

引用格式: YU Huijun, LI Xiaoguang, SHEN Wenjiang. Scanning Angle Compensation of MEMS Mirror Applied in Monocular 3D Camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1212001

余晖俊, 李小光, 沈文江. 应用于单目 3D 相机中 MEMS 镜的扫描角度补偿[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1212001

应用于单目 3D 相机中 MEMS 镜的扫描角度补偿

余晖俊^{1,2}, 李小光², 沈文江²

(1 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 合肥 230026)

(2 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123)

摘 要: 为了提高单目视觉相机的测量精度及测试数据的可重复性, 提出了一种应用于激光扫描投影中扫描镜的闭环控制方式来提高投影出的条纹位置的稳定性。利用集成在扫描镜上的压阻传感器提供的反馈信号进行闭环控制, 同时针对压阻传感器的温度特性, 设计了测试系统来标定压阻输出与温度关系曲线。通过记录每一个温度下压阻的反馈输出值, 生成反馈输出与温度的关系表。在室温至 70 °C 的温度区间内, 扫描镜的扫描角度的变化量由 3.52° 减小到 0.05°。通过对扫描镜的扫描角度补偿控制后, 单目视觉相机的三维测试精度以及测试数据的可重复性都得到了大幅提升。

关键词: 激光扫描投影; 单目视觉; 微机电系统扫描镜; 压阻传感器; 温度标定; 扫描角补偿

中图分类号: TN26

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215012.1212001

Scanning Angle Compensation of MEMS Mirror Applied in Monocular 3D Camera

YU Huijun^{1,2}, LI Xiaoguang², SHEN Wenjiang²

(1 School of Nano-tech and Nano-bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Key Lab of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy and repeatability of monocular vision camera, a closed-loop control method for the scanning mirror in laser scanning projection is proposed to improve the stability of the projected fringe position. The closed-loop control is carried out by using the feedback signal provided by the piezoresistive sensor integrated on the scanning mirror. At the same time, according to the temperature characteristic of piezoresistive sensor, a test system is designed to calibrate the relationship between piezoresistive output and temperature. By recording the piezoresistive feedback output value at different temperature, a table of the relationship between the feedback output and temperature is generated. In the temperature range from room temperature to 70 °C, the scanning angle change of the scanning mirror decreases from 3.52° to 0.05°. By compensating the scanning angle of the scanning mirror, the 3D testing accuracy and the repeatability of the testing data of the monocular vision camera are greatly improved.

Key words: Laser scanning projection; Monocular vision; Micro-electromechanical systems scanning mirror; Piezoresistive sensor; Temperature calibration; Scanning angle compensation

OCIS Codes: 120.2040; 120.5800; 120.6780; 150.6910

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2018YFF01010901)

第一作者: 余晖俊(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 MEMS 微镜及开发应用。Email: hjyu2012@sinano.ac.cn

导师(通讯作者): 沈文江(1973—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为 MEMS 器件。Email: wjshen2011@sinano.ac.cn

收稿日期: 2021-05-21; 录用日期: 2021-08-16

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着计算机技术和成像设备的发展,结构光三维成像技术^[1-2]已广泛应用于航空航天、工业检测、文物保护、人工智能以及游戏娱乐等各个领域,其中,相位测量轮廓术凭借其速度快、精度高、非接触等优点,具有广阔的应用前景^[3]。

基于条纹投影的光学三维测量技术,无论是双目还是单目结构光系统的测量精度均依赖于高精度的相位投影和计算精度^[4]。传统方法基于数字光处理(Digital Light Processing, DLP)投影仪实现条纹图像,而基于微机电系统(Micro-electromechanical Systems, MEMS)激光扫描投影来投射可编程的图案可实现低成本、小尺寸的结构光三维测量应用^[5-6]。但是,基于扫描镜的条纹投影因受温度等影响造成投影条纹变形、位置发生变化,导致相位计算漂移带来三维测量精度下降的问题^[7]。

要保证投影条纹不变形、位置不变化,首先需要保证扫描镜的扫描角不发生变化,而MEMS镜在工作过程中会受到温度影响使扫描角发生变化。为了保证扫描角度的稳定,需要有反馈信号来实现对扫描角度的闭环控制^[8-10]。目前对于MEMS扫描镜有多种反馈方式,如光学传感器反馈、电容传感器反馈以及压阻传感器反馈等^[10-11]。国内外大部分研究采用光学传感器来做闭环控制,光学传感器通常放置在外围检测,一般采用光电二极管或光电位置传感器,但势必会增加系统的体积,无法集成到小系统中。

本文将采用压阻传感器作为反馈元件,将其集成到MEMS扫描镜的扭转梁上。当MEMS镜扫描角为一定值,即应力为一定值,压阻传感器的电压输出也为一定值。然而压阻传感器为温度敏感型器件,当环境温度变化时,即使MEMS扫描镜保持扫描视场角(Field Of View, FOV)不变,压阻器件的电阻率还是会发生变化,这将导致压阻传感器输出的幅值变化。为了解决此问题,ARYAFAR M^[12]等提出了温度补偿应用于压阻式压力传感器。本文标定压阻输出随温度变化曲线,当温度变化时,由温度传感器读取当前温度,使MEMS镜反馈输出幅值目标值,即为此温度下对应的压阻输出,并控制MEMS镜扫描角的驱动幅度也随温度变化,直到实际MEMS镜的压阻输出幅值满足标定的值,以此来实时改变驱动信号幅值,使得MEMS扫描角度保持恒定,以提升单目相机测量数据的重复性与精度。

1 压阻传感器设计

应用于单目相机中的MEMS扫描镜为一维扫描镜,即只绕一个方向扭转。[图1](#)展示了一维MEMS扫描镜的基本结构,内部镜面绕着扭转梁来回偏转实现在一个方向的扫描。内部镜面产生扭转的力是来自外框上的线圈与外部磁场作用产生的安培力。给线圈一定频率的驱动信号,在外部磁场的作用下MEMS扫描镜开始偏转。四端压阻传感器放置在扭转梁的根部,当MEMS扫描镜发生偏转即在扭转梁上产生剪切应力,应力导致压阻单元的电阻率发生变化。当有电压施加在压阻单元两端上时,通过探测另外两端即可检测到电压的变化信号,且随着扭转梁的变形程度,检测到的信号也会变化,从而达到检测MEMS扫描镜运动状态的目的。

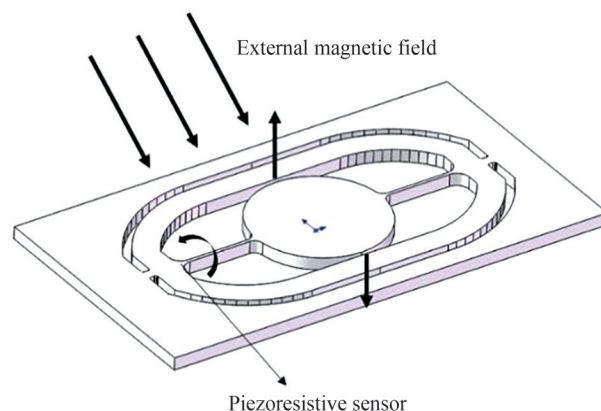


图1 集成压阻传感器MEMS扫描镜的基本结构

Fig. 1 The basic structure of MEMS micromirror with integrated piezoresistive sensor

在加工压阻传感器之前需要先确定压阻的掺杂类型、MEMS扫描镜扭转梁的晶向以及掺杂工艺参数。图2展示了位于MEMS扫描镜扭转梁上的压阻单元,压阻单元与扭转梁的夹角为 θ ,与 $\langle 100 \rangle$ 晶向的夹角为 ϕ ^[13]。式(1)展示了压阻输出电压 V_{output} 受到不同系数的影响,由于MEMS扫描镜只发生扭转,仅考虑压阻单元受到剪切应力的输出电压^[13]。

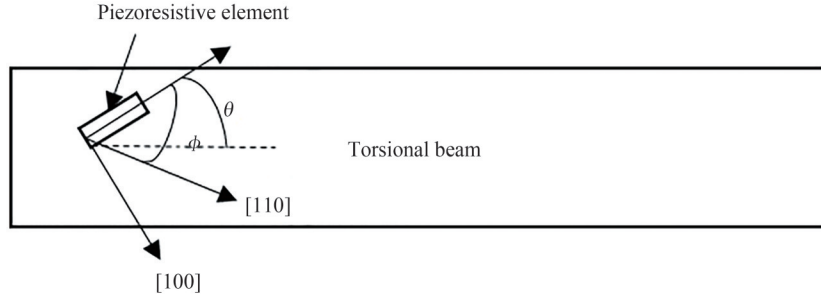


图2 压阻单元与扭转梁的晶向
Fig. 2 Crystal orientation of piezoresistive element and torsion beam

$$V_{\text{output}} = \frac{W}{L} V \frac{\rho_6}{\rho_1} = \frac{W}{L} V [\sin(2\theta) \sin(2\phi)(\pi_{11} - \pi_{12}) + \cos(2\theta)\cos(2\phi)\pi_{44}] T_6 \quad (1)$$

式中, L 、 W 为压阻单元的长宽尺寸, V 为压阻传感器输入电压, ρ_1 为无应力时掺杂硅的电阻率, ρ_6 为受到剪切应力时掺杂硅的电阻率, π_{11} 、 π_{12} 和 π_{44} 均为压阻系数, T_6 为压阻单元受到的剪切应力。

由式(1)计算得到的不同晶向、不同夹角下的压阻系数见表1。当压阻单元的掺杂类型为n型掺杂,扭转梁沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向,压阻单元与扭转梁的夹角为 45° 时,压阻系数最高为155.6。压阻系数越高,在相同的偏转角与压阻单元供电电压一定的情况下,压阻输出越大。确定掺杂类型以及扭转梁的晶向后,可将式(1)简化成^[14-15]

$$V_{\text{output}} = \frac{W}{L} V (\pi_{11} - \pi_{12}) T_6 \quad (2)$$

表1 压阻系数的计算结果
Table 1 The calculated results of the piezoresistive coefficients

	Torsional beam along the $\langle 110 \rangle$ direction		Torsional beam along the $\langle 100 \rangle$ direction	
	p-type	n-type	p-type	n-type
π_{11}	6.6	-102.2	6.6	-102.2
π_{12}	-1.1	53.4	-1.1	53.4
π_{44}	138.1	-13.6	138.1	-13.6
θ	45°	45°	0°	0°
ϕ	45°	45°	45°	45°
Coefficient	7.70	-155.60	138.1	-13.6

从式(2)看到压阻输出电压只与压阻图形、供电电压、压阻系数与剪切应力有关。在压阻图形、供电电压以及剪切应力确定的前提下,要提高压阻单元的灵敏度只能提高压阻系数。压阻系数与工艺的掺杂浓度有关,掺杂浓度越低,压阻系数越高,反之掺杂浓度越高,压阻系数越低。压阻系数直接由掺杂浓度决定,压阻系数与掺杂浓度关系的经验公式为^[16]

$$\pi_{11}^n = 71.695 \ln C - 3739.6 \quad (3)$$

$$\pi_{12}^n = -23.479 \ln C - 1319.6 \quad (4)$$

通过式(3)和(4)计算得到当掺杂类型为n型时,压阻系数 π_{11}^n 和 π_{12}^n 与掺杂浓度 C 的关系如图3,结合考虑工艺难度等因素,最终将工艺掺杂浓度定为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 与 $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$,对这两种不同的浓度进行灵敏度比较。

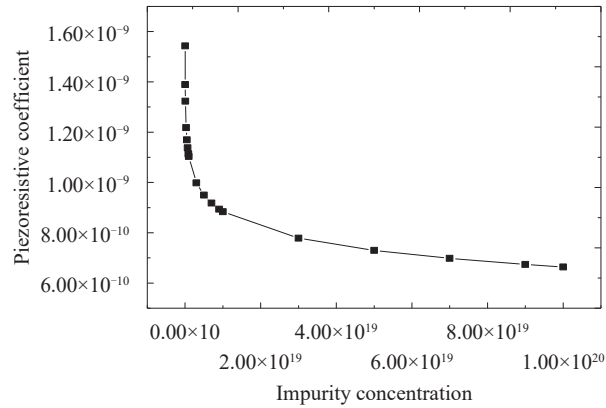


图3 压阻系数与掺杂浓度的关系

Fig. 3 The relationship between piezoresistive coefficient and impurity concentrations

2 MEMS扫描镜的扫描角控制

图4展示了应用于单目相机中的投射光机与投射出的正弦条纹图案。投射光机由激光器、透镜、MEMS扫描镜与驱动电路四部分组成,并在光机系统中加入温度传感器测试光机温度。由于MEMS微镜的扫描角以及反馈电压输出值会随温度的变化而发生改变,如果不对扫描角进行补偿,将无法用于单目相机中。这是由于单目相机是以投射条纹图案的位置为标定依据,投射条纹图案位置变化将直接影响单目相机的重构精度,条纹位置变化越大,重构精度越低。图5为MEMS扫描镜开环控制单目相机的测试相机与白墙之间相对距离的结果,得到的测试数据重复性差,将大大影响单目相机的性能,故有必要保持投射条纹位置不发生变化。对于使用MEMS扫描镜作为核心扫描器件的投射光机而言,保持投射条纹位置的稳定,最重要是保证MEMS扫描角的稳定。

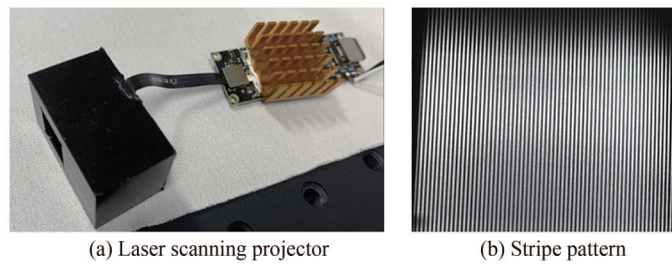


图4 投射光机与投射条纹图案

Fig. 4 Projection optical engine and projection stripe pattern

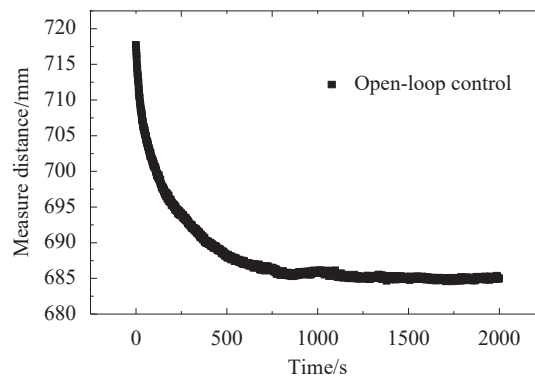


图5 单目3D相机测试相机到白墙之间的相对距离(开环控制MEMS扫描镜)

Fig. 5 Monocular 3D camera measures the distance between the camera and the white wall(open-loop control MEMS scanner)

2.1 MEMS扫描镜开环控制时的角度变化

图6展示了只对MEMS扫描角进行开环控制,扫描角随温度的变化而变化的情况。驱动板提供MEMS的驱动信号幅度保持恒定,随着温度从室温升高到70℃,扫描角FOV逐渐减小,由最初的54.77°降低到51.52°,其变化将直接影响单目相机的性能。

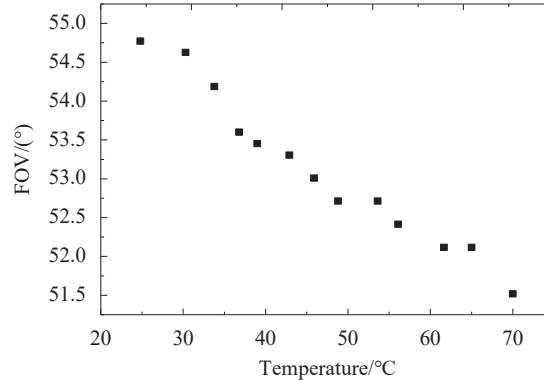


图6 MEMS扫描角FOV随温度的变化关系(开环控制)

Fig. 6 The relationship between the FOV and the temperature (open-loop control)

2.2 压阻传感器的性能参数测试与温度曲线标定

图7展示了MEMS微镜的压阻传感器性能参数测试系统。将激光点入射到微镜镜面上,经镜面发射后光电入射到光电位置传感器上。此时信号发生器提供驱动信号给MEMS微镜使其发生偏转,当微镜发生偏转后入射到光电位置传感器上的光电也会发生偏移,此时记录下偏移位置并通过三角计算得到微镜的偏转角度,同时将压阻传感器的输出接入示波器中,记录压阻传感器输出幅度。测试系统中给微镜上压阻传感器的供电电压为3.3V。通过此测试系统能够得到压阻输出幅值与MEMS镜扫描角的对应关系,如图8所示,随着扫描角的增大,压阻输出幅值也随之增大,且压阻输出幅值与扫描角的大小呈线性关系。同时展示了不同掺杂浓度对压阻传感器灵敏度的影响,当扫描角与压阻供电电压不变时,在FOV为50°的情况下,掺杂浓度为 $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的器件,压阻输出为290 mV,而掺杂浓度为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的器件,压阻输出为356 mV。当压阻传感器的输入电压为3.3V时,随着掺杂浓度的降低,压阻输出灵敏度增加,由 $11.55 \text{ mV}/^\circ$ 提升到了 $14.19 \text{ mV}/^\circ$ 。

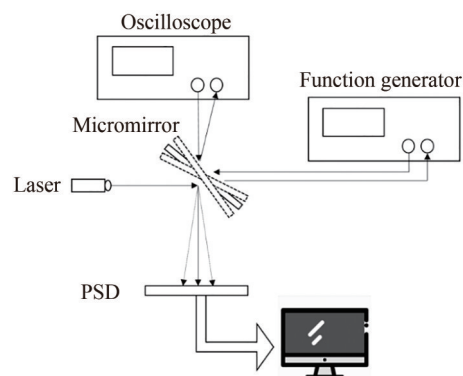


图7 压阻传感器性能参数测试系统

Fig. 7 Measure system of the piezoresistive sensor performance

只对MEMS镜开环控制时FOV会随温度变化而变化,此时通过压阻传感器的输出信号作为反馈的判断依据来控制MEMS扫描镜的FOV变化。压阻传感器也是温度敏感型器件,当MEMS扫描角不变且压阻传感器的供电电压不变,压阻传感器的输出信号依然会随温度的改变而变化,仅通过控制压阻传感器的输出幅值不变来作为反馈判定依据而调整MEMS扫描镜的驱动信号幅度,无法保证MEMS扫描角的稳定。鉴于压阻传感器的温度特性,在做反馈控制之前需标定MEMS扫描镜上压阻传感器的温度曲线。图9展示

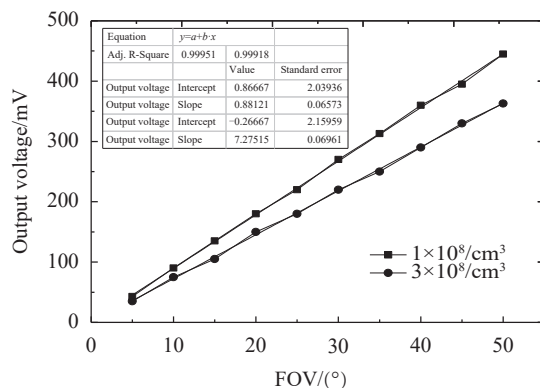
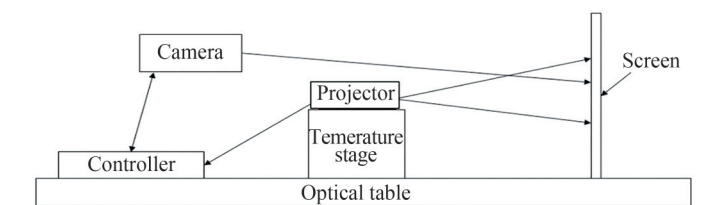


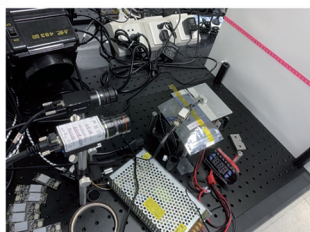
图8 不同扫描角FOV下压阻传感器的输出幅值(输入电压为3.3 V)

Fig. 8 Output amplitude of piezoresistive sensor at different scan angle FOV(input voltage 3.3 V)

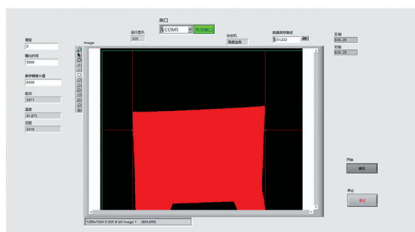
了搭建的压阻输出与温度的标定系统。将光机放置在温度台上(热板或制冷板),固定光机到屏幕的距离、相机到屏幕的距离并固定温度台。通过相机判断光机扫描FOV的角度,相机判断的数据上传到上位机,当温度台温度变化造成FOV角度发生变化时通过补偿驱动幅度来保证FOV不变,此时记录下当前温度(通过温度传感器读取)下的压阻输出幅值,以此得到反馈输出与温度的关系曲线,以1 °C为最小温度单位。压阻反馈输出与温度的关系曲线如图10所示,X轴为温度,Y轴为通过模数转换器(Analog Digital Converter, ADC)采样的压阻输出的数字量。随着温度的增加,压阻输出呈减小趋势。



(a) Schematic diagram of piezoresistive output and temperature calibration system



(b) Calibration system



(c) Calibration system software interface

图9 压阻输出与温度的标定系统

Fig. 9 Piezoresistive output and temperature calibration system

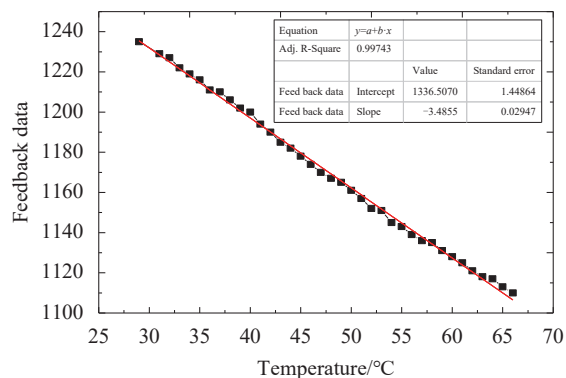


图10 压阻输出幅值与温度的关系

Fig. 10 The relationship between the piezoresistive output amplitude and the temperature

3 MEMS角度补偿后的单目相机的性能

3.1 压阻传感器标定后的FOV角度的变化

通过测量压阻传感器的输出与温度的变化关系后,将标定后的曲线输入控制系统中。图11展示了MEMS微镜扫描角控制的逻辑框图。当微镜上电后,通过外部驱动板修改微镜的驱动幅值,使微镜的扫描角达到预定值,此时对应的反馈输出为预先标定好的反馈输出目标值 Y ,对应的温度为 T 。设定好目标值 Y 后,增加驱动一个单位的幅值,此时压阻输出为 Y_1 ;然后减小驱动一个单位的幅值,此时压阻输出为 Y_2 ,将 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 作为步进单位。由于ADC采样会有噪声影响,只单次取样作为压阻输出值会有一些的风险,因此采用多次采集求平均的方式来获得压阻的输出值 C 。外界环境温度变化导致压阻反馈值 C 发生变化,当 $C > Y$ 时, $C - Y$ 如果小于一个步进单位 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 则不做调整,如果大于 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 则调整微镜的驱动幅值使 $C - Y$ 的值小于 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 。同样地,当 $C < Y$ 时, $Y - C$ 如果小于 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 则不做调整,如果大于 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 则调整微镜的驱动幅值使 $Y - C$ 的值小于 $\frac{Y_1 - Y_2}{2}$ 。图12展示了通过温度标定后的MEMS扫描镜FOV随温度的变化曲线,在室温至70℃的温度区间内,FOV变化值由开环控制时的3.52°减小到0.05°,大大提升了MEMS扫描镜FOV的稳定性。

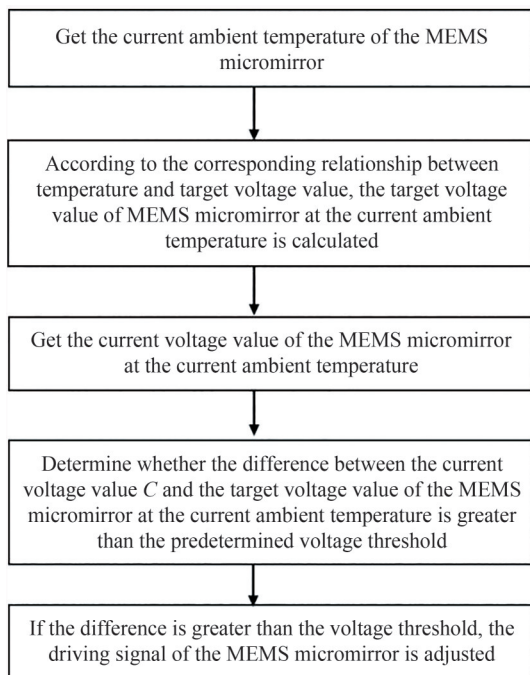


图11 MEMS镜扫描角控制逻辑框图

Fig. 11 The control logic block diagram of scanning angle of MEMS micromirror

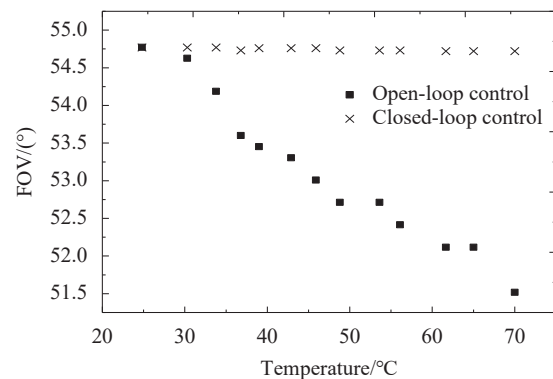


图12 MEMS扫描角FOV随温度的变化(开环控制与闭环控制)

Fig. 12 The relationship between the FOV of MEMS scanning angle and the temperature (open-loop control and closed-loop control)

3.2 单目相机经过角度标定后的性能提升

图13展示了单目相机的结构,包含投射光机、接收CMOS以及图像处理等部分。投射光机投影出正弦或格雷码条纹照射在测量物体或者白墙上,接收端通常为CMOS传感器接收图像信息,接收到的图像信息经过图像处理后即能重构出测量物体的三维模型或直接测量得到单目相机至白墙的相对距离。测量数据的精度以及重复性为单目相机重要的性能指标。

将单目相机放置在相对白墙710 mm的地方进行两组0.5 h的测试。一组对MEMS扫描镜开环控制,另一组对MEMS扫描镜进行压阻温度标定后闭环控制。测试数据如图14,可以看出对MEMS扫描镜进行闭环控制后,单目相机测试出数据的重复性以及精度都有明显提升。

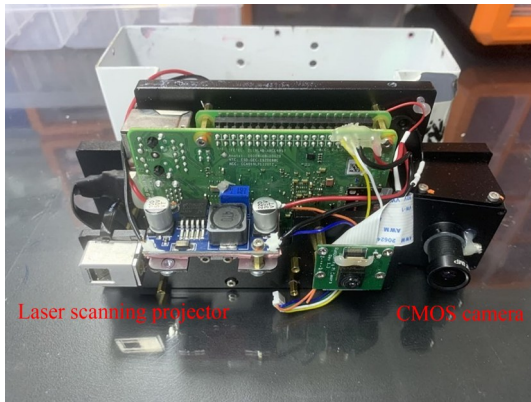


图 13 单目 3D 相机
Fig. 13 Monocular 3D camera

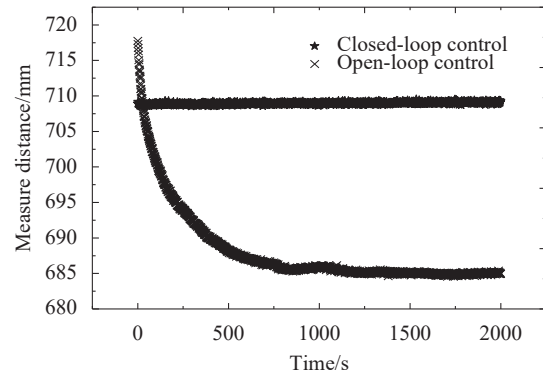


图 14 单目 3D 相机测试相机到白墙之间的相对距离
Fig. 14 Monocular 3D camera measures the distance between the camera and the white wall

4 结论

本文分析了影响单目三维相机测量精度的原因,鉴于集成到 MEMS 扫描镜上压阻传感器的反馈输出受温度的影响,对压阻传感器的输出电压进行温度标定后,对标定数据进行扫描角度补偿。温度的标定区间由室温到 70°C ,通过记录每一个温度下压阻的反馈输出值,生成反馈输出与温度的关系表,根据标定数据建立 FOV 控制方法,将 MEMS 扫描镜 FOV 随温度的变化量由 3.52° 减小到 0.05° 。通过提高 MEMS 扫描镜 FOV 的稳定性,单目三维相机的测试精度与数据重复性也大大提升,测试性能明显提高。在后续研究中将继续通过提高标定精度、驱动精度以及反馈信号信噪比来提高 MEMS 扫描镜 FOV 的控制精度。

参考文献

- [1] XING Wei, ZHANG Fumin, FENG Wei, et al. Three-dimensional measurement method of objects with specular surface based on digital micromirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1212002.
邢威, 张福民, 冯维, 等. 基于数字微镜器件的高光面物体三维测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1212002.
- [2] SU Xianyu, ZHANG Qican, CHEN Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [3] ZHENG Dongliang, DA Feipeng. Double-step phase-shifting algorithm for fringe-projection measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 86-92.
郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 86-92.
- [4] ZHANG Song. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107(8):28-37.
- [5] SONG Z, WEIDE D, OLIVER J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(9):9684.
- [6] WISSMANN P, FORSTERF, SCHMITT R. Fast and low-cost structured light pattern sequence projection[J]. Optics Express, 2011, 19(24):24657-24671.
- [7] XUE Junpeng, ZHANG Qican, LI Chenghang, et al. 3D face profilometry based on galvanometer scanner with infrared fringe projection in high speed[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7):1458.
- [8] SASAKI M, TABATA M, HAGA T, et al. Piezoresistive rotation angle sensor integrated in micromirror[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(4B):3789-3793.
- [9] ROMBACH S, MARX M, GUSTOPPEL S, et al. Low power and highly precise closed-loop driving circuits for piezoelectric micromirrors with embedded capacitive position sensors[C]. Moems & Miniaturized Systems XV. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [10] KUIJPERS A A, LIEROP D, SANDERS R, et al. Towards embedded control for resonant scanning MEMS micromirror[J]. Procedia Chemistry, 2009, 1(1):1307-1310.
- [11] LEI Hongjie, WEN Quan, YU Fan, et al. FR4-based electromagnetic scanning micromirror integrated with angle sensor[J]. Micromachines, 2018, 9(5):214-214.
- [12] ARYAFAR M, HAMED M, GANJEH M M. A novel temperature compensated piezoresistive pressure sensor[J]. Measurement, 2015, 63:25-29.
- [13] YU Huijun, ZHOU Peng, WANG Keiwei, et al. Optimization of MOEMS projection module performance with enhanced

- piezoresistive sensitivity[J].*Micromachines*, 2020, 11(7):651-651.
- [14] AONUMA T, KUMAGAI S, SASAKI M, et al. Piezoresistive rotation angle sensor in micromirror for feedback control [M]. Springer London, 2010.
- [15] JOHNS G. Modeling piezoresistivity in silicon and polysilicon[J]. *Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 2006, (2):1-5.
- [16] CHO C H, JAEGER R C. Experimental characterization of the temperature dependence of the piezoresistive coefficients of silicon[C]. The Tenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006, ITherm '06, IEEE, 2007.