

CCD 非线性及其校正研究*

乔闹生

(湖南文理学院 物理与电子科学学院, 湖南 常德 415000)

摘要:分析了 CCD 非线性产生的原因,提出了 CCD 非线性校正的新方法——多点多段线性逼近法.给出了 CCD 非线性产生及校正方法的简单公式推导及物理解释.通过计算机模拟和实验进一步验证了 CCD 非线性校正之后,明显地减小了 γ 级频谱的产生.模拟情况下物体面形恢复后的标准偏差明显减小:未校正时为 0.040 7 mm,校正之后时为 0.025 2 mm;实验情况下校正之后的物体恢复面形效果明显优于未校正时的效果.

关键词:傅里叶变换轮廓术;CCD 非线性;校正方法; γ 级频谱

中图分类号: O438.2; TN386.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2008)11-2305-5

0 引言

自 1983 年 Takeda 等人提出傅里叶变换轮廓术测量方法^[1]以来,该方法得到了广泛应用^[2-4].但用该方法测量物体时,由于实际工作中 CCD 的非线性原因^[2-5],用 CCD 摄像机获取物体的变形条纹进行傅里叶变换后,频谱中除了产生零频及包含物体高度信息的基频外,还会产生 γ 级频谱,从而可能与基频发生混叠,影响了物体面形的恢复及测量准确度^[2-4,6].

为了使物体面形得到良好的恢复,提高物体的测量准确度,不少学者对 CCD 非线性进行了研究,主要集中在 CCD 非线性产生高级频谱及高级频谱对包含物体高度信息的基频产生混叠所导致的影响^[2-4,6];也有不少学者提出了 CCD 非线性的校正方法,如两点多段校正法^[4]、查表法^[7]、软件校正法^[8]、CCD 像素光电响应不均匀性校正法^[9]、多点因子加权法^[10].

为了更精确地恢复物体面形,本文从实际工作中 CCD 非线性出发,推导出了 CCD 非线性产生原因的物理公式,并给出了简单的物理解释;提出了一种减小或消除 CCD 非线性的新方法——多点多段线性逼近法:该方法将 CCD 产生的非线性曲线分成若干个折线段,每一个折线段逼近相应区间的实际曲线段.然后连接第一折线段的起点与第二个折线段的终点组成新的折线段,使之逼近第一、第二个折线段,再用同样方法使新的折线段与第三个折线段

组成的另一个新的折线段逼近新的折线段与第三个折线段.依次类推,最后得到的一逼近整个曲线的折线段.

1 基本原理

1.1 CCD 非线性的产生

理想情况下 CCD 的输出光强与输入光强存在线性关系.在 CCD 摄像系统中采取的变形结构光场为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos [2\pi f_0 x + \Phi(x, y)] \quad (1)$$

参考平面的变形结构光场为

$$I_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos [2\pi f_0 x + \Phi_0(x, y)] \quad (2)$$

式(1)和式(2)中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为物面非均匀反射率, f_0 为光栅的基频, $\Phi(x, y)$ 为物体高度分布引起的相位调制, $\Phi_0(x, y)$ 为物体高度 $h(x, y) = 0$ 时的相位调制.

实际工作的 CCD 输出的变形结构光场 $I'(x, y)$ 与输入的变形结构光场 $I(x, y)$, 具有一定的非线性效应^[2-4,6].其关系为

$$I'(x, y) = e_0 + eI(x, y) \quad (3)$$

参考平面的变形结构光场为

$$I'_0(x, y) = e_0 + eI_0(x, y) \quad (4)$$

由式(1)与式(3)可得

$$I'(x, y) = k_0 + k \exp(i2\pi\gamma f_0 x) + k^* \exp(-i2\pi\gamma f_0 x) = k_0 + k_1 \exp(i2\pi f_0 x) + k_1^* \exp(-i2\pi f_0 x) + k_\gamma \exp(i2\pi\gamma f_0 x) + k_\gamma^* \exp(-i2\pi\gamma f_0 x) \quad (5)$$

式(3)~式(5)中的 e_0 为常量, e 为非线性比例因子, γ 为传输指数因子, $k_0, k_1, k_\gamma, k_1^*, k_\gamma^*$ 是与比例因子、相位等有关的系数.对式(5)沿 x 轴方向进行一维快速傅里叶变换可得

$$G'(f, y) = k'_0(f, y) + k'_1(f - f_0, y) + (k_1^*)'(f + f_0, y) + k'_\gamma(f - \gamma f_0, y) + (k_\gamma^*)'(f + \gamma f_0, y) \quad (6)$$

*湖南省教育厅科研基金(08C617)、湖南省“十一五”重点建设学科——光学基金和湖南文理学院科研重点项目(JJZD0702)资助
Tel: 0736-7186121-6 Email: naoshengqiao@163.com
收稿日期: 2007-06-18

同理,对参考平面的变形结构光场进行上述一系列的变换.选择合适的带通滤波器滤出其中的一个基频,对其进行逆傅里叶变换,得到实际情况下还原物体的高度信息为^[1]

$$h(x, y) = -\frac{L_0 \Phi(x, y)}{2\pi f_0 d} \quad (7)$$

式(7)中的 L_0 为摄影装置入瞳到参考平面间的距离, d 为投影装置出瞳与摄影装置入瞳间的距离.

由式(6)可见,频谱中除了零频及包含物体高度信息的基频外,还含有 γ 级频谱.因 $\gamma \neq 1$ (否则为理想的线性情况),则 γ 级频谱可能与包含物体信息的基频发生混叠,从而影响式(7)中物体高度的恢复,使恢复的物体面形失真.

1.2 CCD 非线性的校正

为了使物体面形得到很好的恢复,就必须尽可能减小或消除 CCD 引起的非线性影响.若在图像输入到 CCD 成像系统之后进行非线性到线性的转换,则 CCD 最后采取到的是线性结构光场.为了得到线性的输出变形结构光强,令式(3)中的 $[I(x, y)]^\gamma = I_1(x, y)$, 则式(3)变为

$$I'(x, y) = e_0 + e_1 I_1(x, y) \quad (8)$$

式中 $I_1(x, y)$ 称为输入校正光强.可见,输出变形结构光强与输入校正光强呈线性关系.对式(8)沿 x 轴方向进行快速一维傅里叶变换可得

$$G''(f, y) = k'_0(f, y) + k''_1(f - f_0) + (k_1^*)''(f + f_0) \quad (9)$$

从式(9)可见,对校正后的输出光强进行快速傅里叶变换后的频谱中只含有零频与包含物体高度信息的基频.选择合适的滤波器滤出基频,再对其进行傅里叶变换,就可以很好地恢复物体的面形.

由于 CCD 输出的实际变形结构光场是非线性曲线,如图 1,对其变形条纹进行傅里叶变换时必然产生 γ 级频谱,因此必须对其进行线性校正.把实际输入量 $I(x, y)$ 分成若干个均匀的区间,使每个区间的端点值 I_{k-1} 都对应一个输出值 I'_{k-1} , 连接点 $a(I_{k-1}, I'_{k-1})$ 与点 $b(I_k, I'_k)$, 得到一个折线段.在第 k 个折线段内,任一输出值 I' 与实际输入值 I 的关系为

$$I' = I'_{k-1} + \frac{I'_k - I'_{k-1}}{I_k - I_{k-1}}(I - I_{k-1}) \quad (10)$$

这样,整个曲线被划分为若干个曲线段,每个曲线段对应一个折线段,每一个折线段可近似代替相应区间的实际曲线段.例如,图 1 中第 k 个折线段内的 c 点逼近 d 点,即可用 c 点近似代替 d 点.然后,用 MATLAB 等语言编制程序,把每个折线段起点的实际输入量 I_0, I_1, \dots, I_n 及相应折线段的斜率存

于计算机的内存中,当计算机对响应曲线进行校正时,可根据内存中的数据找到相应的折线段,由式(10)可得到各个曲线段最后的校正值.于是,所有的曲线段均被校正为相应的折线段.

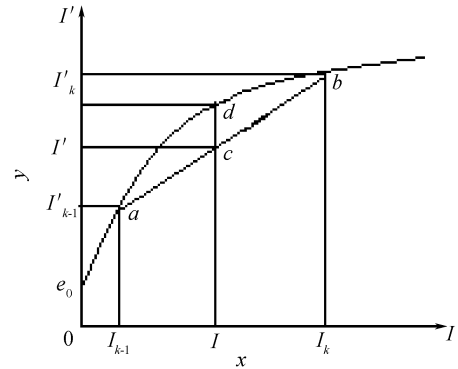


图 1 CCD 非线性校正示意

Fig. 1 Diagram to be adjusted for the nonlinearity of CCD

然后,连接第一个折线段的起点与第二个折线段的终点得到一个新的折线段,用上述同样的方法使新的折线段逼近第一个折线段与第二个折线段.则第一个折线段与第二个折线段被校正为新的折线段,再使新的折线段与第三个折线段校正为另一个新的折线段,依次类推,最后得到一个折线段,即近似为整个曲线校正之后的直线.这样,CCD 最后输出的变形结构光场 $I'(x, y)$ 与输入校正的变形结构光场 $I_1(x, y)$ 之间就存在着线性关系.

2 计算机模拟与实验验证

2.1 计算机模拟

为了验证理论分析的正确性,现用 MATLAB 语言进行模拟,模拟物体是一个底边长为 54 mm, 高为 27 mm 的三角形,系统测量范围为 202 mm,如图 2.测量系统的结构参量 $L_0 = 900$ mm, $d = 200$ mm;在基准面上的正弦光栅周期为 $T_0 = 1/f_0 = 3$ mm;取式(3)中正弦光栅产生的光强为 $I(x, y) = 0.6 + 0.4 \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]$, $e_0 = 0.070 0$, $e = 0.878 1$, $\gamma = 1.802 5$;将实际输入量 $I(x, y)$ 分成 30 个均匀的区间,从而得到输出变形结构光场曲线的 30 个折

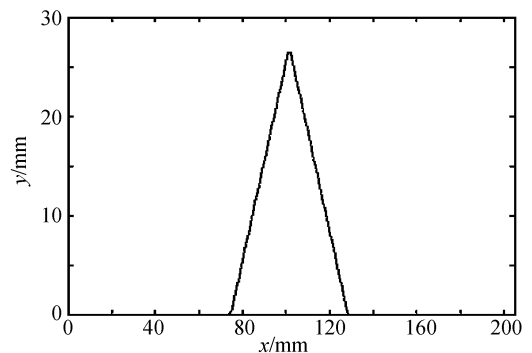


图 2 模拟物体

Fig. 2 Object to be simulated

线段. 对变形条纹进行抽样, 使其满足抽样条件^[2-3,11]. 未进行非线性校正和进行了非线性校正的变形条纹所产生的频谱分别如图 3(a)和(b); 误差如图 3(c)和(d). 由图 3(a)和(b)可见, 未进行非线性校正的频谱中产生了除零频、基频以外的其它级

次的频谱, 而进行了非线性校正的频谱中只产生了基频; 由图 3(c)和(d)可见, 未进行非线性校正恢复的物体的误差较大, 进行了非线性校正后恢复的物体的误差较小, 标准偏差分别为 0.040 7 mm、0.025 2 mm.

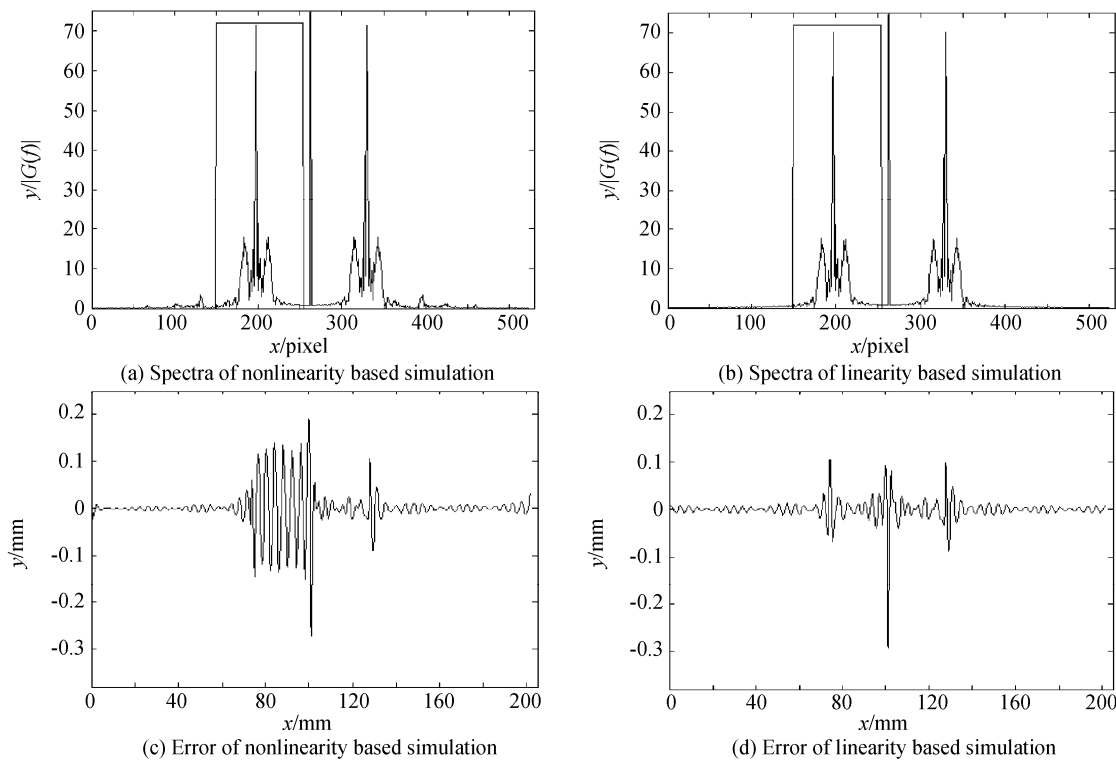
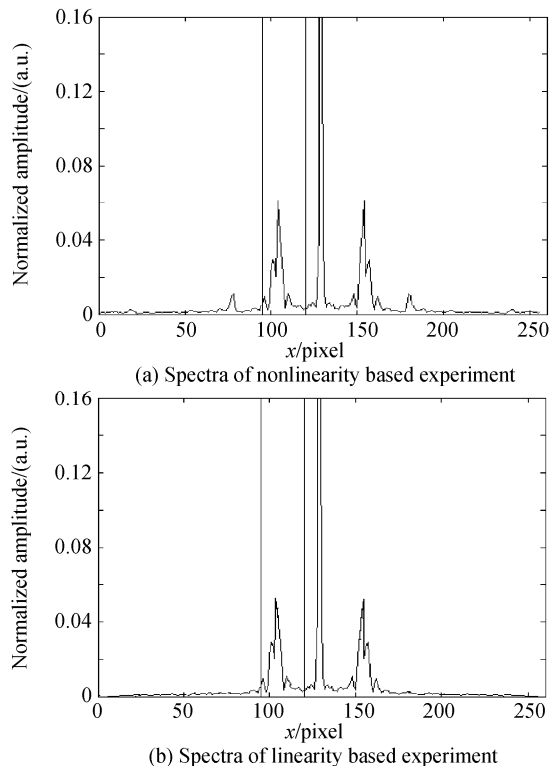


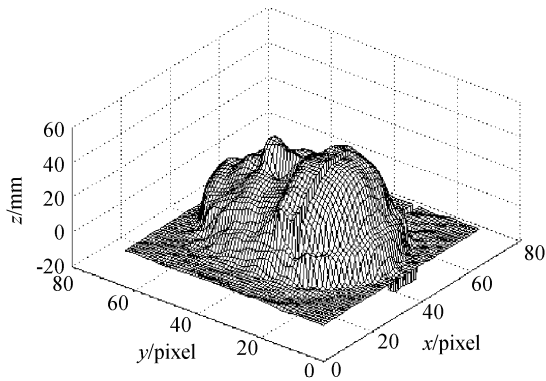
图 3 计算机模拟结果
Fig. 3 Results of simulation by computer

2.2 实验

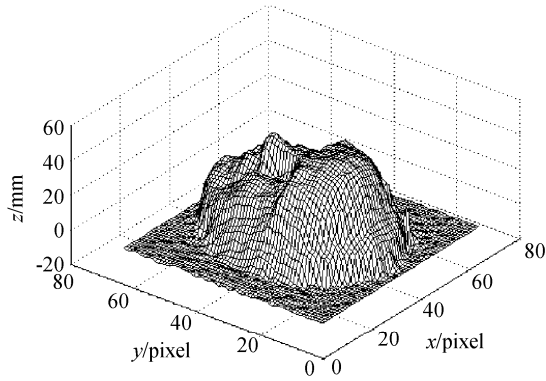
为了进一步验证理论分析的正确性, 现对一人脸面具进行了实际测量. 测量系统的结构参量 $L_0 = 900 \text{ mm}$, $d = 400 \text{ mm}$; 投影到基准面上的正弦光栅像的周期为 $T_0 = 1/f_0 = 512/26 \text{ mm}$; 将实际输入量 $I(x, y)$ 分成 30 个均匀的区域, 从而得到输出变形结构光场曲线的 30 个折线段. 利用 PLUSU3-880 型、 800×600 分辨率的 DMD 数字投影仪投影计算机产生变形条纹到被测物体上, 用低畸变的 CCD 摄像机获取条纹. 现分 2 种情况对物体的变形条纹进行傅里叶变换得到归一化频谱, 未进行非线性校正时得到的结果如图 4(a), 进行了非线性校正后得到的结果如图 4(b). 恢复物体分别如图 4(c)和(d). 比较图 4(a)和(b)可见, 未进行非线性校正的频谱中产生了除基频、零频以外的其它级次的频谱, 而进行了非线性校正的频谱中几乎只产生了基频、零频; 比较图 4(c)和(d)可见, 未进行非线性校正时物体恢复地较差: 额部部分细节出现缺损, 没有原物体(人脸面具)那样平整. 比较陡峭的部分(如脸部、头部)比较模糊, 没有原物体(人脸面具)那样清晰. 鼻尖、嘴部的轮廓不很分明; 而进行了非线性校正时物体恢复地

很好, 额部部分比较平整, 脸部、头部细节清晰. 鼻尖、嘴部的轮廓很分明, 与原物体(人脸面具)很接近.





(c) Error of nonlinearity based experiment



(d) Error of linearity based experiment

图 4 实验结果

Fig. 4 Results of experiment

3 结论

本文从理论上详细分析了 CCD 非线性产生的原因,提出了用多点多段线性逼近法来进行 CCD 非线性校正的新方法.简单推导了 CCD 非线性产生原因及校正方法的物理公式,并给出了物理解释:由于 CCD 非线性,频谱中多出了 γ 级频谱,从而增加了与基频混叠的可能性;因采用了多点多段线性逼近法,则整个曲线可由若干个折线段近似代替,用 MATLAB 等语言编制程序找到相应的校正值,从而使得非线性得到校正变成了线性.

通过计算机模拟和实验两种方法验证了 CCD 非线性产生及校正方法的正确性;CCD 非线性校正之后,明显地减小或消除了 γ 级频谱的产生.物体面形恢复的效果明显改善,准确度明显提高;模拟情况下物体面形恢复后的标准偏差由未校正时的 0.040 7 mm 减小到校正之后的 0.025 2 mm,实验情况下校正之后的物体面形恢复效果明显优于未校正时的效果.

参考文献

[1] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes[J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(24): 3977-3982.

- [2] QIAO Nao-sheng, CAI Xin-hua, PENG Guang-han. Study of the relationship between nonlinearity of CCD and frequency overlapping [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 603-608. 乔闹生,蔡新华,彭光含. CCD 的非线性与频谱混叠的关系研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 603-608.
- [3] QIAO Nao-sheng, CAI Xin-hua, PENG Guang-han, et al. Study of the effect caused by sampling in nonlinearity in CCD [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, **17**(11): 1339-1342. 乔闹生,蔡新华,彭光含,等. 抽样对 CCD 非线性的影响研究[J]. *光电电子. 激光*, 2006, **17**(11): 1339-1342.
- [4] XUE Li-jun, LI Zi-tian, LI Chang-le, et al. Study on the hyper-spectral CCD imager non-uniformity correction algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 693-696. 薛利军,李自田,李长乐,等. 光谱成像仪 CCD 焦平面组件非均匀性校正技术研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 693-696.
- [5] JIA Guang-ming, ZHANG Gui-zhong, XIANG Wang-hua. Using portable laser and CCD to do small particle sizing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1293-1295. 贾光明,张贵忠,向望华. 用全固态激光器和一维 CCD 测定微粒粒径[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1293-1295.
- [6] XU Ping, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Higher-precision FTP based on digital light projecting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(11): 59-62. 许平,陈文静,苏显渝. 高准确度的数字光投影傅里叶变换轮廓术[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 59-62.
- [7] DONG Yi, WANG Fu, CHENG Shou-cheng, et al. Nonlinear response measurement of planar CCD [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2001, **13**(4): 39-42. 董怡,王斧,程守澄,等. 面阵 CCD 非线性响应的测量[J]. *军械工程学院学报*, 2001, **13**(4): 39-42.
- [8] CAI Bing. Some simple nonlinear compensation technique of sensor [J]. *Journal of Yangze University (Natural Science)*, 2004, **1**(1): 59-61. 蔡兵. 几种简单的传感器非线性校正技术[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2004, **1**(1): 59-61.
- [9] CHEN Ying-juan, ZHANG Zhi-jiang, ZHANG Zhi-qiang. Correction of CCD pixel nonuniformity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(2): 216-220. 陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(2): 216-220.
- [10] LI Hua, XUE Jian-guo. Correction to the nonuniformity of array CCD sensors [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2001, **20**(4): 14-16. 李华,薛建国. 面阵 CCD 图像传感器不均匀性的校正[J]. *传感器技术*, 2001, **20**(4): 14-16.
- [11] WANG Yun-cai, WANG Xian-hua, CHEN Guo-fu. Measurement of fast electronic pulses with external electro-optic sampling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(3): 208-213. 王云才,王贤华,陈国夫. 快速电信号的外光电采样测量系统[J]. *光子学报*, 1997, **26**(3): 208-213.

Nonlinearity of CCD and Its Adjustment

QIAO Nao-sheng

(Department of Physics and Electronics, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China)

Received date: 2007-06-18

Abstract: The reason for the nonlinearity of CCD was analyzed, and then a method to adjust the nonlinearity was introduced. Finally, the simple analytical deduction and physical explain were given. After adjusting the nonlinearity of the CCD, the standard error of the shape for the object becomes 0.025 2 mm while it was 0.040 7 mm without adjusting. The result shows that, the standard error and the step spectrum and decrease obviously, and the shape for the object is superior to that without adjusting.

Key words: Fourier transformation profilometry; Nonlinearity of CCD; Method of adjustment; γ step spectrum



QIAO Nao-sheng was born in 1971. He received the B. S. degree from Hunan Normal University in 2000, and received the M. S. degree in optical information processing from Sichuan University in 2005. Now he is a lecturer at Department of Physics and Electronics, Hunan University of Arts and Science. His research interests focus on optical information processing, nonlinear optics, optical 3-D sensing and so on.