

文章编号: 1005-5630(2015)05-0426-05

基于光学传输矩阵的电动二维转镜 读数修正

崔士宝, 安志勇, 王立秋, 王 莹

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对数字式二维转镜在光学转像时产生的转角值与实际像移不一致的问题, 提出了一种运用光学矩阵修正读数误差的方法。根据二维转台对准读数检测原理建立数学模型, 得出修正后的出射光线的俯仰角及方位角。为了验证上述模型的正确性, 采用高精度经纬仪对修正后的出射光线方向进行校对。经实验对比, 该方法在不提高加工安装精度的情况下修正了二维转镜的读数误差, 其精度达到 4"。

关键词: 光学传输矩阵; 二维转台; 平面反射镜; MATLAB

中图分类号: TH 741 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.010

Reading correction of two-dimensional electric rotating-mirror based on optical transmission matrix

CUI Shibao, AN Zhiyong, WANG Liqiu, WANG Ying

(1. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at correcting the digital two-dimensional rotating-mirror's angle and the actual image motion reading inconsistencies on optical scanning, in this paper reading correction method is proposed based on optical transmission matrix. First of all, according to the principle of two-dimensional turntable alignment readings detection, mathematical model is set up. The corrected pitch angle and azimuth of the emitted light is obtained. In order to verify the model, the emergent light direction for proofreading is revised by using high precision theodolite. In the experiment, this method improves the two-dimensional mirror reading error to 4" without increasing the precision of installation.

Keywords: optical transmission matrix; two-dimensional; plane mirror; MATLAB

引 言

数字式电动二维转台是集光机电为一体的现代化设备, 其广泛应用于跟踪、测量及仿真领域, 是精密仪器不可或缺的组成部分, 对目标位置的描述用俯仰角与方位角来表示。本文的二维转镜是电动二维转台在光学测量上的一种应用。在光学仪器中, 二维转台常用于光学调整和测量^[1], 但是由于二维转镜的

收稿日期: 2015-04-20

作者简介: 崔士宝(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事精密测控技术与仪器方面的研究。E-mail: 1020187656@qq.com

通信作者: 安志勇(1943—), 男, 教授, 主要从事精密测控技术与仪器方面的研究。E-mail: an_zhiyong@126.com

调整特点,出射光线的走动量无法直接通过二维转台俯仰角和方位角给出。光线的在俯仰和方位方向的走动量与二维转台方位和俯仰方位的转动角之间存在系统误差^[2]。本文针对电动二维转台在光学调整中存在的系统误差,利用光学矩阵加以分析,并提出了一种软件修正的方法^[3-4]。

1 数字式精密二维转台读数原理

在反射式平行光管直接测量红外瞄具瞄准基线变化量测量系统中,黑体、靶标、平面镜和抛物面反射镜组成反牛顿式光学系统红外平行光管,如图 1 所示。为测量提供无穷远红外靶标,红外瞄准镜通过平面反射镜观察无穷远靶标^[5-6]。

转台结构示意图如图 2 所示,二维精密转台通过控制平面反射镜完成对光线方向的调整,进而实现对瞄具零位走动量的测量。二维转台包括方位和俯仰两个方向的转动,由于方位和俯仰方向存在耦合,即方位的转动轴方向随着俯仰轴的转动而改变。因此系统中平面反射镜在空间旋转时,入射光线与放射光线后的出射光线不是简单的二倍关系,即光线经二维转镜后,出射光线的方位角与俯仰角无法通过二维转台直接给出,而是与二维转台的俯仰角和方位角存在一定函数关系。

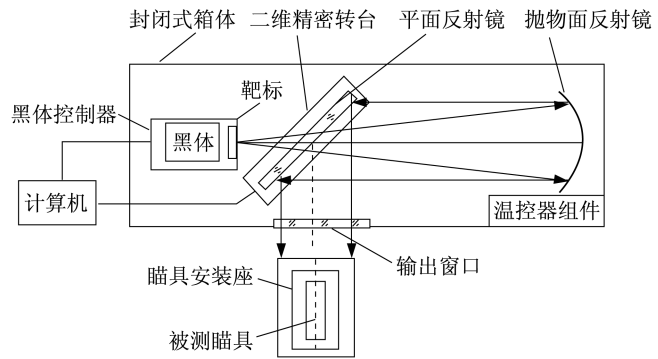


图 1 反射式平行光管测量系统简图

Fig. 1 System of reflection-type collimator

2 出射光线矢量的推导

对于反射式平行光管测量系统,设黑体坐标相对于抛物面反射镜的坐标为 (x, y, z) ,光线经过抛物面反射镜后,设入射至数字式二维精密转台上的平面射镜,此时入射光束方向向量为

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

假使平面反射镜的起始位置垂直于入射光束,则

平面反射镜的法向矢量为 $N_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 。在三维空间中^[7],若光轴与 z 轴重合,则图形绕 x 轴旋转 θ 角时的

坐标变换为式(2),图形绕 z 轴旋转 θ 的坐标变换为式(3)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y\cos\theta - z\sin\theta \\ y\sin\theta + z\cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\cos\theta - y\sin\theta \\ x\sin\theta + y\cos\theta \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3)$$

设顺时针方向为正,平面镜绕其 z 轴旋转 $-\alpha$ 角(即俯仰角),绕其 x 轴旋转 $-\beta$ 角(即方位角)。则两次旋转变换后的平面反射镜的法向单位矢量为

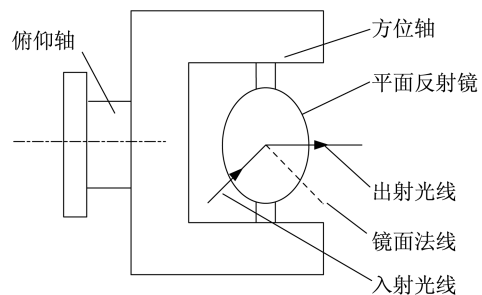


图 2 转台结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of turntable

$$\begin{aligned}
 \mathbf{N}_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{N}_1 \\
 &= \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha & -\sin\beta \\ \sin\beta\sin\alpha & \sin\beta\cos\alpha & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\alpha \\ -\cos\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta \end{pmatrix} \tag{4}
 \end{aligned}$$

对于平面反射镜,其出射光线 A_2 和入射光线 A_1 之间的关系如图 3 所示。

其表达式为

$$A_2 = \mathbf{H}A_1$$

其中 \mathbf{H} 为反射矩阵

$$\mathbf{H} = 1 - 2\mathbf{N}\mathbf{N}^T$$

而 N 为平面反射镜的法线单位向量。当光线经过旋转后的平面镜后,即光线 A_1 经 N_2 反射后的光线 A_2 为

$$A_2 = (1 - 2N_2N_2^T)A_1 \tag{5}$$

此时,将式(1)和式(4)代入式(5)可得

$$A_2 = (1 - 2N_2N_2^T)A_1 = \begin{pmatrix} \sin 2\alpha \cos \beta \\ 1 - 2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \\ -\cos \alpha \sin 2\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{21} \\ A_{22} \\ A_{23} \end{pmatrix} \tag{6}$$

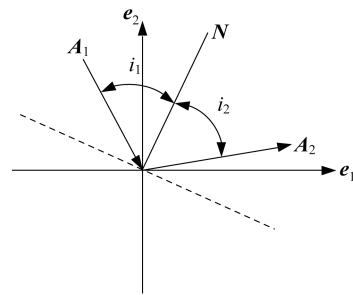


图 3 光线在界面处的反射和折射光路

Fig. 3 Refracted ray at the interface

此时出射的光线将经过两层锗玻璃的红外窗口,而红外窗口由两个平行平镜组成,光束经过平镜只会引起水平(或则铅垂)方向的侧移,而不会改变光线的传输方向,所以最终光线的依然为 A_2 。则此时的线面角,即为转台绕轴旋转后光线的俯仰角 $-\alpha'$ 与方位角 $-\beta'$ 。

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{A_{21}}{1}\right) = \arcsin\left(\frac{\sin 2\alpha \cos \beta}{1}\right)$$

$$\beta' = 180^\circ - \arccos\left(\frac{A_{22}}{1}\right) = 180^\circ - \arccos\left(\frac{1 - 2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta}{1}\right)$$

3 实验及数据分析

3.1 利用 MATLAB 进行数据处理

基于上述推导的公式,利用 MATLAB 软件进行数据处理,以下仅列出当 α 在 $0^\circ \sim 5^\circ$, β 在 $45^\circ \sim 50^\circ$ 范围内变化时,对应修正后的俯仰角 α' 与方位角 β' ,见表 1、表 2。将表 1、表 2 的数据进行图像拟合,见图 4、图 5。光线输出的矢量坐标如表 3 所示。

表 1 修正后的 α' 值

Tab. 1 Modified pitching angle α'

$\alpha/(\circ)$	$\alpha'/(\circ)$					
	45°	46°	47°	48°	49°	50°
0	0	0	0	0	0	0
1	1.414	1.389	1.363	1.338	1.311	1.28
2	2.827	2.777	2.726	2.675	2.623	2.570
3	4.238	4.164	4.087	4.011	3.932	3.853
4	5.648	5.548	5.446	5.343	5.239	5.132
5	7.053	6.928	6.801	6.672	6.542	6.409

表 2 修正后的 β' 值

Tab. 2 Modified pitching angle β'

$\alpha/(\circ)$	$\beta'/(\circ)$					
	45°	46°	47°	48°	49°	50°
0	90	92	94	96	98	100
1	90.017	92.017	94.016	96.017	98.016	100.015
2	90.070	92.067	94.065	96.063	98.061	100.059
3	90.157	92.152	94.146	96.141	98.136	100.132
4	90.279	92.269	94.261	96.251	98.242	100.234
5	90.435	92.420	94.406	96.392	98.379	100.365

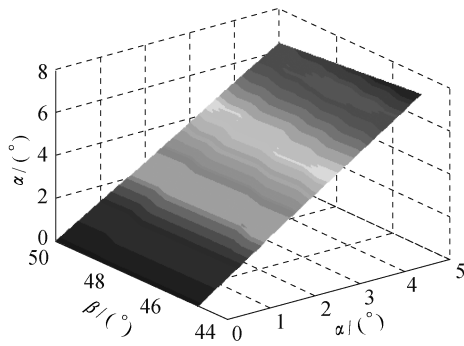


图 4 修正后的俯仰角 α' 拟合图像

Fig. 4 Image of pitching angle α' after fitting

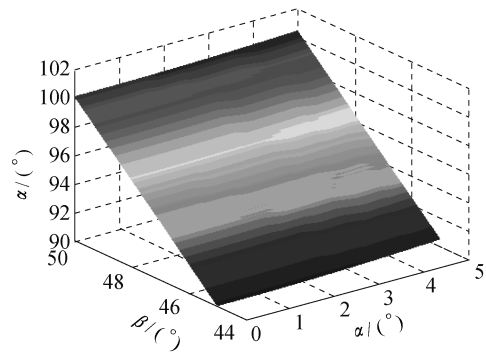


图 5 修正后的方位角 β 拟合图像

Fig. 5 Image of azimuth angle β after fitting

表 3 光线输出矢量坐标

Tab. 3 Vector coordinates of the emergent ray

α	输出光标					
	$\beta=45^\circ$	$\beta=46^\circ$	$\beta=47^\circ$	$\beta=48^\circ$	$\beta=49^\circ$	$\beta=50^\circ$
0°	(0,0,-1)	(0,0.034,-0.999)	(0,0.070,-0.998)	(0,0.104,-0.995)	(0,0.139,-0.990)	(0,0.173,-0.985)
1°	(0.024,0,-0.999)	(0.024,0.035,-0.999)	(0.020,0.070,-0.997)	(0.023,0.104,-0.994)	(0.022,0.139,-0.989)	(0.022,0.173,-0.984)
2°	(0.049,0.001,-0.998)	(0.048,0.036,-0.998)	(0.048,0.071,-0.996)	(0.047,0.106,-0.993)	(0.046,0.140,-0.989)	(0.045,0.175,-0.984)
3°	(0.074,0.003,-0.997)	(0.073,0.038,-0.997)	(0.071,0.072,-0.995)	(0.070,0.107,-0.992)	(0.069,0.142,-0.988)	(0.067,0.176,-0.982)
4°	(0.098,0.005,-0.995)	(0.097,0.040,-0.995)	(0.094,0.074,-0.993)	(0.093,0.109,-0.990)	(0.091,0.143,-0.985)	(0.089,0.178,-0.980)
5°	(0.123,0.008,-0.992)	(0.121,0.042,-0.992)	(0.118,0.077,-0.990)	(0.116,0.111,-0.987)	(0.114,0.146,-0.983)	(0.112,0.180,-0.977)

3.2 验证实验

为了验证上述模型的正确性,本验证实验采用高精度经纬仪对出射光线进行测量,如图 6,得到光线在方位和俯仰方向上的走动量,并与运用光学矩阵推导的数据进行对比,以检测所建立的函数关系的正确性。

调节精密二维调整台的两个轴角到零位,以经纬仪对准设备的十字分划,可知这时的俯仰角和方位角均为零。将经纬仪按照实验规划的空间点的位置在俯仰方位两个方向各转动相应的角度,然后调节精密转台,让设备十字分划与经纬仪再次对准,这样就获得了光线的方位俯仰两个方向上的角度。重复操作十次,将经纬仪的读数与光学模型求出的数进行对比如表 4,可以得出光学模型得出的值与实际测量所得值之间的差值小于 $5''$,与分析计算吻合,并与修改前的读数进行对比,可以得出,对该系统误差进行了修正。

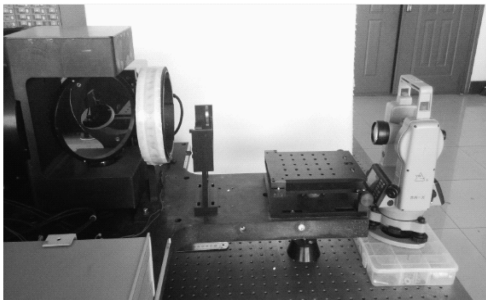


图 6 实验实物图

Fig. 6 Experimental setup

表 4 测量结果对比

Tab. 4 Comparison of results

经纬仪 俯仰角/ $''$	经纬仪 方位角/ $''$	光学模型 俯仰角/ $''$	光学模型 方位角/ $''$
0	216	0	218
-216	0	-216	0
216	216	218	216
432	432	429	433
648	216	649	218
864	432	862	430
-216	432	-214	432
1 080	-432	1 082	-434
1 296	-864	1 296	-862
-1 080	-1 080	-1 076	-1 080

4 结 论

通过上述实验表明,基于光学传输矩阵利用 MATLAB 软件对电动二维转镜的读数进行修正,此方法在不改变转台结构的情况下,在俯仰及方位方向上的测量精度均达到 4",符合轻武器红外瞄具瞄准基线变化量测量系统对二维转镜 5"的精度要求,并对以后的研究及应用提供参考。

参考文献:

[1] 张西龙,孙宝玉,孙建伟,等.高精度二维转台指向误差分析[J].长春工业大学学报(自然科学版),2012,33(4):377-382.

[2] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.

[3] 肖伟,梁久祯,陈玮琪.基于四元数的 3D 物体旋转及运动插值[J].系统仿真学报,2012,24(3):624-627.

[4] 金华,戴金海.坐标变换方法及在卷弧翼弹道仿真中的应用[J].计算机仿真,2007,24(7):43-46.

[5] 王劲松,安志勇,李海兰.反射式平行光管的红外瞄具零位走动量测量方法研究[J].兵工学报,2010,31(11):1421-1425.

[6] 王涛,王劲松,徐翔宇,等.基于欧拉角分析法的电动二维转镜读数修正[J].长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(6):134-137.

[7] 白素平,王春艳,庞春颖.基于坐标变换的动态光学成像性质研究[J].光子学报,2001,20(7):846-850.

(编辑:程爱婕)

=====

(上接第 413 页)

差。这个思路在目前研究鱼镜头的文献报道及专利中都没有得到体现。数值分析结果证实了我们的优化方法是有效的。

参考文献:

[1] 王永仲.鱼镜头光学[M].北京:科学出版社,2006:222-238.

[2] MOORE L B,HVISC A M,SASIAN J. Aberration fields of a combination of plane symmetric systems[J]. Optics Express,2008,16(20):15655-15670.

[3] LU L J. Aberration theory of plane-symmetric grating systems[J]. Journal of Synchrotron Radiation,2008,15(4):399-410.

[4] LU L J,DENG Z Y. Geometric characteristics of aberrations of plane-symmetric optical systems[J]. Applied Optics,2009,48(36):6946-6960.

[5] LU L J,HU X Y,SHENG C Y. Optimization method for ultra-wide angle and panoramic optical systems [J]. Applied Optics,2012,51(17):3776-3786.

[6] 常欢,吕丽军,刘鑫,等.混入逃逸函数的遗传算法优化超大视场光学系统[J].光学仪器,2013,35(4):27-33.

[7] 王泽民,吕丽军.混入逃逸函数的实数编码遗传算法优化光学系统[J].光子学报,2014,43(6):0622001.

[8] MULLER R. Fish eye lens system;USA,4525038[P]. 1985-06-25.

(编辑:程爱婕)