

CCD非线性效应对双频光栅三维面形测量的影响

乔闹生 孙萍

Influence of CCD nonlinearity effect on the three-dimensional shape measurement of dual frequency grating

QIAO Nao-sheng, SUN Ping

引用本文:

乔闹生, 孙萍. CCD非线性效应对双频光栅三维面形测量的影响[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 661-669. doi: 10.37188/CO.2020-0143

QIAO Nao-sheng, SUN Ping. Influence of CCD nonlinearity effect on the three-dimensional shape measurement of dual frequency grating[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 661-669. doi: 10.37188/CO.2020-0143

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展

Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface
中国光学. 2019, 12(2): 214 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0214>

光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system
中国光学. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

太赫兹波三维成像技术研究进展

Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques
中国光学. 2019, 12(1): 1 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0001>

采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method
中国光学. 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating
中国光学. 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

用于超冷原子囚禁的一体式结构三维光晶格系统

The integrated three dimensional optical lattice system for confining ultra-cold atoms
中国光学. 2019, 12(6): 1295 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1295>

CCD 非线性效应对双频光栅三维面形测量的影响

乔闹生^{1,2,3}, 孙 萍^{4,5*}

1. 湖南文理学院 国际学院, 湖南 常德 415000;
2. 湖南省洞庭湖生态经济区协同创新中心, 湖南 常德 415000;
3. 湖南文理学院 数理学院, 湖南 常德 415000;
4. 成都信息工程大学 光电工程学院, 四川 成都 610225;
5. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 6100054)

摘要:在测量系统中, CCD 的非线性效应会影响复杂光学三维面形的测量精度, 针对这一问题, 提出采用双频光栅投影消除 CCD 的非线性效应以提高测量精度。首先, 分析了 CCD 非线性效应对三维面形测量的影响, 给出了该情况下出现频谱混叠的解析推导和物理解释。然后, 讨论了 CCD 非线性效应下的双频光栅测量原理, 分析了此时变形条纹的光强分布及其经傅立叶变换后得到混叠频谱的原理。最后, 给出了由等效波长来衡量测量精度的方法, 推出了使用双频光栅投影测量三维面形高度信息的基本公式, 并进行了理论分析。对最大绝对值与平均绝对值分别为 24.3181 mm 和 1.0839 mm 的物体进行仿真分析, 测量值与实际值之间的最大绝对高度误差与平均绝对高度误差分别为 0.8950 mm 和 0.0622 mm, 提高双频光栅基频后, 其对应值分别减小为 0.3710 mm 和 0.0232 mm; 在实验结果显示, 当双频光栅的基频都增加 2.5 倍后, 频谱中的基频与高级频谱间分离较好, 测量精度提高。因此, 采用双频光栅投影消除 CCD 非线性效应具有较强的实用性和很好的发展前景。

关键词:三维面形测量; 双频光栅; CCD 非线性效应; 频谱混叠; 测量精度

中图分类号: O438.2

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0143

收稿日期: 2020-08-17; 修订日期: 2020-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61701050, No. 61703157, No. 61701050); 电子薄膜与集成器件国家重点实验室开放课题资助项目 (No. KFJJ201807); 四川省教育厅科研项目 (No. 2018Z073)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61701050, No. 61703157, No. 61701050), Open Foundation of State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices (No. KFJJ201807), Project of Sichuan Provincial Department of Education (No. 2018Z073)

Influence of CCD nonlinearity effect on the three-dimensional shape measurement of dual frequency grating

QIAO Nao-sheng^{1,2,3}, SUN Ping^{4,5*}

(1. *International College, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China;*

2. *Hunan Province Cooperative Innovation Center for The Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Changde 415000, China;*

3. *Mathematics and Physics Science College, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China;*

4. *College of Optoelectronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;*

5. *State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)*

* *Corresponding author, E-mail: sunping19775525@163.com*

Abstract: The CCD nonlinearity effect in the measurement system will affect the measurement accuracy of complex optical three-dimensional surface. Therefore, a method to eliminate the CCD nonlinearity effect by using dual frequency grating projection is proposed, which can improve the measurement accuracy. Firstly, the influence of CCD nonlinearity effect on three-dimensional shape measurement is analyzed. The analytical derivation and physical explanation of spectrum aliasing are given. Then, the measurement principle of dual frequency grating under the CCD nonlinearity effect is discussed. The light intensity distribution of deformed fringe and the principle of obtaining aliasing spectrum by Fourier transform are analyzed. Finally, the method to judge the measurement accuracy by the equivalent wavelength is given. The basic formula of measuring the height information of three-dimensional surface by using dual frequency grating projection is derived, and the theoretical analysis is carried out. The object is simulated as the maximum absolute value and average absolute value are 24.318 1 mm and 1.083 9 mm, respectively. The maximum absolute height error and average absolute height error between the measured value and the actual value are 0.895 0 mm and 0.062 2 mm, respectively. After increasing the fundamental frequency of the dual frequency grating, the corresponding values are reduced to 0.371 0 mm and 0.023 2 mm, respectively. When the fundamental frequency of the dual frequency grating is increased by 2.5 times, the separation between the fundamental frequency and the advanced spectrum becomes better, and the measurement accuracy is improved. Therefore, using dual frequency grating projection to eliminate CCD nonlinearity effect has strong practicability and is highly advisable.

Key words: three-dimensional shape measurement; dual frequency grating; CCD nonlinearity effect; spectrum aliasing; measurement accuracy

1 引言

三维面形测量系统具有非接触、高精度、快速、自动化等优点,广泛应用于机械零件的在线

质量检测、服装制作、医学诊断等领域^[1-6],已在国内外取得了较多的研究成果^[7-13]。但在测量过程中,CCD非线性效应会导致频谱混叠,从而影响三维面形的测量精度,在这方面不少学者开展了大量研究^[14-19]。如杜永兆等^[6]分析了 CCD 非线性

性效应导致频谱混叠的原因, 提出了消除频谱混叠的方法。于杰^[7]提出了一种用于相移点衍射干涉仪的加权最小二乘相位提取算法, 完全避免了 CCD 的二阶响应非线性。苏轲等^[8]采用最佳的加权滤波窗口减弱了 CCD 非线性引起的频谱混叠对测量的影响。

双频光栅投影的复杂物体三维面形测量应用广泛, 研究意义重大^[9-12]。如 FU Y 等^[9]采用计算机编制双频光栅程序投射到测量对象上, 经拼接得到目标图像, 设计滤波器对高频和低频进行滤波, 在低频相位差的基础上, 计算出高频相位差, 实现了三维轮廓测量。武迎春等^[10]提出了一种包含两个调制频率的复合光栅投影方法, 利用低频指导高频进行相位展开提高解相精度, 降低了相邻载波通道中交流分量之间的傅立叶频谱重叠度。PENG K 等^[11]提出将双频光栅用于在线三维测量, 在相位计算中避免了滤波过程中的有效信息损失, 将被测物体的整个调制方式与像素匹配, 提高了三维重建精度。ERYI H 等^[12]通过获取两幅图像中物体表面同一点对应的图像强度, 采用双频技术提取出无相位模糊的真实相位, 对大台阶试样的表面形貌进行了测量, 取得了较好的实验效果。

由于是用等效波长来衡量三维面形测量精度的^[1], 为了减小双频光栅三维测量中由于 CCD 非线性效应导致频谱混叠而影响测量精度, 本文通过增大双频光栅的频率。

针对 CCD 非线性效应对双频光栅三维测量的影响, 本文分析了 CCD 非线性效应产生频谱混叠的原因, 讨论了 CCD 非线性效应下的双频光栅测量原理, 对双频光栅投影输出的变形条纹进行了仿真与实际实验测量, 仿真与实验结果得到的数据验证了所提方法的正确性与有效性。

2 基本原理

2.1 CCD 非线性效应对三维面形测量的影响

三维面形测量系统光路图如图 1 所示, P_1P_2 是投影仪光轴, L_0 是 CCD 光心 I_2 与参考平面之间的距离, d 是 CCD 光心 I_2 与投影仪光心 P_2 之间的距离, A 和 C 是参考平面上的两点, D 是物体表面上某点, h 是点 D 到参考平面间的距离。

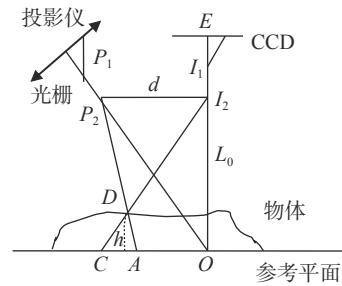


图 1 测量系统光路图

Fig. 1 Optical path of measurement system

设 $\phi(x,y)$ 表示包含被测物体高度信息 $h(x,y)$ 的相位。对于图 1 所示的测量系统, 当 $L_0 \gg h(x,y)$ 时, $h(x,y)$ 与 $\phi(x,y)$ 之间的关系可简单地表示为^[1]:

$$h(x,y) = -\frac{L_0}{2\pi f_0 d} \phi(x,y) \quad (1)$$

式中 f_0 为光栅基频。

由式 (1) 可见, 三维物体面形的高度信息 $h(x,y)$ 可通过相位 $\phi(x,y)$ 求出。

在实际工作中, 现在的 CCD 精度很高, CCD 输出光强与输入光强之间存在的二阶与三阶非线性效应是影响测量精度的主要因素, 其他的四阶和五阶等阶非线性效应对测量精度的影响非常小, 可以忽略不计。CCD 输出的干涉条纹光强为:

$$g(x,y) = \sum_{l=0}^3 \{e_l [g_0(x,y)]^l\} \quad (2)$$

式中 $g_0(x,y)$ 为输入的归一化光强度条纹, $g(x,y)$ 为实际捕获的归一化光强分布, e_l 为系数。

对式 (2) 进行傅立叶变换可得频谱为:

$$G(f_x, f_y) = \sum_{l=0}^3 Q_l(f_x - \lambda f_0, f_y - \lambda f_0) + \sum_{l=0}^3 Q_l^*(f_x + \lambda f_0, f_y + \lambda f_0) \quad (3)$$

由式 (3) 可见, 当 CCD 存在着非线性效应时, 频谱上多出了二倍频、三倍频等高级频谱成份。因此在相位恢复过程中, 二级与三级等高级频谱分量可能会与包含物体高度信息的基频分量发生混叠, 从而影响基频分量信息的提取, 最终影响相位恢复及物体高度信息的三维测量。

2.2 CCD 非线性效应影响下的双频光栅测量原理

复杂物体三维面形测量方法中, 所采用的双

频光栅测量集中了低频光栅和高频光栅各自的优点。投影低频光栅产生条纹得到的包裹相位为 $\varphi_1(x, y)$, 其展开相位 $\phi_1(x, y)$ 相对容易展开, 但精度较低。投影高频光栅产生条纹得到的包裹相位为 $\varphi_2(x, y)$, 其展开相位 $\phi_2(x, y)$ 相对较难展开, 但精度较高。

在 CCD 存在着二阶与三阶非线性效应情况下, 投影双频光栅产生的变形条纹的光强分布为:

$$g'(x, y) = \sum_{\lambda=0}^3 a_{\lambda}(x, y) + \sum_{k=1}^2 \sum_{\lambda=0}^3 \{c_{k\lambda}(x, y) \cdot \exp[i2\pi\lambda f_{k\lambda}(x+y)] + c_{k\lambda}^*(x, y) \cdot \exp[-i2\pi\lambda f_{k\lambda}(x+y)]\} \quad (4)$$

式中 $\sum_{\lambda=0}^3 a_{\lambda}(x, y)$ 为背景光强, $c_{k\lambda}(x, y) = 0.5b_{k\lambda}(x, y) \exp[i\lambda\phi_{k\lambda}(x, y)]$, * 表示复数共轭, $b_{k\lambda}(x, y)$ 表示条纹模式中调制幅度相关的光强度, $\phi_{k\lambda}(x, y)$ 表示包含物体高度信息的相位, $f_{k\lambda}(x, y)$ 表示光栅的频率。

对式(4)进行傅立叶变换可得频谱为:

$$G'(f_x, f_y) = \sum_{\lambda=0}^3 A_{\lambda}(f_x, f_y) + \sum_{k=1}^2 \sum_{\lambda=0}^3 [Q_{k\lambda}(f_x - \lambda f_k, f_y - \lambda f_k) + Q_{k\lambda}^*(f_x + \lambda f_k, f_y + \lambda f_k)] \quad (5)$$

式(5)中当 $k=1$ 时, f_k 表示低频光栅的基频, 当 $k=2$ 时, 表示高频光栅的基频(以下同), 背景光强产生的系列频谱 $\sum_{\lambda=0}^3 A_{\lambda}(f_x, f_y)$ 能够通过 π 相移技术消除^[13], 其中 $Q_{k\lambda}(f_x - \lambda f_k, f_y - \lambda f_k)$ 和 $Q_{k\lambda}^*(f_x + \lambda f_k, f_y + \lambda f_k)$ 分别是 $c_{k\lambda}(x, y) \exp[i2\pi\lambda f_k(x+y)]$ 和 $c_{k\lambda}^*(x, y) \exp[-i2\pi\lambda f_k(x+y)]$ 经过傅立叶变换后得到的系列频谱。

由式(5)可见, 投影双频光栅产生的变形条纹经傅立叶变换后, 频谱中除了产生基频外, 还会产生二阶、三阶等高阶非线性引起的高级频谱成份, 这些高级频谱成份可能会与基频发生混叠, 从而影响基频中包含物体高度信息的提取, 使测量精度降低。

由于 CCD 非线性效应导致双频光栅测量中基频与高级频谱发生混叠, 减小混叠使各级频谱相互分离可以提高测量精度。测量精度是由等效

波长来衡量的, 等效波长由 L_0/d 与 f_k 来决定^[1]。它们之间有以下关系:

$$\left| \frac{\partial h(x, y)}{\partial \phi(x, y)} \right| = \frac{L_0}{2\pi f_k d} = \frac{L_0/d}{2\pi f_k} \quad (6)$$

式中 L_0/d 与 f_k 的比值越小则测量精度越大, 而降低 L_0/d 会影响测量范围^[1]。因而, 在理想情况下保持 L_0/d 不变, 在保证 CCD 分辨率的前提下, 通过增大光栅的基频 f_k 来增大测量精度, 测量精度增大了也就意味着基频与高级频谱间的混叠减小了, 这样也就减小或消除了 CCD 的非线性效应。

根据式(1), 在使用双频光栅投影测量三维物体面形时, 对于高度为 $h(x, y)$ 的物体上的某点, 可得到如下关系:

$$h(x, y) = -\frac{L_0}{2\pi f_1 d} \phi_1(x, y) = -\frac{L_0}{2\pi f_2 d} \phi_2(x, y) \quad (7)$$

由式(7)可得

$$m_f = \frac{\phi_2(x, y)}{\phi_1(x, y)} = \frac{f_2}{f_1} \quad (8)$$

由于只考虑了来自低频光栅与高频光栅的基频。选择适合的双频光栅基频 f_1 和 f_2 , 采用低通滤波器对消除了频谱混叠的式(5)中的频谱进行滤波, 滤出双频光栅产生的基频成份 $Q_{11}(f_x - f_1, f_y - f_1)$ 和 $Q_{21}(f_x - f_2, f_y - f_2)$, 可得到展开相位 $\phi_1(x, y)$ 与 $\phi_2(x, y)$ 。展开相位 $\phi_k(x, y)$ 与包裹相位 $\varphi_k(x, y)$ 之间的关系为:

$$\phi_k(x, y) = \varphi_k(x, y) + 2\pi n_k(x, y) \quad k=1, 2 \quad (9)$$

式中 $n_1(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 分别为低频光栅和高级光栅产生的条纹整数级数。对于物体的同一点, 存在如下关系:

$$\frac{n_2(x, y)}{n_1(x, y)} = \frac{f_2}{f_1} \quad (10)$$

联合式(7)~式(10)可得

$$n_2(x, y) = (INT)\{m_f n_1(x, y) + \frac{1}{2\pi} [m_f \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)]\} \quad (11)$$

式中 $(INT)\{\cdot\}$ 表示整数运算符, 可以准确地确定与较高频率相关的展开相位 $\phi_2(x, y)$ 。

可见, $n_2(x, y)$ 能够由 m_f 、 $n_1(x, y)$ 、 $\varphi_1(x, y)$ 及 $\varphi_2(x, y)$ 确定, 代入式(9)可得到 $\phi_2(x, y)$, 最后可由

式(7)得到包含物体高度信息的三维物体面形。

3 计算机仿真及实验结果分析

为了验证基本原理分析的正确性, 现用计算机仿真与实验进行验证。

3.1 计算机仿真结果及分析

设测量系统的几何参数为 $L_0/d = 4$, 低频光栅的频率为 $f_1 = 1/27 \text{ mm}^{-1}$, 高频光栅的频率为 $f_2 = 1/9 \text{ mm}^{-1}$, 则 $m_f = 3$ 模拟物体如图 2(a) 所示, 大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。设 CCD 为线性且存在着非线性效应, 投影双频光栅产生的变形条纹光强

分布为: $g_1(x, y) = g(x, y)$ 、 $g_2(x, y) = 0.18 + 1.32g(x, y) - 0.42g^2(x, y)$ 。两种情况下的变形条纹光强经傅立叶变换后得到的沿着 x 轴方向的频谱分布分别如图 2(b)、2(c) 所示。

可见, 图 2(b) 中只有低频光栅与高频光栅各自产生的基频, 而图 2(c) 中因 CCD 的非线性效应的存在, 还含有低频光栅与高频光栅各自产生的高阶频谱成份, 且与基频等频谱发生了混叠。

设测量系统的几何参数为 $L_0/d = 2.25$, 低频光栅与高频光栅的基频分别为 $f_1 = 1/32 \text{ mm}^{-1}$ 、 $f_2 = 1/8 \text{ mm}^{-1}$, 来自理想 CCD 系统的变形条纹光强为 $g(x, y) = 0.5 + 0.5[\cos(2\pi f_1 x + \varphi(x, y)) + \cos(2\pi f_2 x + \varphi(x, y))]$, 来自存在非线性效应系统输出的变形条纹光强为 $g_1(x, y) = 0.15 - 0.13g(x, y) + 2.34g^2(x, y)$ 。

模拟物体如图 3(a) 所示, 其高度的最大绝对值与平均绝对值分别为 24.3181 mm 和 1.0839 mm ; 通过双频光栅后的变形条纹光强如图 3(b) 所示; 变形条纹光强经傅立叶变换后得到的沿着 x 轴方向频谱如图 3(d) 所示; 恢复物体面形后的绝对高度差如图 3(f) 所示, 测量值与实际值之间的最大绝对高度误差与平均绝对高度误差分别为 0.8950 mm 和 0.0622 mm 。

保持系统的测量参数不变, 使低频光栅与高频光栅的基频分别增加为 $f_1 = 1/16 \text{ mm}^{-1}$ 、 $f_2 = 1/4 \text{ mm}^{-1}$, 模拟物体通过双频光栅后的变形条纹、变形条纹光强经傅立叶变换后得到沿着 x 轴方向的频谱及绝对高度差分别如图 3(c)、3(e)、3(g) 所示, 测量值与实际值之间的最大绝对高度误差与平均绝对高度误差分别为 0.3710 mm 和 0.0232 mm 。

比较图 3(d) 与 3(e) 可见, 增大双频光栅各自的基频, 可以使双频光栅各自产生的基频较好地分离, 同时使同一光栅产生的基频与高级频谱较好地分离。比较图 3(f) 与 3(g) 可见, 增大双频光栅各自的基频, 可以明显提高三维物体的测量精度。

3.2 实验结果及分析

为了进一步证明基本原理分析的正确性, 采用如图 4 所示的实验装置进行实验。通过 MATLAB 软件编写程序得到低频光栅与高频光栅的基频分别为 $f_1 = 1/40 \text{ mm}^{-1}$ 、 $f_2 = 1/10 \text{ mm}^{-1}$, 则其频率比为 $m_f = 4$ 。再由式 (4) 得到双频光栅的变形条纹光强, 投影双频光栅条纹到被测物体表面。

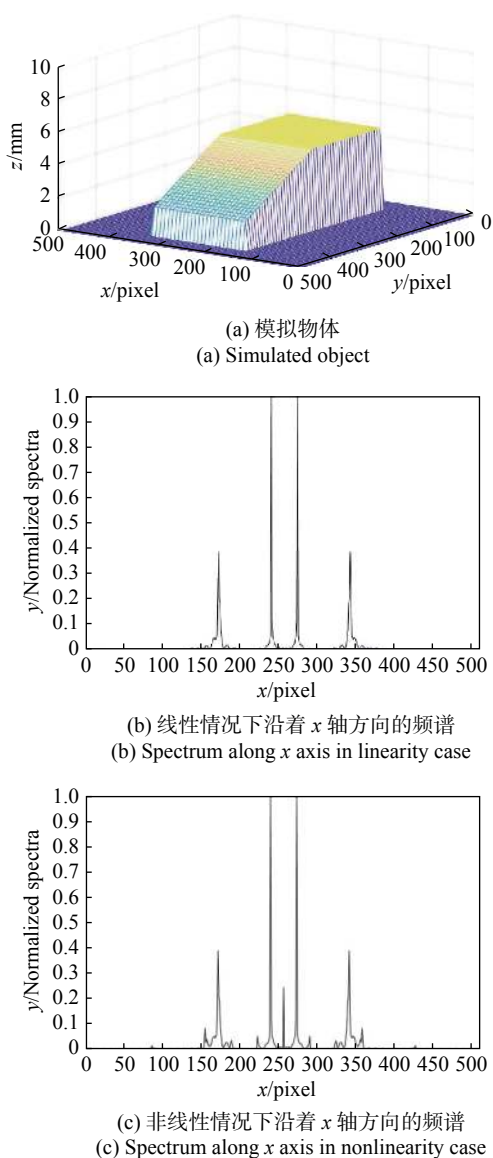


图 2 模拟物体及沿着 x 轴方向频谱分布

Fig. 2 Simulation object and spectrum distributions along x axis

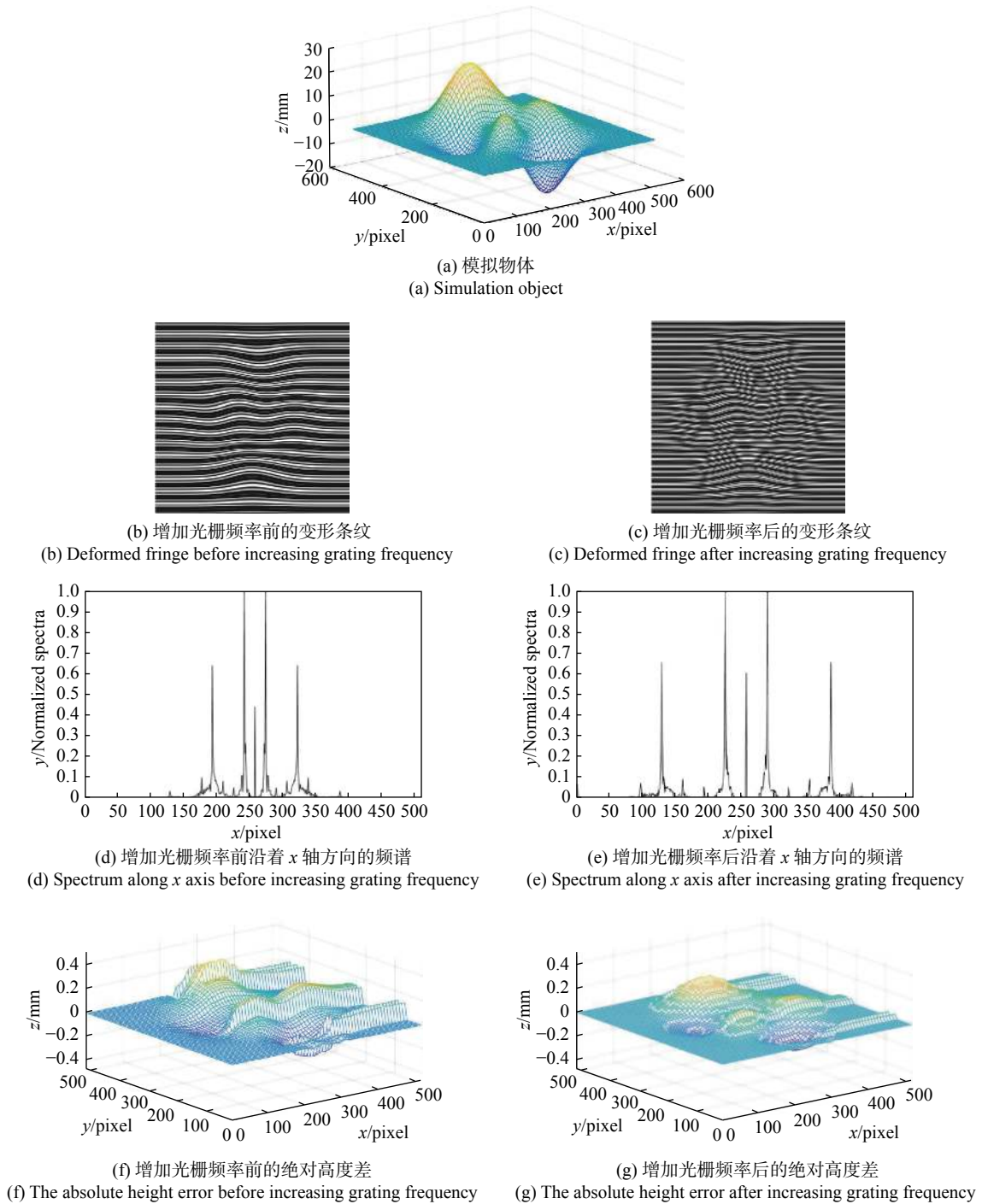


图 3 系统存在非线性效应时仿真结果图

Fig. 3 Simulation results when the system has nonlinearity effect

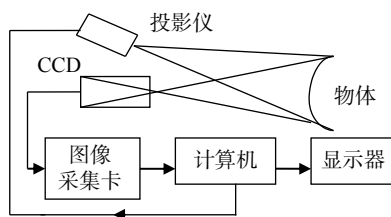


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

系统为非线性时,在满足抽样条件下,投影双频光栅条纹到被测物体上产生的变形条纹如图 5(a) 所示,变形条纹经傅立叶变换后所得到的频谱如图 5(c) 所示,恢复的三维物体面形如图 5(e) 所示。再根据实验结果,由 MATLAB 软件编写程序,得到提升的低频光栅与高频光栅的基频分别为 $f_1 = 1/16 \text{ mm}^{-1}$ 、 $f_2 = 1/4 \text{ mm}^{-1}$,因而使低频光栅与高频光栅的基频都同等增加了 2.5 倍,此时

得到新的双频光栅变形条纹、变形条纹经傅立叶变换后的频谱、恢复的三维物体面形分别如图 5(b)、5(d)、5(f) 所示。

比较图 5(c) 与 5(d) 可见, 两个图的频谱中除了低频光栅与高频光栅各自的包含物体高度信息的基频成份外, 还有由各自产生的二阶、三阶等阶非线性引起的高级频谱成份, 两图中的基频都与各自的二阶、三阶等高级频谱成份混叠了。

但是图 5(c) 的基频与二级、三级等高级频谱间混叠较多, 而图 5(d) 的基频与各高级频谱间分离较好且混叠很少。

比较图 5(e) 与 5(f) 可见, 图 5(f) 的恢复效果明显比图 5(e) 的效果好很多。图 5(f) 的额头、下巴、鼻子、脸颊等轮廓表面都比图 5(e) 的清晰且平滑, 图 5(e) 的额头恢复效果较差, 明显多出一道沟壑。

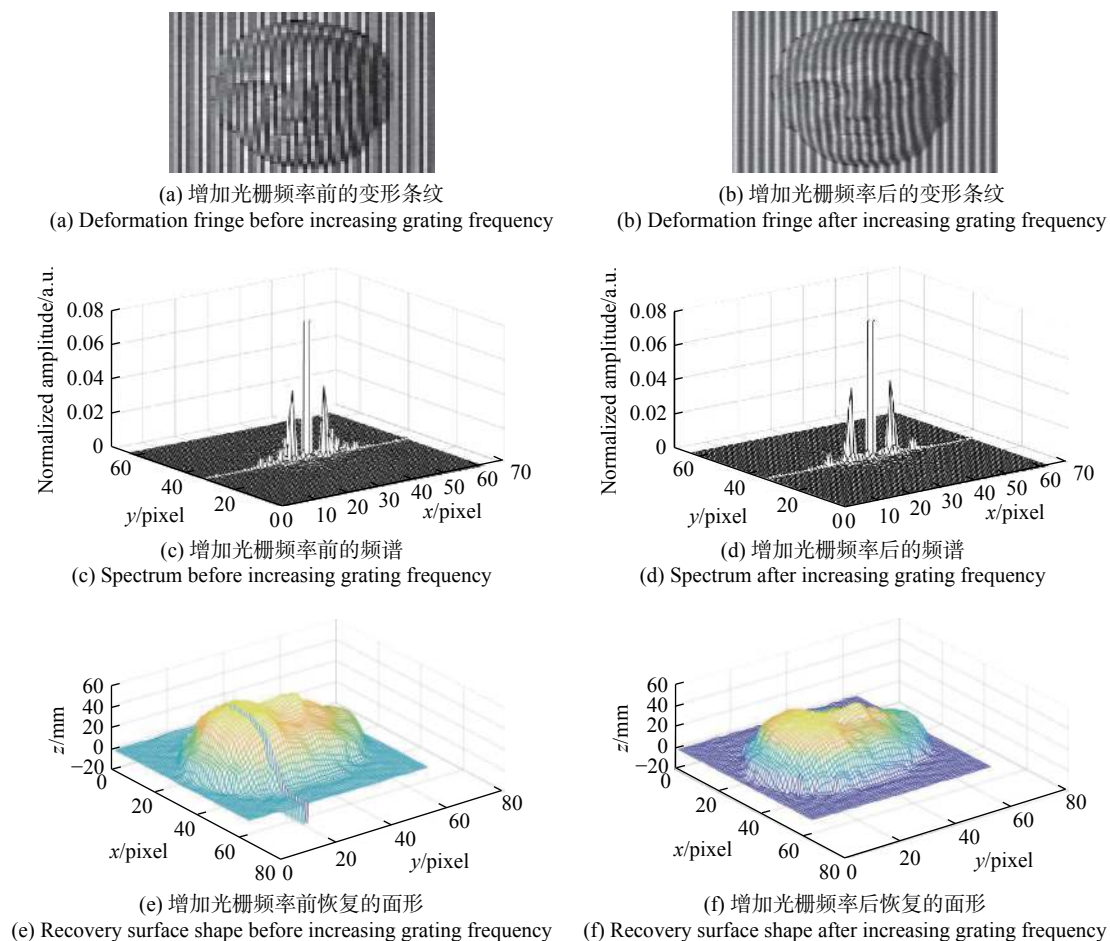


图 5 系统为非线性情况时的实验结果图

Fig. 5 Experimental results when the system has nonlinearity effect

4 结 论

为了减小 CCD 非线性效应对复杂光学三维面形测量精度的影响, 提出了采用双频光栅投影消除 CCD 非线性效应并提高测量精度的方法。分析了 CCD 非线性效应及高级频谱成份产生的基本原因, 讨论了 CCD 非线性效应下的双频光栅

测量原理, 并给出了理论分析和解析推导。仿真物体最大绝对值与平均绝对值分别为 24.3181 mm 和 1.0839 mm, 得到最大绝对高度误差与平均绝对高度误差分别为 0.8950 mm 和 0.0622 mm, 双频光栅基频都提高后, 两个值分别减小为 0.3710 mm 和 0.0232 mm。在实验结果中, 当双频光栅的基频都同等增加 2.5 倍后, 频谱中的基频与高级频谱间分离较好, 测量精度明显提高。

参考文献:

- [1] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977.
- [2] QIAO N SH, QUAN CH G. A novel phase retrieval method in fringe projection based on phase-shifting algorithm[J]. *Journal of Optics*, 2018, 47(4): 534-541.
- [3] AO M, ZHANG L, SHI X G, *et al.*. Measurement of the three-dimensional surface deformation of the Jiayu landslide using a surface-parallel flow model[J]. *Remote Sensing Letters*, 2019, 10(8): 776-785.
- [4] 祝祥, 邵双运, 宋志军. 基于线结构光传感器的轨道板几何形貌检测方法[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 841-850.
ZHU X, SHAO SH Y, SONG ZH J. A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 841-850. (in Chinese)
- [5] 张旭, 邵双运, 祝祥, 等. 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正[J]. *中国光学*, 2018, 11(1): 123-130.
ZHANG X, SHAO SH Y, ZHU X, *et al.*. Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 123-130. (in Chinese)
- [6] 杜永兆, 冯国英, 张凯, 等. CCD非线性效应对剪切干涉法波前检测的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1775-1779.
DU Y ZH, FENG G Y, ZHANG K, *et al.*. Effect of CCD nonlinearity on wavefront detection by shearing interferometry[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1775-1779. (in Chinese)
- [7] 于杰. 用于相移点衍射干涉仪的加权最小二乘相位提取算法[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(6): 605-615.
YU J. Weighted least square phase extraction algorithm for phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 605-615. (in Chinese)
- [8] 苏轲, 陈文静. 小波变换轮廓术抑制CCD非线性的分析[J]. *光学技术*, 2009, 35(1): 37-40, 44.
SU K, CHEN W J. Analyzing wavelet transform profilometry in the restraining CCD nonlinear characteristic[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 37-40, 44. (in Chinese)
- [9] FU Y J, JIANG G Y, CHEN F Y. A novel Fourier transform profilometry based on dual-frequency grating[J]. *Optik*, 2012, 123(10): 863-869.
- [10] 武迎春, 曹益平, 肖焱山. 基于双频复合光栅投影的陡变物体三维面形测量[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(12): 2362-2367.
WU Y CH, CAO Y P, XIAO Y SH. 3D shape measurement for a discontinuous object based on a dual frequency composite grating[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2012, 23(12): 2362-2367. (in Chinese)
- [11] PENG K, CAO Y P, WU Y CH, *et al.*. A dual-frequency online PMP method with phase-shifting parallel to moving direction of measured object[J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 491-499.
- [12] HU E Y, FANG H F. Surface profile inspection of a moving object by using dual-frequency Fourier transform profilometry[J]. *Optik*, 2011, 122: 1245-1248.
- [13] LI J, SU X Y, GUO L R. Improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 29(12): 1439-1444.
- [14] LU F, WU CH D, YANG J K. Optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 246-255.
- [15] FU G K, CAO Y P, WANG Y P, *et al.*. Three-dimensional shape measurement based on binary fringe conventional projection[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, 41(14): 4073-4083.
- [16] WANG Y W, LIU L, WU J, *et al.*. Enhanced phase-coding method for three-dimensional shape measurement with half-period codeword[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(27): 7359-7366.
- [17] 王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1014-1027.
WANG Y M, ZHANG Z H, GAO N. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1014-1027. (in Chinese)
- [18] 陈瑜, 潘永强, 刘丙才, 等. 基于窗口傅里叶变换的线性相位误差抑制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(6): 1314-1322.
CHEN Y, PAN Y Q, LIU B C, *et al.*. Linear phase error suppression technique based on window Fourier transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1314-1322. (in Chinese)

[19] 尚万祺, 张文喜, 伍洲, 等. 全视场外差干涉三维测量系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2097-2104.

SHANG W Q, ZHANG W X, WU ZH, *et al.*. Three-dimensional measurement system based on full-field heterodyne interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2097-2104. (in Chinese)

作者简介:



乔闹生(1971—), 男, 湖南茶陵县人, 博士/博士后, 教授, 硕士生导师, 2000年于湖南师范大学理学院获得学士学位, 2005年于四川大学电子信息学院获得硕士学位, 2010年于电子科技大学光电工程学院获得博士学位, 2014年于中南大学博士后出站, 主要从事光学信息处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: naoshengqiao@163.com



孙萍(1979—), 女, 四川邛崃人, 博士, 教授, 硕士生导师, 2001年于重庆师范学院物理系获得学士学位, 2010年于电子科技大学光电工程学院获得博士学位, 主要从事先进材料与光电传感等方面的研究。E-mail: sunping19775525@163.com

《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 100.00 元/册