

一种红外引导激光指向双模复合探测技术研究

张冰娜 张 亮 黄庚华 舒 嵘 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术与系统实验室, 上海 200083)

摘要 随着红外光电系统由扫描型发展为凝视型, 搜索范围大大增加, 但仅得到目标的二维信息, 如能与激光主动探测结合, 得到角度-角度-距离的三维信息, 可实现两者优势互补。提出了一种基于压电倾斜镜(PFSM)的具有指向功能的激光主动探测技术, 与凝视型红外相机实现双模复合探测, 对目标进行精密跟踪。对其视场、线性度进行了分析和系统测试, 所得结果与计算结果相符。

关键词 图像处理; 凝视红外成像; 激光主动探测; 压电倾斜镜; 线性度

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0917001

Research on Dual-Mode Hybrid Detection Technology Using Laser to Point Directed by Infrared Camera

Zhang Bingna Zhang Liang Huang Genghua Shu Rong Wang Jianyu

(Laboratory of Space Active Electro-Optical Technology and Systems, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract With the development from scanning mode to staring mode, infrared radiation (IR) optoelectronic system can realize scouting in large field. But it can only get the two-dimensional information of target. If combined with laser active detection, three-dimensional information of angle-angle-distance can be got, which are mutually complementary. A laser active detection technology with pointed function based on two-dimensional piezoelectric fast-steering mirror (PFSM) is proposed and discussed, which realizes the IR imaging /ladar dual-mode detection to track the target with high precision. The field of view and its linearity are analyzed and tested, which accord well with the calculation result.

Key words imaging process; staring infrared radiation imaging; laser active detection; piezoelectric fast-steering mirror; linearity

OCIS codes 230.4040; 250.4745; 320.7080; 120.5700; 120.1880

1 引 言

随着大规模红外(IR)焦平面阵列探测器技术的发展, 针对空间非合作目标探测的红外光电系统由扫描体制发展为凝视成像, 并具有高灵敏度、高空空间分辨率及大动态范围的特点, 能在复杂环境下实现对目标的自主搜索及跟踪, 具有较强的抗电磁干扰能力。然而, 红外成像依赖目标反射的太阳光或自身辐射, 拾取微弱信号并最终成像, 存在目标亮度低、受地球阴影限制等问题, 仅能获得目标的二维信

息, 且易受各种红外干扰的影响而丢失目标。相对于基于目标各部分温度差异进行探测的红外成像而言, 主动激光探测将目标的全部或关键特征部位照亮, 使其满足接收系统探测要求, 不仅可以提高被观察目标的亮度, 还可以在全天候、零照度条件下, 随时在所关心的天区内进行空间目标探测。主动探测方式基于目标的反射率特性, 而反射率不易受环境温度及阳光变化的影响, 具有更高的目标识别能力。此外, 激光由于单色性和方向性好, 光束发散角小,

收稿日期: 2011-04-01; **收到修改稿日期**: 2011-05-12

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)资助课题。

作者简介: 张冰娜(1974—), 女, 博士研究生, 主要从事激光主动探测技术等方面的研究。

E-mail: zhang_bn@mail. sitp. ac. cn

导师简介: 王建宇(1959—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光和红外探测等方面的研究。

E-mail: jywang@mail. sitp. ac. cn(通信联系人)

能量集中,而具有很高的跟踪精度和空间分辨率。将红外成像与主动激光探测相结合,构成红外成像/主动激光探测双模复合探测技术,得到目标的角度-角度-距离的三维信息,配合现代高速信号处理系统^[1],实现两者优势互补,是现代光电系统发展的趋势之一^[2]。美国的轨道快车卫星(2007年3月发射),利用主被动探测技术相结合,实现空间目标探测及交会对接,国内也有诸多文献报道了主被动复合探测技术^[3]。

本文提出了一种具有指向功能的激光主动探测技术,与凝视型红外探测系统相结合,实现对目标,尤其是非合作目标的精密跟踪,并对其视场范围、指向线性度等进行了分析和探讨。

2 红外成像/主动激光探测双模复合探测技术

2.1 工作原理

采用被动红外凝视成像相机探测、捕获目标并进行粗跟踪,然后利用激光主动探测实现精跟踪。红外凝视成像相机视场比激光主动探测装置视场大得多,二者采用分孔径结构,光轴平行,如图1所示。红外图像经高速数字信号处理器(DSP)处理,得到

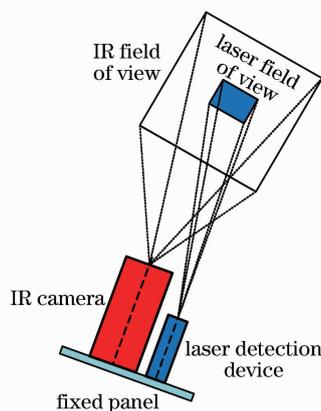


图1 红外/激光双模探测示意图
Fig.1 Schematic diagram of IR/laser dual-mode detection

目标的方位角和俯仰角信息,当进入激光探测装置视场时,输出给激光探测装置,由压电二维倾斜镜根据指令信息,快速指向目标,然后激光器发光进行测距,得出目标三维信息(角度-角度-距离),如图2所示。二维快速倾斜指向镜具有谐振频率高、响应速度快、动态滞后误差小等优点^[4],快速响应 DSP 处理系统的指令,引导激光束精确指向目标,实现准确测距,结合红外系统的方位和俯仰角二维信息,实现对目标的精密跟踪。

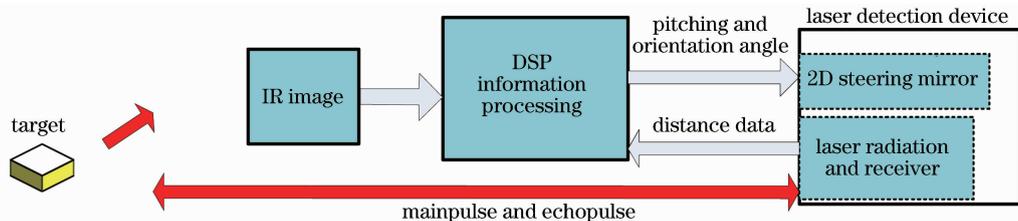


图2 红外/激光双模探测技术工作原理

Fig.2 Principle of IR/laser dual-mode detection system

2.2 激光探测装置视场分析

激光探测装置如图3所示,激光器发射的激光经折转镜后,由压电指向镜反射,绕着z轴发射出去,然后由望远镜筒接收目标反射回来的回波。二维指向镜由4个对角分布的压电陶瓷驱动器驱动,每2个对角驱动器组成推拉形式来控制一个轴的倾斜,2个轴垂直正交,垂直于镜面法线,并贴有2对全桥应变片(共8个应变片,每个压电陶瓷2片)来检测倾角变化^[5]。为了克服非线性迟滞和蠕变现象^[6],驱动电路采用闭环控制。二维倾斜镜绕着2个垂直的轴做二维旋转,实现二维的扫描指向。依据矢量旋转的矩阵计算方法^[7],需要知道2个轴旋转的顺序,才能求出出射光线的轨迹。而压电镜面是一个平面,无法确定2个轴旋转的顺序,因此不能采用通用的二维摆镜扫描的计算方式来计算二维指向镜的视场,必须采用新的方法。

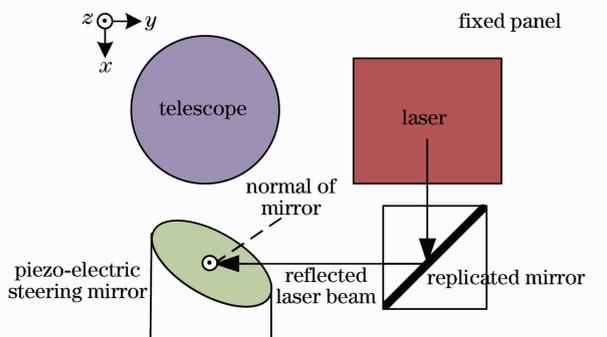


图3 激光探测装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser detection device

去,然后由望远镜筒接收目标反射回来的回波。二维指向镜由4个对角分布的压电陶瓷驱动器驱动,每2个对角驱动器组成推拉形式来控制一个轴的倾斜,2个轴垂直正交,垂直于镜面法线,并贴有2对全桥应变片(共8个应变片,每个压电陶瓷2片)来检测倾角变化^[5]。为了克服非线性迟滞和蠕变现象^[6],驱动电路采用闭环控制。二维倾斜镜绕着2个垂直的轴做二维旋转,实现二维的扫描指向。依据矢量旋转的矩阵计算方法^[7],需要知道2个轴旋转的顺序,才能求出出射光线的轨迹。而压电镜面是一个平面,无法确定2个轴旋转的顺序,因此不能采用通用的二维摆镜扫描的计算方式来计算二维指向镜的视场,必须采用新的方法。

压电倾斜镜(PFSM)采用对角分布的4个压电

陶瓷形成 4 个支点,构成垂直正交的 2 个轴。镜面与 2 个轴相交所决定的平面平行,2 个轴的倾斜角度共同决定镜面的倾斜角度,与 2 个轴的旋转顺序无关。采用求 2 个矢量叉积的方法,得到镜面法线矢量,再利用旋转矢量矩阵计算方法,求出入射到 PFSM 镜面上光线在不同倾斜角度下的轨迹,即得到二维指向镜的视场。

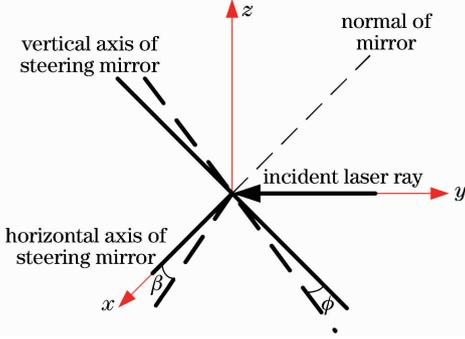


图 4 坐标系建立示意图

Fig. 4 Schematic diagram of coordinate system

按照图 4 方向建立坐标系,入射光线矢量为 $\{0 \ -1 \ 0\}$,假设压电横轴转动 β 角,纵轴转动 ϕ 角,2 个轴的矢量方向分别为

$$\mathbf{A}_1(\phi) = \left\{ 0 \quad \cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) \quad -\cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \right\},$$

$$\mathbf{A}_2(\phi) = \left\{ \cos\beta \quad \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta \quad \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta \right\},$$

2 个矢量求叉积,得到二维倾斜镜镜面绕着两轴旋转后的法矢量为

$$\begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\beta \left[\cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \right] \\ \cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)\cos\beta \\ \cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)\cos\beta \end{pmatrix},$$

代入反射定律矩阵公式,求得 x, y 方向的视场为

$$\begin{cases} x(\phi, \beta) = \frac{\sqrt{2}\sin\beta \left[\cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) \right]}{2\cos\beta\cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)} \\ y(\phi, \beta) = \frac{1 - 2\cos^2\beta \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}{2\cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)\cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)\cos^2\beta} \end{cases}, \quad (1)$$

画出在 β 和 ϕ 分别为 $(-100 \text{ mrad}, 100 \text{ mrad})$, $(-50 \text{ mrad}, 50 \text{ mrad})$ 及 $(-8 \text{ mrad}, 8 \text{ mrad})$ 范围内的视场,如图 5 所示。

可见视场为扇形, x 方向左右对称, y 方向下窄上宽,存在失真现象,而且随着 PFSM 两个轴旋转角度的增大,失真增大。在收到 DSP 信息处理系统的指令后,PFSM 发生旋转,会因为视场的失真而影响指向精度和线性度。

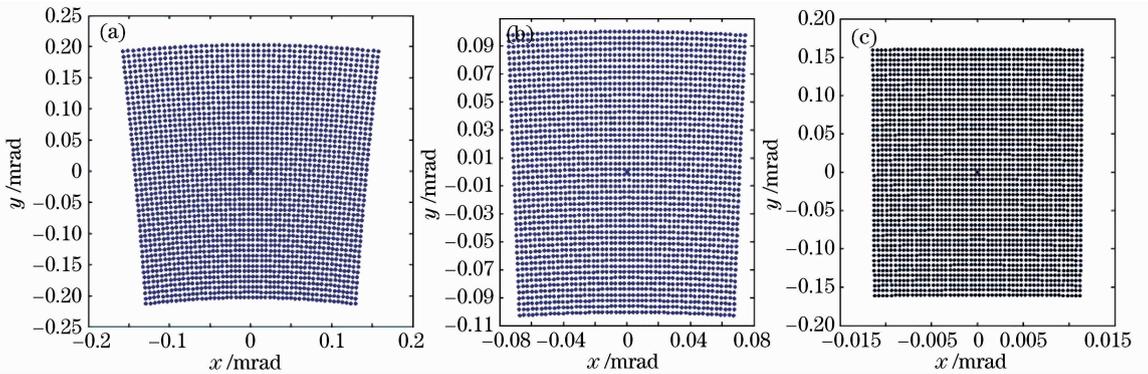


图 5 扫描视场仿真图。(a) $(-100 \text{ mrad}, 100 \text{ mrad})$; (b) $(-50 \text{ mrad}, 50 \text{ mrad})$; (c) $(-8 \text{ mrad}, 8 \text{ mrad})$

Fig. 5 Simulation plot of scanning field of view

(a) $(-100 \text{ mrad}, 100 \text{ mrad})$; (b) $(-50 \text{ mrad}, 50 \text{ mrad})$; (c) $(-8 \text{ mrad}, 8 \text{ mrad})$

2.3 线性度分析

从图 5 可以看出,激光束视场为扇形,在 x 和 y 轴方向都存在着失真现象。 x 方向失真较小, y 方向失真严重。在 PFSM 两轴范围为 $(-100 \text{ mrad}, 100 \text{ mrad})$ 时, x 方向最大失真为 5.15 mrad , y 方向最大失真为 14.35 mrad 。在两轴倾斜范围分别为 $(-50 \text{ mrad}, 50 \text{ mrad})$ 时, x 方向最大失真为

1.30 mrad , y 方向最大失真为 3.55 mrad 。在两轴倾斜范围分别为 $(-8 \text{ mrad}, 8 \text{ mrad})$ 时, x 方向最大失真为 $32 \mu\text{rad}$, y 方向最大失真为 $90.5 \mu\text{rad}$ 。倾斜范围越小,失真越小。因此这种指向方式只适用于范围较小时的指向,否则会带来比较严重的非线性失真,影响执行 DSP 信息处理系统指令时的指向线性度。而一般的 PFSM 两轴倾斜范围在 50 mrad 以

内,不会带来严重的非线性失真。另外,控制电路温漂、倾斜镜应变片传感器随温度变化也会影响指向线性度。采用低温漂的控制电路,以及全桥式应变片传感器可以降低温度对 PFSM 指向线性度的影响。

2.4 视场范围

入射光线不动,求压电两正交轴分别转动 (β, ϕ) 后与零位 $(\beta = \phi = 0)$,即为 z 轴)时出射光线旋转的角度 ω ,即出射光线在 PFSM 转动后所旋转的角度。旋转前及旋转后出射光线的方向矢量分别为

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \sin 2\beta \cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \left[\cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \right] \\ 2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \cos^2 \beta - 1 \\ 2\cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) \cos^2 \beta \end{pmatrix}$$

在纵轴不动 $(\phi = 0)$,横轴变化时,出射光线旋转角度为

$$\omega = -\sqrt{2}\beta, \quad (2)$$

在横轴不动 $(\beta = 0)$,纵轴变化时,出射光线旋转角度为

$$\omega = -2\phi, \quad (3)$$

在横轴和纵轴旋转时,出射光线旋转角度为

$$\omega = \pm \sqrt{(\sqrt{2}\beta)^2 + (2\phi)^2}, \quad (4)$$

符号由 (β, ϕ) 决定。

由以上关系,得知在不考虑非线性失真的情况下,压电视场范围为 x 方向 $(-\sqrt{2}\beta, \sqrt{2}\beta)$, y 方向 $(-2\phi, 2\phi)$ 。在两轴旋转范围相同时,扫描视场不对称, y 向宽度大致为 x 向的1.414倍。

2.5 安装时压电镜面与设计位置不重合带来的误差分析

PFSM 安装时,可能出现镜面与设计位置偏斜的情况,即压电镜面实际零位法矢量与理想零位法矢量存在 $(\Delta\beta, \Delta\phi)$ 的夹角,会导致视场发生偏移,如图6所示,而且满足 x 方向偏移 $\sqrt{2}\Delta\beta$, y 方向偏移 $2\Delta\phi$ 的关系,视场范围不变。

PFSM 视场与设计的理想视场发生偏移,造成在红外凝视成像相机视场内的坐标位置发生偏移,需要通过测试,得到激光探测装置视场偏移量,作为固定偏差予以消除。

3 双模复合探测技术参数

3.1 光轴偏移量测试

利用牛顿式平行光管(焦距2 m)对红外相机和激光主动探测子系统光轴进行标校,得到激光探测系统零位光轴在红外相机视场中的坐标,作为 DSP

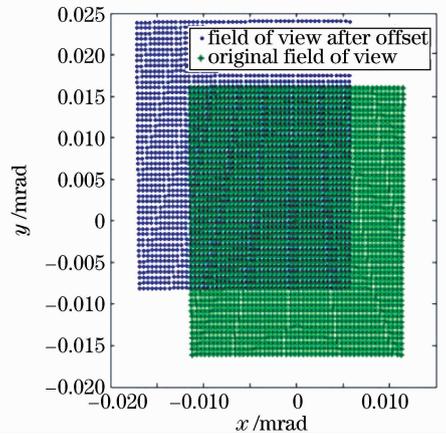


图6 压电镜面法矢量偏移前后视场的变化
Fig. 6 Comparison of field of view followed the offset of mirror normal

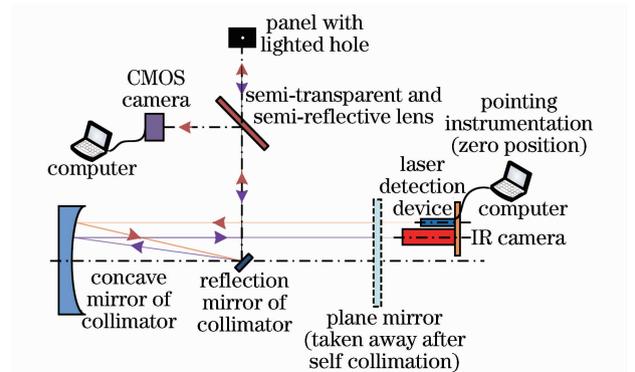


图7 光轴偏移量测试

Fig. 7 Test of optical axes offset

给激光主动装置指向指令时的固定偏差。如图7所示放置平面镜,利用自准直法^[8]确保小孔位于平行光管焦点上;移动 CMOS 相机,使得小孔在 CMOS 中心位置清晰成像。取走平面镜,使得小孔中心对准红外相机的视轴中心,CMOS 相机采集图像,计算小孔图像的重心^[9]坐标;关闭小孔后灯光,激光探

测装置上电, 压电指向镜指向光轴零位, 发射激光, 采集激光图像, 计算激光光斑重心坐标; 计算两重心坐标的偏移量, 即得到激光探测装置在红外相机视场中的坐标位置 (β_0, ϕ_0) 。可以采集多幅图像, 计算光斑重心坐标的平均值, 降低测量误差。该测量方法的精度取决于 CMOS 相机与分划板的装调误差及 CMOS 相机的分辨率。图 8 分别为采集到的小孔和激光光斑图像。

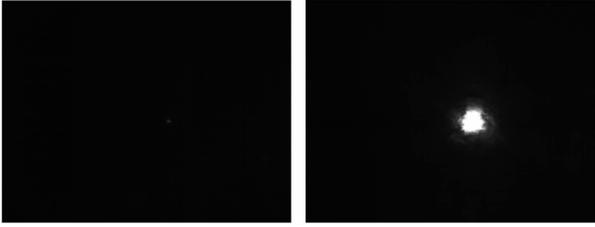


图 8 小孔和激光光斑图像

Fig. 8 Image of lighted hole and laser spot

3.2 指向范围测试

PFMS 单轴的控制框图如图 9 所示, 收到

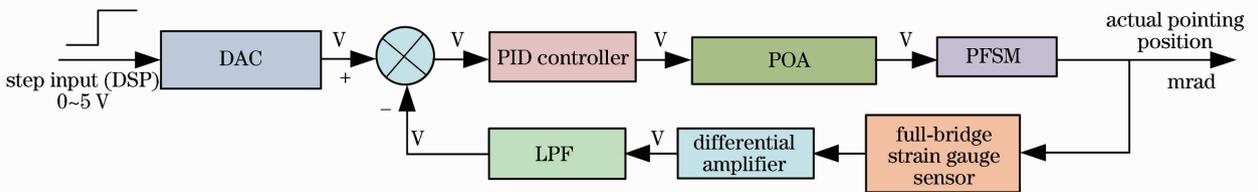


图 9 PFMS 控制示意图

Fig. 9 Control diagram of PFMS

3.3 指向线性度测试

PFMS 收到 DSP 信息处理系统的指令后, 按照指令进行偏转, 因此需要对激光主动探测装置数模 (DA) 转换前的指令与 PFMS 实际偏转角度之间的关系进行标定。利用图 7 搭建光路, 一个轴电压不变, 分别改变另外一个轴指令电压, 使得激光光斑成在不同的位置, 如图 10 所示。其中 $(2.46 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$ 为光轴零位的位置, 由 3.1 节测量得到, 对应 (β_0, ϕ_0) 。

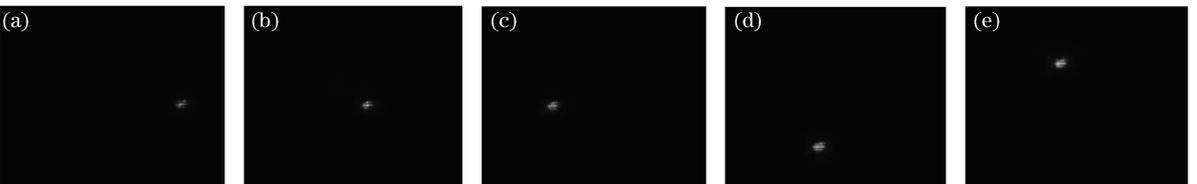


图 10 不同位置采集的光斑图

(a) $(0.5 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$; (b) $(2.46 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$; (c) $(4.98 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$; (d) $(2.46 \text{ V}, 0 \text{ V})$; (e) $(2.46 \text{ V}, 4.99 \text{ V})$

Fig. 10 Spot image acquired at different positions

(a) $(0.5 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$; (b) $(2.46 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$; (c) $(4.98 \text{ V}, 2.35 \text{ V})$; (d) $(2.46 \text{ V}, 0 \text{ V})$; (e) $(2.46 \text{ V}, 4.99 \text{ V})$

DSP 信息处理系统的指令 (电压值、阶跃输入波形) 后, 经过数模转换器 (DAC) 转换、比例微分积分 (PID) 控制器、功率放大器 (POA) 后输出给 PFMS 进行偏转。利用全桥应变片来测量实际指向, 经过差分放大器和低通滤波器 (LPF) 后反馈回来, 实现闭环控制。功率放大器电压范围决定 PFMS 的指向范围, $0 \sim 100 \text{ V}$ 对应压电两轴转动范围约为 $0 \sim 50 \text{ mrad}$, 因为压电应变片的个性差异, 会有所差别。对应于 $0 \sim 5 \text{ V}$ 的 DSP 信息处理系统指令范围, 功率放大器输出为 $0 \sim 27 \text{ V}$, 利用图 7 所示平行光管来进行测量, 并将原来放小孔的位置更换为有标定刻度的像屏, 开启激光。其中一个光轴指向零位, 另外一个光轴分别指向最大最小值, 用 CMOS 相机记录光斑在像屏上移动的距离 dx 和 dy , 利用公式 dx/f 和 dy/f (f 为平行光管焦距) 得到两轴在 x 和 y 方向的指向范围为 $18.00 \text{ mrad} \times 25.35 \text{ mrad}$, 符合 y 向宽度为 x 向的 1.414 倍的结论。测量误差主要由读数误差决定。

利用 CMOS 相机在每个光斑位置采集 50 幅图像, 求出平均重心位置, 拟合成直线, 如图 11 所示。图中 B 表示测量结果, $\text{linear fit of data}_B$ 表示数据 B 拟合后形成的直线。测试时角度分辨率由 CMOS 相机的视场和像素数决定。先测量视场内水平方向 (或垂直方向) 坐标纸长度 x , 由 x/f 得到 CMOS 相机的视场范围, 再除以该方向的像素数, 即得到角度分辨率, 经计算为 $22.46 \mu\text{rad}/\text{pixel}$ 。从测试结果可见采用闭环控制后, PFMS 有良好的线性度。测量

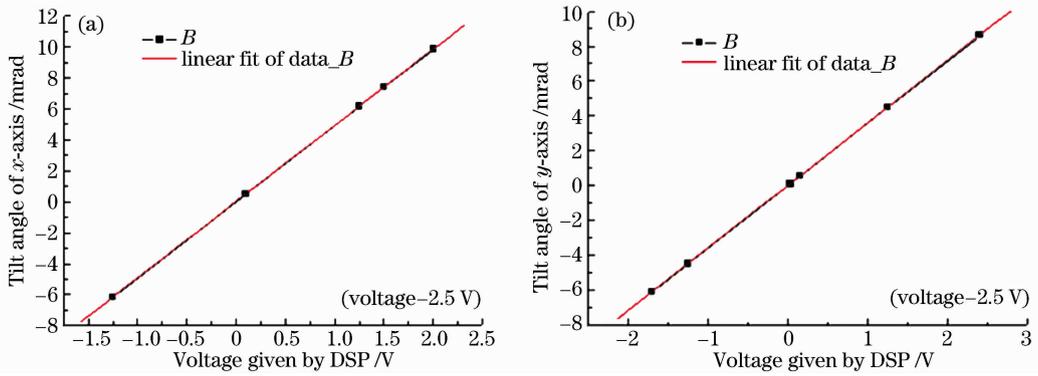


图 11 x 和 y 轴线性度测量

Fig. 11 Linearity measure of x and y axis

得 x 方向和 y 方向数值关系分别为 3.695 和 5.145 mrad/V。CMOS 采集图像过程中,需要抑制背景杂散光,并且滤掉光斑不完整的图像,这是因为激光发光周期和 CMOS 相机采集周期不同步造成的。

4 结 论

提出一种红外成像/主动激光探测双模复合探测技术,利用压电二维倾斜镜实现激光指向功能。计算结果显示,该指向结构具有不对称的视场,在小的指向范围时,线性度良好,优于 0.1 mrad。然后对与红外相机光轴的相对关系、线性度、视场范围提出了测量方法并进行测量,结果表明线性度和指向范围都与计算结果相符, y 方向视场范围为 x 方向的 1.414 倍。采用闭环控制后,消除了压电的迟滞效应,具有良好的线性度和指向精度。

参 考 文 献

- 1 Chen Xiaoqing, Ma Junguo, Fu Qiang *et al.*. Range anomalies suppression method of coherent laser radar range image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):181~185
陈晓清,马君国,付强等.相干激光雷达距离像距离反常抑制方法[J].中国激光,2010,**37**(1):181~185
- 2 Zuo Baojun, Kuang Yaowu. Optical design of the IR/ladar dual-mode seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3):495~499

- 左保军,祝耀武.红外/激光双模导引头的光学系统[J].红外与激光工程,2009,**38**(3):495~499
- 3 Liu Liping, Sun Xiudong, Zhao Yuan *et al.*. Design of high-efficiency beam dividing system used in active-passive composite imaging radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8):2293~2296
刘丽萍,孙秀冬,赵远等.一种高效率主被动复合成像雷达分光系统设计[J].光学学报,2009,**29**(8):2293~2296
- 4 Fu Chenyu, Jiang Lingtao, Ren Ge *et al.*. Image tracking system with a fine-steering-mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, **21**(3):1~8
傅乘毓,姜凌涛,任戈等.快速反射镜成像跟踪系统[J].光电工程,1994,**21**(3):1~8
- 5 Physik Instrumente GmbH&Co. KG. S-334 miniature piezo tip/tilt mirror [OL]. [2010-4-7]. http://www.physikinstrumente.com/en/pdf/S334_Datasheet.pdf
- 6 Xiang Sihua, Chen Sihai, Wu Xin *et al.*. Study and test on a novel fast laser scanner based on piezo-actuators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2):408~413
向思桦,陈四海,吴鑫等.一种基于压电驱动器的新型高速激光扫描器的研制和测试[J].中国激光,2010,**37**(2):408~413
- 7 Wu Chao, Yuan Yan, Xiong Wang'e *et al.*. Precision analysis of point mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10):2072~2075
吴超,袁艳,熊望娥等.指向摆镜的精度分析[J].光子学报,2008,**37**(10):2072~2075
- 8 Ding Zhenyong, Ye Lu, Shen Xiangheng. Detection method of parallelism of optic axes between laser and visible optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5):890~893
丁振勇,叶露,沈相衡.激光与可见光系统光轴平行性检测[J].红外与激光工程,2008,**37**(5):890~893
- 9 Luo Xinxin, Liu Bingqi, Sun Dongping *et al.*. Opto-axes parallelism detection method for laser rangefinder based on CCD [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(3):460~463
骆新新,刘秉琦,孙东平等.基于 CCD 的激光测距机光轴平行性检测[J].半导体光电,2009,**30**(3):460~463