

# 机器视觉在激光干涉测量 $d_{31}$ 中的应用\*

来志<sup>†</sup> 郭亮 李小珍 党文佳

(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2013年4月17日收到; 2013年6月16日收到修改稿)

提出一种应用机器视觉技术的激光干涉法, 可以研究压电材料的逆压电系数。在传统干涉测量法中引入机器视觉实现干涉图像灰度最佳估计, 使用数字图像处理技术, 一方面应用降噪算法有效去除激光干涉图样的噪声, 从而确定激光干涉场的光强分布, 另一方面将干涉图样的明暗变化进一步转化为可量度的灰度变化以提高测量分辨率。通过合理设计算法, 该方法中对位移的理论测量分辨率可以提高达一个数量级, 为干涉光波长的  $1/1024$ , 因此在逆压电系数  $d_{31}$  的实验测量中可以有效提高分辨率。

**关键词:** 机器视觉, 逆压电系数, 双光束干涉, 数字图像处理

**PACS:** 42.62.Eh, 42.25.Hz, 42.30.Tz, 42.62.-b

**DOI:** 10.7498/aps.62.184207

## 1 引言

压电陶瓷在电场作用下会发生形变。近年来, 随着技术的发展, 以钛酸钡、锆钛酸铅等多晶压电材料为核心制成的压电陶瓷微位移器相继问世, 应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。这种微位移器非常适合于微小位移的控制和精细加工等, 因此被广泛应用于激光器腔长调节等小尺寸的操控领域。压电材料的逆压电系数<sup>[2,3]</sup>决定了压制的微位移器所具有的位移输出能力, 因此逆压电系数例如  $d_{31}$  等的实际测量在科学的研究中有重要的作用。当前, 使用激光双光束干涉法可以实现逆压电系数如  $d_{31}$  的测量。该方法的核心是对微位移器在电场作用下的形变量进行测量, 即将微位移转化为相干激光的光程差变化, 即产生干涉条纹的明暗变化, 通过对条纹明暗变化的计数实现形变测量<sup>[4]</sup>。然后通过位移量与驱动电压的比值获得逆压电系数。

由于对于干涉条纹的明暗变化计数一次只能反映两干涉臂的光程差变化激光波长的四分之一, 这就限制了对逆压电系数的测量分辨率。引入机器视觉技术可以将干涉条纹的明暗变化分为 256 级灰度, 提高干涉光程差的分辨率, 从而提高该方法

的测量分辨率。

机器视觉技术是一种新的极具潜力的高分辨率测量技术, 它综合运用了光电成像技术、数字图像处理技术<sup>[5,6]</sup>和软件技术等。测量中引入机器视觉技术, 结合合理算法, 可以准确快速地获得物体的三维尺度。目前的机器视觉测量系统通常采用数字式照相机拍摄测量图像, 结合相应的图像处理算法提取测量对象的特征值, 在此基础上实现高分辨率测量。

引入机器视觉的激光双光束干涉测量法, 可以替代相对粗糙的条纹计数, 利用数字图像处理技术, 获得激光干涉图样的灰度值, 定量描述激光干涉场的亮度分布, 在 256 灰度等级的图样处理后理论上可以将位移测量分辨率提高两个数量级。在实验中, 通过合理设计图像处理算法, 能够实现干涉图样中条纹灰度的最佳估值, 提高对微位移的测量分辨率, 从而提高对压电材料逆压电系数的测量分辨率。

## 2 测量原理

以逆压电系数  $d_{31}$  为例, 当压电材料工作在 LE 振动模式下, 逆压电系数  $d_{31}$  反映了微位移器在激励电压  $U$  下, 产生应变  $S$  的能力。当激励电压  $U$  施

\* 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: K5051205004)和国家自然科学基金(批准号: 61107006)资助的课题。

† 通讯作者。E-mail: zlai@mail.xidian.edu.cn

加在压电体的 3 轴(极化方向)方向, 在无应力状态下, 无初始位移的微位移器的输出位移为

$$S = d_{31} \times U, \quad (1)$$

因此, 逆压电系数  $d_{31}$  可以通过该位移与激励电压的比值获得.

## 2.1 双光束干涉法测量位移

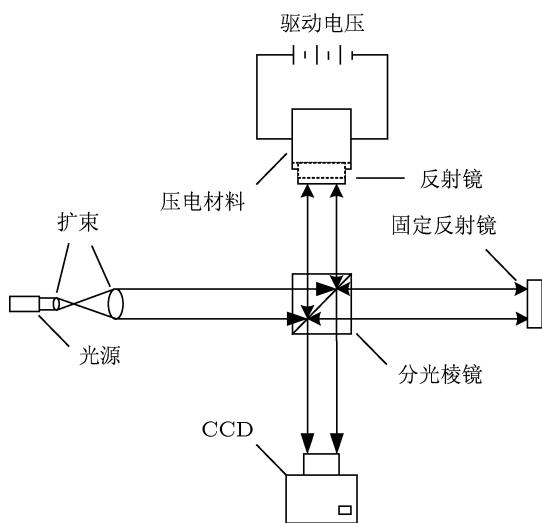


图 1 测量装置原理示意图

图 1 所示为激光双光束干涉测量装置. 由物理光学, 在保证光路准直的前提下, 干涉场的光强度  $I$  满足

$$I = I_0(1 + \cos \varphi), \quad (2)$$

$$\varphi = 2kS_{(v)} + \varphi_1 + \varphi_2, \quad (3)$$

其中  $I_0$  为常数,  $\varphi$  为两激光干涉臂的相位差,  $k$  为激光的波矢量,  $\varphi_1, \varphi_2$  为两干涉臂的激光固有相位,  $S_{(v)}$  为改变电压时微位移器的输出位移变化. 由 (2) 式和 (3) 式可知, 干涉图样中某一点的光强度随驱动电压的变化如图 2 曲线所示.

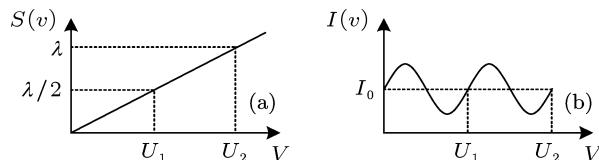


图 2 微位移器输出位移与干涉场某点光强变化 (a) 输出位移; (b) 某点干涉光强

由图 2 可见, 微位移器的输出位移变化二分之一光波长, 激光干涉场中任意点的光强变化为正弦曲线, 且对应为一个周期. 在干涉臂光程差(即微位

移器输出位移)改变时, 通过精确测量激光干涉场中某一点对应的光强曲线的周期数(不一定是整数)即可精确测量微位移器的输出位移. 由 (1) 式可知, 该伸长量与驱动电压的比值, 就是相应压电材料的逆压电系数.

传统的光电二极管的光敏面较大, 无法精确地反映激光干涉场中某点的光强变化, 所获得的光强正弦曲线是光敏面上所有点的平均效果, 由之计算得到的位移量存在较大的误差, 影响逆压电系数的测量分辨力. 机器视觉系统中的 CCD 上每一个像素都可以用来反映激光干涉场中的点光强, 处理干涉臂光程差变化时记录的序列图像可以获得光强的变化, 提高测量分辨力. 因此, 使用机器视觉技术获得 CCD 光强图像中干涉条纹灰度的最佳估计值.

## 2.2 机器视觉获得光强图像灰度的最佳估计

### 2.2.1 干涉图像降噪处理

使用机器视觉系统, 激光干涉场光强变化可以由干涉图样序列中相应像素点的灰度值变化来反映. 图 3(a) 为无噪声实验条件下, 通过仿真理想 CCD 而生成的激光干涉场干涉条纹, 图 3(b) 为本方法验证实验中由于不可避免的光电噪声而获得的实采图样. 因此使用机器视觉系统进行精密测量必须研究相应的降噪算法.

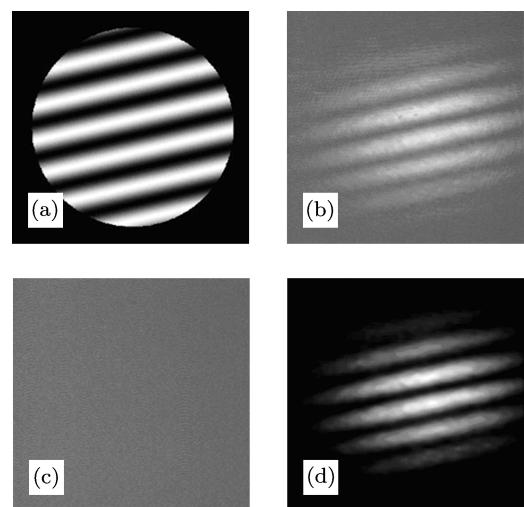


图 3 降噪过程示例 (a) 理想图样; (b) 实采图样; (c) 噪声图样; (d) 降噪后图样

在避免背景光干扰等前提下, 激光干涉图样中噪声<sup>[7,8]</sup>为与激光干涉条纹独立的广义平稳过程<sup>[9]</sup>, 主要为干涉图样上的加性噪声. 因此可以采

用下述方法进行降噪。

在与拍摄激光干涉场条纹图样相同的环境条件下, 拍摄一定数量的无条纹噪声图样(如图3(c)所示). 通过分析噪声图样获得噪声图样中像素点的灰度值方差  $\nu^2$ , 对于拍摄的实验图样, 设每一个像素点的灰度值为  $a(n_1, n_2)$ , 对像素灰度估值需要引入两个参数——均值和方差  $(\mu, \sigma^2)$ . 其中均值

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} a(n_1, n_2), \quad (4)$$

方差

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} a^2(n_1, n_2) - \mu^2, \quad (5)$$

其中  $\eta$  为以某像素点为中心的  $(N \times M)$  个像素点.

通过对一定数量的噪声图样的分析, 掌握激光干涉图样中的噪声特性. 然后对拍摄的激光干涉图样进行降噪处理, 可得到降噪后的图像灰度  $b(n_1, n_2)$ :

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - \nu^2}{\sigma^2} (a(n_1, n_2) - \mu), \quad (6)$$

图3(d)所示为实验中降噪激光干涉场条纹.

## 2.2.2 激光干涉图样灰度估值

由理想仿真图样可知, 理论上降噪后的图样与干涉条纹平行的像素点列的灰度值应该相等. 但由于图样的噪声不能完全消除, 实采的图样降噪后对应像素点列的灰度值虽然差异不大, 但是有所不同. 鉴于此, 可以采用贝叶斯后验概率实现对像素点列灰度的估值.

首先在降噪后的图样上确定平行于干涉条纹的像素点列的位置信息, 可以通过设置不同阈值的二值化方法得到, 然后在图样中取这样的像素点  $p$  列, 每列中包含  $q$  个像素, 应依据  $3\sigma$  准则<sup>[10]</sup> 去除掉具有离群灰度值的像素, 该像素离群值产生于CCD表面坏点, 之后可将该像素列中出现最多的灰度值定为此像素列的灰度.

## 2.2.3 干涉图样序列灰度变化

由干涉条纹的产生原理可知, 在图1所示装置中的压电材料上施加电压, 随着电压的变化对应每一个驱动电压拍摄一张干涉图样, 可以获得一组干涉图样序列. 如此CCD上  $p$  列像素的在一组干涉图样序列中的光强变化应该相同, 但是不同列像素存在相位差. 因此先估值单列像素在一组图样序列中的灰度变化, 然后平移  $p$  列像素对应曲线, 平移

后曲线取算术平均获得图样序列光强变化曲线以减小测量实验误差.

图4(a)为CCD上与干涉条纹平行的像素列在一组经过降噪的干涉条纹图样序列中的灰度平均值变化, 取  $p$  列像素将变化曲线相位平移并取平均, 该序列中共有  $m$  幅干涉图样; 图4(b)为利用贝叶斯后验概率对光强进行最佳估值后的曲线, 实际测量可做  $n$  组实验, 对结果进行算数平均以减小误差; 图4(b)曲线进行正弦拟合为图4(c), 即干涉图样序列中像素灰度变化的最佳估值.

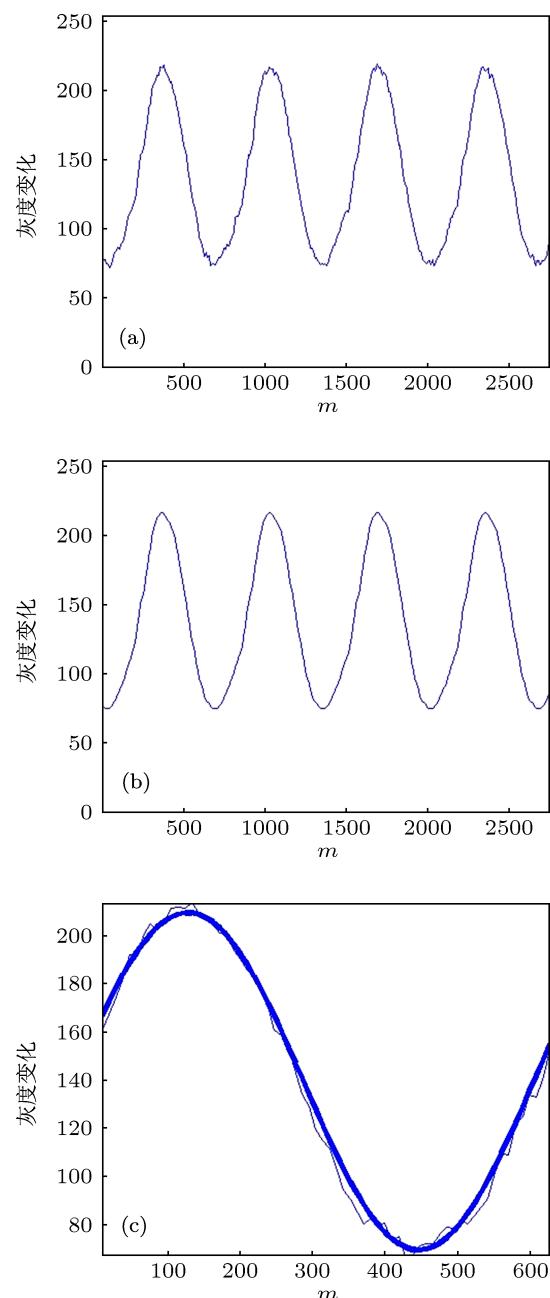


图4 像素在图样序列中灰度变化 (a) 降噪后未估值; (b) 估值后曲线; (c) 正弦拟合结果

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验测量

如图 1 所示测量实验系统, 相干光由波长为 632.8 nm 的稳频 He-Ne 激光器发出, 该激光通过空间滤波并进行扩束, 空间滤波是为了保证实验中的光斑质量, 扩束得到较大的光斑方便实验操作.

首先用型号为 HB-Z501-10AC 的高稳定直流电压源在压电材料上加载电压, 从 0 V 开始增加, 每 0.05 V 拍摄一次, 若一组测量拍摄  $m$  幅, 此时电压应增至  $[(m/20)-0.05]$  V, 可重复测量  $n$  组. 处理图样数据时取 CCD 上的  $p$  列像素列, 其中每列有  $q$  个像素. 在测量试验中一组拍摄  $m=2201$  幅干涉图样, 重复测量  $n=10$  组, 取  $p=10$  列像素列, 每列有  $q=100$  个像素. 使用高斯牛顿法和最小二乘逐次逼近法进行正弦拟合, 为使图文表达清楚, 图 4(c) 为一个周期的结果.

对试验中测量结果进行统计, 在驱动电压增加过程中干涉场中各点光强变化的正弦曲线周期数为 3.3334 个, 相应的微位移器伸长为 1.6667 个激光波长. 测量过程中微位移器电压变化为 110 V, 可知微位移器伸长为

$$\begin{aligned}\Delta L &= \lambda \times 2.0758 \\ &= 0.6328 \mu\text{m} \times 1.6667 \approx 1.055 \mu\text{m}.\end{aligned}\quad (7)$$

在不同环境条件下进行对比试验, 验证测量方法是否对环境有依赖. 在室温条件为 10—30 °C, 湿度条件在 30%—60% 的不同环境下进行多次测量. 其中 50 组的对比结果如图 5 所示, 试验中均值为  $9.588 \times 10^3$  pC/N, 标准离差为 70 pC/N, 说明此方法无明显受环境条件影响.

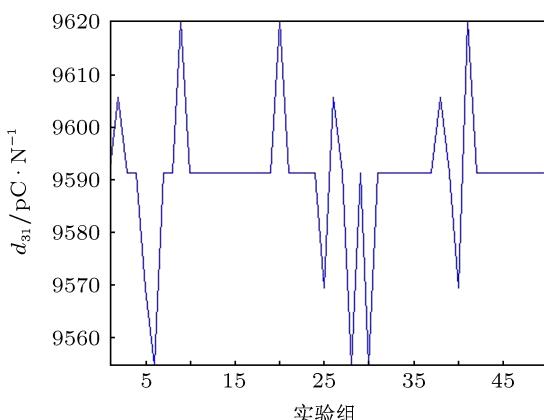


图 5 实验结果

由 (1) 式可知逆压电系数

$$\begin{aligned}d_{31} &= \frac{S}{U} = \frac{0.6328 \mu\text{m} \times 1.6667}{110 \text{ V}} \\ &\approx 9.588071 \times 10^3 \text{ pC/N},\end{aligned}\quad (8)$$

该结果符合微位移器生产厂家提供的参数.

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 测量试验

此测量方法中从干涉图样序列的灰度变化提取压电材料的逆压电效应产生的长度变化, 灰度由极大 (255) 变化到极小 (0) 反映的长度变化为激光波长的四分之一. 如果缓慢增加压电材料上的驱动电压, 使得干涉场中 CCD 像素点的灰度从最大变为最小所拍摄的图样数量大于等于 256 幅, 由于像素点由最亮变为最暗对应的长度变化为波长的四分之一, 所以长度分辨力理论上最高可达激光波长的 1/1024, 达到亚纳米级.

要达到该分辨力需要驱动设备 (如高压直流源等) 具有较高的稳定性, 同时对于图像的降噪算法提出了较高的要求, 客观上不易达到. 经过试验, 比条纹计数在长度的实测分辨力上可以提高一个数量级达到十纳米级, 因此可以大大提高  $d_{31}$  的测量分辨力.

##### 3.2.2 试验注意事项

由于商用 CCD 的光学成像系统存在像差, 使得 CCD 面阵列成像时存在像素点暗角, 因此干涉图样在成像系统对应的非傍轴像素点光强较低, 所以应选取傍轴像素点列.

### 4 结论

将机器视觉技术应用于材料的逆压电系数研究当中, 可以更加精确地描述材料形变导致的干涉条纹变化. 由于在越来越多应用场合中, 需要对压电材料逆压电系数  $d_{31}$  有更高分辨力的测量, 基于机器视觉技术的测量方法可以提高材料逆压电系数  $d_{31}$  的测量分辨力. 通过适当的图像处理算法获得干涉场光强图像中条纹灰度的最佳估计值, 长度测量分辨力达到了十纳米数量级, 因此在对等效逆压电系数  $d_{31}$  为 10000 pC/N 数量级的压电微位移器的测量分辨力达到 70 pC/N. 同时由于基于图样灰度的估值可以更好地反映光强分布, 本方法的测量思想可推广至其他的光学高分辨测量.

- [1] Jae Lee H, Zhang S, Meyer R J, Sherlock N P, Shrout T R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 032902
- [2] Dekkers M, Boschker H, van Zalk M, Nguyen M, Nazeer H, Houwman E, Rijnders G 2013 *J. Micromech. Microeng.* **23** 025008
- [3] Chen D R, Li G R, Yin Q R 1997 *J. Inorganic Mater.* **12** 861 (in Chinese) [陈大任, 李国荣, 殷庆瑞 1997 无机材料学报 **12** 861]
- [4] Wu X M, Chen J B, Zhu R H, Cheng L J, Wang Q, Zhu Q S 2002 *Infr. Laser Engin.* **31** 257 (in Chinese) [吴新民, 陈进榜, 朱日宏, 程丽君, 王青, 朱应时 2002 红外与激光工程 **31** 257]
- [5] Ji C, Zhang L Y, Dou S X, Wang P Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098703 (in Chinese) [季超, 张凌云, 窦硕星, 王鹏业 2011 物理学报 **60** 098703]
- [6] Fan W X, Zhang M, Wang X M 2004 *J. Xi'an Univ. Engin. Sci. Tech-* **nol.** **18** 160 (in Chinese) [樊文侠, 张敏, 王新明 2004 西安工程科技大学学报 **18** 160]
- [7] Yan Z G, Lin Y L, Yang J, Li Z H, Bian B M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 200502 (in Chinese) [闫振纲, 林颖璐, 杨娟, 李振华, 卞保民 2012 物理学报 **61** 200502]
- [8] Lin Y L, Yan Z G, Yang J, Wang C Y, Bian B M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100505 (in Chinese) [林颖璐, 闫振纲, 杨娟, 王春勇, 卞保民 2012 物理学报 **61** 100505]
- [9] Mesarović V Z, Galatsanos N P, Wernick M N 2000 *JOSA A* **17** 711
- [10] Ni Y C 2009 *Shiying Celiang Buquedingdu Pingding* (Beijing: China Metrology Publishing House) p107 (in Chinese) [倪育才 2009 实用测量不确定度评定 (北京: 中国计量出版社) 第 107 页]

# Application of machine vision to the measurement of the effective $d_{31}$ coefficient in laser interferometry\*

Lai Zhi<sup>†</sup> Guo Liang Li Xiao-Zhen Dang Wen-Jia

(School of Physics Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 17 April 2013; revised manuscript received 16 June 2013)

## Abstract

A novel method based on machine vision is proposed for measuring the effective  $d_{31}$  coefficient. Based on the best estimation of gray scale of interference pattern, the sensitivity of the twin-beam interferometry is significantly improved in comparison with previously reported system. Firstly, the interference pattern grabbed by machine vision system is extracted using the algorithm developed in this work. Secondly, using gray-scale pattern with 256 gray-levels the measurement accuracy of the interferometric optical path difference of the interferometer can reach 1/1024 of the wavelength of the laser theoretically. So the experimental results of a PZT pipe in the method are greatly accurate.

**Keywords:** machine vision, inverse piezoelectric coefficient, double-beam interferometry, digital image processing

**PACS:** 42.62.Eh, 42.25.Hz, 42.30.Tz, 42.62.-b

**DOI:** 10.7498/aps.62.184207

\* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. K5051205004), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107006).

† Corresponding author. E-mail: zlai@mail.xidian.edu.cn