

文章编号:1004-4213(2010)02-0316-4

基于载频条纹相位分析的畸变测量和校正^{*}

杨初平, 翁嘉文, 王健伟

(华南农业大学 物理系, 广州 510642)

摘要: 为了对图像畸变进行测量和校正, 利用纵向朗奇(Ronchi)载频条纹作为测量模板, 通过成像系统获取畸变光栅条纹, 运用傅里叶变换对畸变条纹图像进行频谱分析、滤波提取基频信息, 直接从畸变图像的中心无畸变区域提取理想条纹像信息, 通过相位分析提取包裹相位并解包, 获得畸变光栅条纹的径向畸变相位分布规律, 将该分布规律转化为径向位置畸变分布规律, 并结合双线性插值灰度重建对畸变图像进行校正, 实验结果证明该方法是有效的。

关键词: 光学测量; 图像畸变; 畸变测量; 载频条纹; 相位分析

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0316

0 引言

在光电成像系统中, 成像光学系统的固有特性使得数字图像存在畸变, 对图像几何畸变进行测量和校正一直受到人们的重视^[1-4], 文献[5]采用网格模板研究光电成像系统图像畸变校正算法; 文献[6]应用一个 22 行 32 列的方点阵列研究了大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正; 文献[7]提出了采用灰色圆点黑色间带图案的综合点阵靶板方法, 用这些方法找到畸变像和理想像中所有对应控制点对坐标之间的变换关系, 然后根据这种映射关系对畸变图像进行变换校正。

上述的几种方法为了测量畸变分布规律, 需要通过理想成像模型, 结合成像系统参量, 推算理想像点位置; 然后通过图像处理得到畸变图像上测量模板上采样点的畸变坐标; 还需要调整光轴对准模板中心。

本文提出一种成像系统畸变测量新方法: 采用纵向(垂直 x 轴)朗奇(Ronchi)载频条纹——纵向灰度光栅作为测量模板, 经过成像系统后获得它的畸变图像——变形光栅条纹, 变形灰度光栅条纹相对于理想灰度光栅像将产生条纹移动, 考虑到成像光学系统相对光轴的旋转对称性, 只要分析通过该变形光栅图像中心的 x 轴(正半轴或者负半轴)上各个像素点相对于理想灰度光栅像对应点的相位畸变量并转换为长度畸变量, 就可以获取径向畸变分布规律, 从而获得畸变图像与理想图像的变换关系, 实现畸变图像的校正。

本文的测量方法的特点: 调整比较容易, 只需要保持条纹垂直横轴并调整光轴垂直测量模板就可以; 同时不需要通过理想成像模型, 直接在畸变图像上中心的无畸变区域提取无畸变的条纹频率和相位, 建立理想条纹像。

1 图像畸变模型

设未畸变图像为 $i(x, y)$, 畸变图像为 $d(x', y')$, (x, y) 与 (x', y') 分别表示畸变前后同一个控制点的坐标, 由于畸变, 两者的对应关系可表示为

$$\begin{cases} x = p_1(x', y') \\ y = p_2(x', y') \end{cases} \quad (1)$$

由于成像系统对光轴的旋转对称性, 以图像与光轴交点 (x_0, y_0) 为坐标原点, 则与原点相同距离的点具有相同的畸变量, 于是, 若 $r(x, y) = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{1/2}$ 、 $r'(x', y') = [(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2]^{1/2}$ 分别表示点 (x, y) 、 (x', y') 距离原点的半径, 则两幅图像对应点的关系可以表示为

$$r = p(r') \quad (2)$$

只要获得式(2)的表达式, 就可以对畸变图像进行校正。

2 径向畸变测量

2.1 载频条纹相位分析

测量原理如图 1。图中虚线为测量光栅条纹, 实线表示畸变后的条纹。以纵向朗奇(Ronchi)电子灰度光栅(光栅线垂直 x 轴)作为测量图像径向畸变的模板, 由数字投影系统 DLP 投影到平整的参考物体表面, 光轴垂直该模板所在平面的成像系统获取的畸变图像——变形灰度光栅图像可以表示为^[8]

^{*} 广东省自然科学基金(9151064201000035)资助

Tel: 020-85280324

Email: yangchp@scau.edu.cn

收稿日期: 2009-03-24

修回日期: 2009-05-15

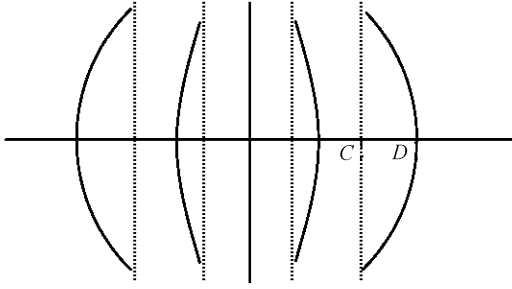


图1 畸变示意图

Fig.1 Distortion of fringe pattern

$$g_d(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{dn} \exp \{j[2\pi n f_0 x + \phi_{dn}(x, y)]\} \quad (3)$$

理想光栅图像表示为

$$g_r(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{rn} \exp \{j[2\pi n f_0 x + \phi_{rn}(x, y)]\} \quad (4)$$

式(3)、(4)中 f_0 是光栅图像的基频; A_{dn} 和 A_{rn} 表示傅里叶分量的振幅; $r(x, y)$ 是物体表面的非均匀反射率, $\phi_{dn}(x, y)$ 是经光学成像系统畸变调制后的光栅条纹的相位, $\phi_{rn}(x, y)$ 是理想光栅条纹的初相位. 由于 CCD 是离散探测器件, 为了满足采样要求, 在获取条纹图像时, 必须保证最小的条纹周期大于四个像素点. 实验用的光栅图像周期为 640/62 个像素. 测量变形光栅图像相对于理想光栅图像的相位移动只需要它们的基频信息, 因此, 固定式(3)所表示的变形光栅图像中的 y 值, 对每一行光栅图像进行傅里叶变换得到其频谱分布. 在频域中进行滤波处理, 提取含有畸变信息的基频分量, 然后进行逆傅里叶变换回到空域, 得到变形光栅图像的基频信息

$$g_{d_1}(x, y) = r(x, y) A_{d_1} \exp \{j[2\pi f_0 x + \phi_{d_1}(x, y)]\} \quad (5)$$

对理想光栅图像进行同样的处理, 得到理想光栅图像的基频信息为

$$g_{r_1}(x, y) = A_{r_1} \exp \{j[2\pi f_0 x + \phi_{r_1}(x, y)]\} \quad (6)$$

将式(5)与式(6)共轭式相乘取对数, 得

$$\log[g_{r_1}^*(x, y) g_{d_1}(x, y)] = \log[|A_{r_1} A_{d_1}| r(x, y)] + j[\Delta\phi(x, y)] \quad (7)$$

分离式(7)虚部得到纯粹由畸变所引起的相位调制量 $\Delta\phi(x, y)$

$$\Delta\phi(x, y) = \text{Im} \{ \log[g_{r_1}^*(x, y) g_{d_1}(x, y)] \} = \phi_{d_1}(x, y) - \phi_{r_1}(x, y) = 2\pi f_0 \overline{CD} \quad (8)$$

式(8)中的相位调制量就是表示畸变光栅图像各个像素点相对理想光栅图像的相位调制量.

对畸变图像校正而言, 考虑到成像系统的圆对称性, 只有经过图像坐标原点的 x 轴上各个像素点的相位调制量才与径向畸变量有关.

2.2 理想光栅像的建立

要测量变形光栅图像各个像素点的相位调制量, 必须获得没有畸变的理想光栅图像. 通常, 以畸变图像上坐标原点为中心的一个很小圆形区域由于靠近光轴, 畸变很小, 可以认为是没有畸变. 因此, 为了建立没有畸变的理想光栅图像, 采用一个高斯分布函数作为窗口, 以变形光栅图像原点为高斯函数对称中心, 对 x 轴上高斯窗口里面的局部像素点进行傅里叶分析, 提取其中频谱分布中的基准频率和相位, 然后逆傅里叶变换获得一幅没有畸变的光栅图像, 作为理想光栅图像.

2.3 相位调制量与径向畸变量的关系

为了校正畸变图像, 必须把获得相位调制量转换为像素点位置变化的径向畸变量. 考虑到成像系统的旋转对称性, 只要测量 x 轴上正半轴或者负半轴上各个像素点的径向畸变量, 就可以获得畸变图像上所有点相对于原点的径向畸变量. 对于 x 轴上正半轴或者负半轴上各个像素点, 相位调制量 $\Delta\phi$ 与径向畸变量 Δr 的关系为

$$\Delta\phi = \Delta\phi(x, \frac{\Delta y}{2}) = 2\pi f_0 \overline{CD} = \Delta r 2\pi f_0 \quad (9)$$

式中 Δy 表示图像在 y 方向宽度, $x \in [1, \Delta x/2]$, Δx 表示图像在 x 方向长度.

3 图像畸变校正

校正后图像中某个像素点灰度值与畸变图像中同一点的灰度值的关系为

$$i[r(x, y)] = d[r'(x', y')] = d[r(x, y) + \Delta r] = d\left[r(x, y) + \frac{\Delta\phi}{2\pi f_0}\right] \quad (10)$$

校正图像中的坐标 (x, y) 是整数, 但计算得到的坐标 (x', y') 却不一定为整数. 常用灰度插值算法计算校正图像中像素点的灰度值, 有最近邻法、双线性插值法和三次卷积法^[5]. 双线性插值法具有计算简单、能克服灰度不连续等特点, 具体操作如下: 设点 (x', y') 落在四个像素点 $([x'], [y'])$ 、 $([x'] + 1, [y'])$ 、 $([x'], [y'] + 1)$ 、 $([x'] + 1, [y'] + 1)$ 之间, 其中 $[x']$ 、 $[y']$ 分别是不超过 x' 、 y' 的整数, 则用双线性插值法获得的复原点 (x, y) 的灰度值为

$$i[r(x, y)] = (1-\alpha)(1-\beta)d([x'], [y']) + \alpha(1-\beta)d([x'] + 1, [y']) + (1-\alpha)\beta d([x'], [y'] + 1) + \alpha\beta d([x'] + 1, [y'] + 1) \quad (11)$$

式中 $\alpha = x' - [x']$, $\beta = y' - [y']$.

4 实验结果

图2是光轴调整好通过图像中心的成像系统获

得的畸变图像,原来尺寸为 640×480 pixels,这里以原来图像中心点对称截取尺寸为 440×440 pixels,畸变图像显然属于桶形畸变,坐标原点位于畸变图像中的像素位置(220,220), x 轴位于 $y = 220$ 的像素行上.对畸变条纹图像进行傅里叶频谱分析,滤波提取正一级谱,与理想条纹图像一起进行相位分析,提取包裹相位并进行解包处理;由于本实验采用的光栅周期约为10个像素,以半个像素间距计算,因此相位展开达到的准确度不大于 $\pi/10$ 弧度;图3是原来畸变图像中 x 轴上各个点的相位畸变量分布曲线, y 轴表示相位畸变量;坐标原点(光轴中心)位于图中的 $x = 320$ 处,只要把处于 $x \in [1, 320]$ 的各个像素的相位畸变量取反号,则位置处于 $x \in [1, 320]$ 的各个像素的相位畸变量与位置处于 $x \in [321, 640]$ 的各个像素的相位畸变量是左右对称的;图中折线代表测量数据,点滑线代表经过三次多项式拟合后的数据.图4采用 $x \in [1, 320]$ 的各个像素点的相位畸变量的拟合数据校正后的图像.图5和图6分别是畸变图像和校正图像中第220行的频谱,对比后校正图像的基准频谱比较窄.以半个像素间距作为分辨极限,基于这种方法获得的校正准确度小于0.5个像素点.

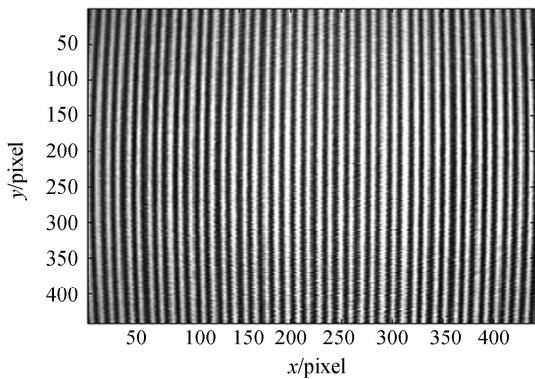


图2 畸变光栅
Fig. 2 Distorted image

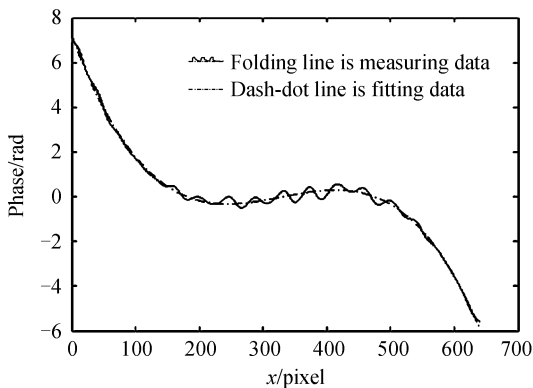


图3 径向相位畸变量
Fig. 3 Radial distortion distribution

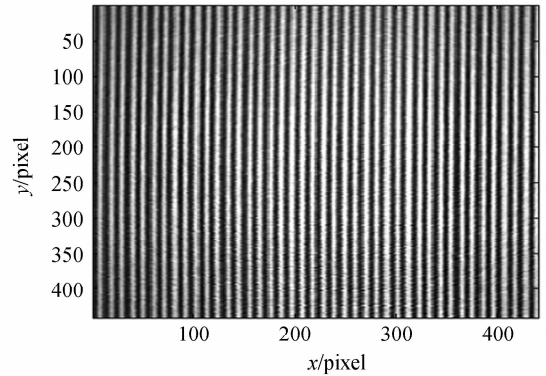


图4 校正光栅
Fig. 4 Corrected image

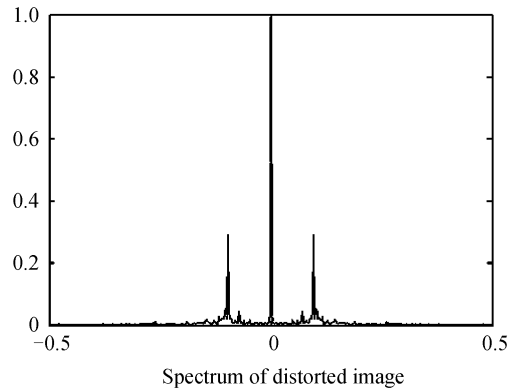


图5 畸变光栅第220行频谱分布
Fig. 5 Spectrum of the 220th row in distorted image

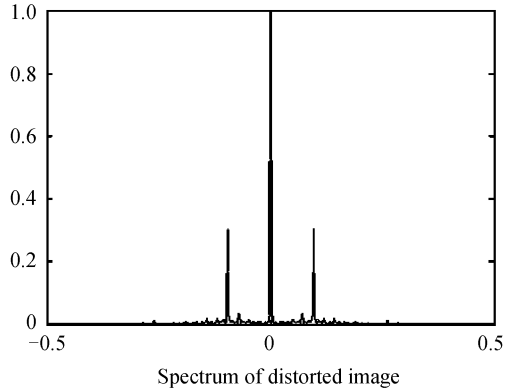


图6 校正光栅第220行频谱分布
Fig. 6 Spectrum of the 220th row in calibrated image

5 结论

提出一种测量图像畸变新方法:以载频条纹作为成像系统畸变测量模板,通过测量畸变光栅图像与理想光栅图像的相位调制量,并转换为径向畸变量,最后实现对畸变图像的校正.与其他方法(需要尽量调整光轴对准模板中心)比较,本文的测量方法调整比较简单,只需要保证光轴垂直与测量模板平面;为了保证采样要求,要求畸变条纹像的最小周期要大于4个像素点;该方法不需要通过理想成像模型获得理想像点的位置,直接从畸变条纹像中提取中心无畸变条纹的基准频率和相位信息从而获得理想条纹像.

参考文献

- [1] NOMURA Y, SAGARA M, NURUSE H. Simple calibration algorithm for high-distortion-lens camera [J]. *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(11):1095-1099.
- [2] LIU Jin-gen. A Rectification algorithm for photoelectric image with distortion based on method of onsite ascertained standard [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):732-735.
刘金根. 一种基于现场定标的光电图像畸变校正算法[J]. 光子学报, 2004, **33**(6):732-735.
- [3] MA Li-hua, LIANG Zhi-yi, ZHENG Hong-zhi. A geometric rectification method for imaging system by display projecting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5):624-627.
马丽华, 梁志毅, 郑宏志. 一种显示器投影成像系统的彩色图像几何校正方法[J]. 光子学报, 2001, **30**(5):624-627.
- [4] WANG Hu, MIAO Xing-hua, HUI Bin. The distortion correct of short focus wide-angle optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11):1409-1412.
王虎, 苗兴华, 惠彬. 短焦距大视场光学系统的畸变校正[J]. 光子学报, 2001, **30**(11):1409-1412.
- [5] NIU Jian-jun, LIU Shang-qian, YAO Rong-hui, *et al.* Algorithm for image correction in high precision imaging measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1317-1819.
牛建军, 刘上乾, 姚荣辉, 等. 高准确度光电成像测量系统图像畸变校正算法[J]. 光子学报, 2006, **35**(9):1317-1819.
- [6] XING Mai-ling, LIU Jian-ping, LIN Jia-ming, *et al.* Distortion measurement of CCD camera with a large-field, short focal length lens [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3):377-379.
行麦玲, 刘贱平, 林家明, 等. 大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正[J]. 光学技术, 2003, **29**(3):377-379.
- [7] YU Jun, LIN Jia-ming, YANG Jian-yu, *et al.* Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1440-1442.
余俊, 林家明, 杨建宇, 等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(8):1440-1442.
- [8] MITSUO TAKEDA, KAZUHIRO MUTOH. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(24):3977-3982.

Distortion Measurement and Calibration Technique Based on Phase Analysis for Carrier-fringe Pattern

YANG Chu-ping, WENG Jia-wen, WANG Jian-wei

(Department of physics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to measure and correct a distorted image, a vertical Ronchi carrier-fringe pattern is used as measuring template, and a distorted grating pattern is captured by the imaging system. Fourier transform method is adopted to analyze the spectrum of the distorted fringe pattern, and the fundamental spectrum is extracted by filtering. An ideal image is obtained from the central region of the distorted image, where there is no distortion, and the unwrapped phase distribution and radial wrapped phase distribution are obtained by fringe analysis. The radial phase distribution is converted to the radial distortion distribution, and the corrected image is obtained utilizing the radial distortion distribution and bilinearity interpolation. The experiment results show that the method is valid.

Key words: Optical measurement; Image distortion; Distortion measurement; Carrier-fringe pattern; Phase analysis



YANG Chu-ping was born in 1970. He obtained the M. S. degree in 1996 from South China Normal University. Now he is a lecturer at South China Agricultural University.