm 26\ 000''$, 此范围包括 $\pm 7^\circ$ ($\pm 25\ 200''$)。

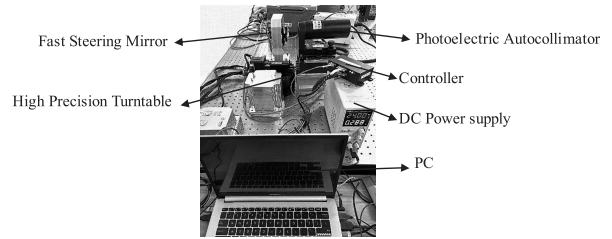


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

首先在 $\pm 26\ 000''$ 范围内进行采样, 记录 31×31 电涡流传感器的 X 和 Y 轴的 AD 值, 及其所对应的二维大角度 FSM 的偏转角度值。采样点示意图如图 7 所示。

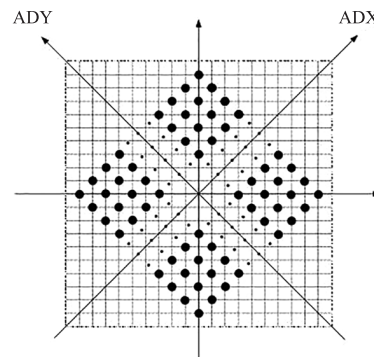


图 7 采样点示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sampling points

由于二维大角度 FSM 的角度较大, 边缘数据和反射镜四个角的数据难以采集, 为此采用多项式拟合法对边缘数据进行处理, 示意图如图 8 所示。

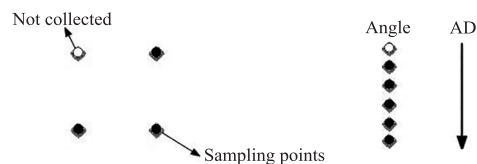


图 8 未采集到的数据示意图

Fig. 8 Schematic diagram of data not collected

4.3 结果分析

在实验测试过程中, 控制二维大角度 FSM 指定目标角度, 并与光电自准直仪测量出的偏转角度值

进行比对,以测试标定精度。对于多项式拟合,双线性插值及双线性插值拟合法进行精度测试及残差比对分析,如表1所示,Tar X和 Tar Y 分别是 X 和 Y 轴的引导值即目标角度。

通过表1可以分析出,传统多项式拟合标定进行实验测试得出的结果在 $\pm 26000''$ 的范围内最大

误差为 $945.46''$;双线性插值标定得出的最大误差为 $237.81''$;而采用双线性插值拟合法,在 $\pm 26000''$ 的范围内测试误差最大为 $29.24''$,相对于单独使用两种方法来说,误差明显减小。多项式拟合,双线性插值及双线性插值拟合法的残差比对图如图9和图10所示。

表1 三种方法的残差比对

Tab.1 Comparison table of residuals for three methods

Tar X/($''$), Tar Y/($''$)	残差对比/($''$)		
	多项式拟合	双线性插值	多项式 + 双线性插值
(-12000,12000)	(116.83, -247.92)	(185.60, -171.83)	(12.38, -18.29)
(-16000,16000)	(574.87, -733.41)	(163.70, -189.26)	(17.98, -17.04)
(-18000, -18000)	(794.02,853.12)	(151.70,123.69)	(-12.34,26.72)
(14000,14000)	(-636.12,387.38)	(-181.54, -174.8)	(-19.27,9.54)
(18000, -18000)	(-869.15,639.04)	(-184.43,115.9)	(-26.45,24.33)
(22000,22000)	(-534.82, -875.37)	(-179.93, -188.33)	(13.08, -16.74)
(26000,26000)	(-945.46, -606.27)	(-205.06, -237.81)	(29.24, -27.41)
(26000,0)	(-727.12,65.99)	(208.38,183.78)	(-29.06,25.18)
(-26000,0)	(794.29,395.31)	(202.00,203.94)	(28.01,26.13)
(0, -26000)	(-459.03,756.18)	(-182.19,197.73)	(-6.21,27.09)
(0,26000)	(134.17, -856.01)	(-148.08, -205.26)	(1.87, -27.20)

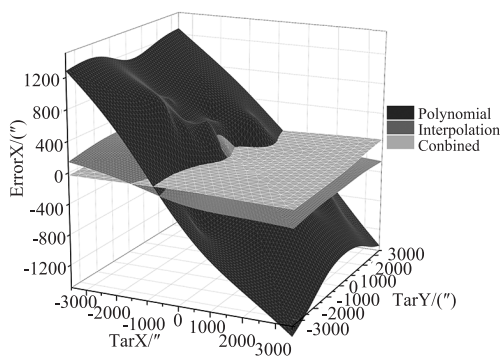


图9 三种方法 AGX 残差图对比

Fig.9 Plots of AGX residual comparisons for the three methods

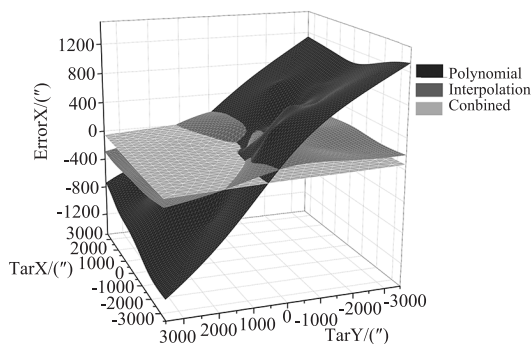


图10 三种方法 AGY 残差图对比

Fig.10 Plots of AGY residual comparisons for the three methods

通过观察图9和图10对比多项式拟合、双线性插值以及双线性插值拟合法三种方法在不同角度下

的残差情况可以清晰地展示出,当引导值超出一定范围时,多项式拟合法的残差值变得无法估计。这可能是由于多项式拟合法在大角度变化时的拟合精度不足,导致标定结果的准确性下降。采用双线性插值法可以减小残差,但对于大角度测量的精度依旧不够。然而,采用双线性插值拟合法在各个角度上都表现出更小的残差且整体残差相对稳定,标定精度更高。这表明,该方法在 $\pm 26000''$ 的角度范围内均适用,在大角度测量中标定数据更稳定,具有更好准确性,其整体误差小于 $30''$ 。

5 结论

根据二维大角度 FSM 的跟踪精度要求,通过对二维大角度 FSM 测量原理的分析,发现随着 FSM 角度的增大,电涡流探头与反射镜表面发生变化,进而导致测量结果的非线性度增大。为了解决该问题,提出了一种双线性插值拟合法的数学模型,并对基于电涡流传感器的音圈电机二维大角度快速反射镜在 $\pm 7^\circ$ ($\pm 25200''$) 运动范围内进行标定,测试结果表明,在 $\pm 26000''$ 的角度范围内,相对于传统的标定方法,使用双线性插值拟合法标定得到的最大测试误差不超过 $30''$,并且在各个角度上都表现出较小的残差。最终结果表明,双线性插值拟合法

能有效提高二维大角度快速反射镜的线性度、定位精度和准确性,能更好地满足大角度范围测量需求,提高设备的性能。

参考文献:

- [1] Li Chaolong, Dai Heng, Chen Yuhua. Research on photoelectric countermeasure technology and anti-unmanned weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(9): 1035 - 1040. (in Chinese)
李朝龙, 代恒, 陈玉华. 光电对抗技术反无人武器作战问题研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(9): 1035 - 1040.
- [2] Ni Yingxue, San Xiaogang, Gao Shijie, et al. Research of fast steering mirror in laser communication APT system [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(2): 140 - 147. (in Chinese)
倪迎雪, 伞晓刚, 高世杰, 等. 激光通信 APT 系统中快速反射镜研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(2): 140 - 147.
- [3] Xiao R, Xu M, Shao S, et al. Design and wide-bandwidth control of large aperture fast steering mirror with integrated-sensing unit [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 126: 211 - 226.
- [4] Liu Lishuang, Xia Runqiu, Lv Yong, et al. Research situation of fast steer mirror driven by voice coil motor [J]. *Laser Journal*, 2020, 41(9): 1 - 7. (in Chinese)
刘力双, 夏润秋, 吕勇, 等. 音圈电机快速控制反射镜研究现状[J]. *激光杂志*, 2020, 41(9): 1 - 7.
- [5] Wang Zhen, Cheng Xuemin. Research progress and development trend of fast steering mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 373 - 379. (in Chinese)
王震, 程雪岷. 快速反射镜研究现状及未来发展[J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 373 - 379.
- [6] Xu Xinhang, Yang Hongbo, Wang Bing, et al. Research on key technology of fast-steering mirror [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1095 - 1103. (in Chinese)
徐新行, 杨洪波, 王兵等. 快速反射镜关键技术研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(10): 1095 - 1103.
- [7] Dzikowski Leszek, Tytko Grzegorz. Evaluation of the properties of eddy current sensors based on their equivalent parameters [J]. *Sensors*, 2023, 23(6): 3267.
- [8] Qu Z, Zhao Q, Meng Y. Improvement of sensitivity of eddy current sensors for nano-scale thickness measurement of Cu films [J]. *NDT & E International*, 2014, 61: 53 - 56.
- [9] Yu Peng, Xu Yuanyuan. Calibrating the electric eddy sensor by the interpolation method and curve fitting method [J]. *China Measurement Technology*, 2007, 33(1): 139 - 141. (in Chinese)
于鹏, 许媛媛. 利用插值法和曲线拟合法标定电涡流传感器[J]. *中国测试技术*, 2007, 33(1): 139 - 141.
- [10] Liu Xue, Wang Yanlin, Gao Hong, et al. Calibration of high precision eddy current sensor [J]. *Digital Technology and Application*, 2019, 37(1): 80 - 81. (in Chinese)
刘学, 王艳林, 高宏, 等. 高精度电涡流传感器的标定研究[J]. *数字技术与应用*, 2019, 37(1): 80 - 81.
- [11] Xing Haibin, Liu Lishuang, Xia Runqiu, et al. Fast and high-precision electric adjusting mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(6): 949 - 955. (in Chinese)
邢海斌, 刘力双, 夏润秋, 等. 快速高精度电动调整镜研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(6): 949 - 955.
- [12] Zhang Yu, Xu Yongsan, et al. Electromechanical co-simulation technology of fast steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(8): 814 - 821. (in Chinese)
张宇, 许永森, 王福超, 等. 音圈致动快速反射镜机电联合仿真技术[J]. *红外技术*, 2023, 45(8): 814 - 821.
- [13] Feng Shaung. Research on high precision control strategy of fast steering mirror [D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
冯爽. 快速反射镜的高精度控制策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [14] Sun Haijing. Research on driving scheme and control strategy of fast steering mirror [J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2022, 42(12): 65 - 70, 75. (in Chinese)
孙海晶. 快速反射镜驱动方案及控制策略研究[J]. *船电技术*, 2022, 42(12): 65 - 70, 75.
- [15] Lin Junlan. The study of control technologies base and on analog circuits for fast steering mirror [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
林俊兰. 基于模拟电路的快速反射镜控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院, 光电技术研究所, 2015.
- [16] Wang Junping. Research on the widerange eddy current sensor [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002. (in Chinese)
王军平. 大量程电涡流传感器的研制[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- [17] Luo Yan, Lin Meidu. An analysis of the factors which affect the axial displacement [J]. *Proceedings of the CSU - EPSA*, 2002, 14(6): 44 - 48. (in Chinese)
罗彦, 林敏杜. 轴向位移影响因素的分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2002, 14(6): 44 - 48.
- [18] Qu Zilian, Zhao Qian, Meng Yonggang. Improvement of sensitivity of eddy current sensors for nano-scale thickness measurement of Cu films [J]. *NDT & E International*, 2014, 61: 53 - 57.
- [19] Wang Yuxian, Liu Lishuang, Chen Qingshan, et al. Bilinear interpolation calibration technology for fast steering mirror [J]. *Laser Journal*, 2024, 45(1): 54 - 58. (in Chinese)
王宇先, 刘力双, 陈青山, 等. 快速反射镜双线性插值标定技术[J]. *激光杂志*, 2024, 45(1): 54 - 58.