

基于广义载波条纹图数字解调的 三维形貌测量技术*

彭 翔 朱绍明 高 志

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

摘 要 提出并研究了一种新的三维表面测试技术。该技术基于广义非线性载波条纹的数字解调。文中给出了该技术的理论分析和实验结果。

关键词 广义载波条纹, 数字莫尔, 三维形貌检测。

1 引 言

与条纹自动分析技术相结合的全息干涉技术、散斑干涉技术、以及莫尔技术作为空间表面主动光学传感技术在三维视觉系统中起着重要的作用^[1~5]。全息干涉技术和数字散斑干涉技术可以使用波长可调谐的激光器以扩大测量范围和获得可变的测量灵敏度^[6, 7]。Srinivasan等人^[8]首先考虑使用扩散照明,并用几何映射的方法来处理这个问题。最近, Tang和Hung^[9]又用同样的方法来处理这一问题。

在检测大物体时有必要使用扩散光照明以获得大的照明面积,同时避免使用大的准直光学系统。

最近,作者报道了广义载波条纹图的形成机理和计算机辅助分析技术^[10]。本文将利用广义非线性载波条纹图数字解调方法,研究一种新的数字莫尔三维表面检测技术,给出了该技术的原理和实验结果。

2 原 理

已经证明^[10],广义非线性载波条纹图的强度分布可表示为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [kd_0(x, y) + 2\pi\zeta_0 x], \quad (1)$$

$$d_0(x, y) = \{ [z''(x^2 + y^2) - zx''] / 2z(z + z'') - z'' \},$$

$$\zeta_0 = x'' / \lambda(z + z'').$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为所用光源的波长。参数 z , z'' 和 x'' 取决于系统的光路。 $a(x, y)$ 为条纹图的背景光强, $b(x, y)$ 为条纹图的对比度变化。注意到方程(1)是非线性,不等间距的条纹图。这

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期:1994年7月3日;收到修改稿日期:1994年9月28日

个条纹图用来作为测量表面形貌的投影光栅。当这个条纹图投影到一个参考面上时，它可作为参考光栅，记为

$$g_r(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\varphi_r(x, y) + 2\pi\zeta_0 x], \quad (2)$$

其中， $\varphi_r(x, y) = kd_0(x, y)$ 为投影光栅的非线性位相项。当这个光栅投影到一个任意的待测表面上时，它将根据表面高度的变化受到位相调制。于是投影到物面上的变形光栅可表示成

$$g_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\varphi_0(x, y) + \varphi_r(x, y) + 2\pi\zeta_0 x], \quad (3)$$

上式中 $\varphi_0(x, y)$ 等效于一个“基带信号”，它对应于物表面各点的高度变化。方程(2)和(3)的离散形式可写成：

$$g_r(m, n) = a(m, n) + b(m, n) \cos [\varphi_r(m, n) + 2\pi\zeta_0 m] \quad (4)$$

$$g_0(m, n) = a(m, n) + b(m, n) \cos [\varphi_0(m, n) + \varphi_r(m, n) + 2\pi\zeta_0 m], \quad (5)$$

其中 $\zeta_0 = 1/P$ 为广义载波条纹图的线性调制频率， P 是线性调制周期。余下的问题是从(5)式中解调出 $\varphi_0(m, n)$ 。参考光栅 $g_r(m, n)$ 的非线性相位可通过将空间相移算法与计算机产生模板相结合的技术提取出来^[10]，即

$$\varphi_r(m, n) = \tan^{-1} \left[\frac{g_r(m + S_T, n) - g_r(m - S_T, n)}{2g_r(m, n) - g_r(m - S_T, n) - g_r(m + S_T, n)} \right] \sqrt{3} - 2\pi\zeta_0 m, \quad (6)$$

其中， $S_T = P/3 = 1/3\zeta_0$ 是采样间隔。使用同样的技术可以获得与三维表面形貌有关的变形光栅的位相信息：

$$\varphi_0(m, n) + \varphi_r(m, n) = \tan^{-1} \left[\frac{g_0(m + S_T, n) - g_0(m - S_T, n)}{2g_0(m, n) - g_0(m - S_T, n) - g_0(m + S_T, n)} \right] \sqrt{3} - 2\pi\zeta_0 m, \quad (7)$$

上式中 $\varphi_r(m, n)$ 已由(6)式解调出来了。解调出 $\varphi_0(m, n)$ 后，可以很容易通过几何映射的公式(例如，参见文献[10])将位相分布转换成三维物表面的物理高度分布。

3 实 验

实验系统由光路部分和数字处理部分组成。光路部分如图 1(a)所示，用一个改进型的泰曼-格林干涉光路产生的广义投影光栅照明物体。反射镜 M_4 固定在一个精密转台上，通过控制其转角可以引入已知的偏转，从而获得需要的相移。数字接收和处理系统如图 1(b)所示，由 PIH-703 CCD 摄像机、CA-Image 图像卡、和一台 Super 286 PC 微机构成。摄像机和图像卡采集并存储投影在物表面的变形光栅及投影在参考平面上的光栅(广义载波条纹图)，然后在计算机中做后续处理。

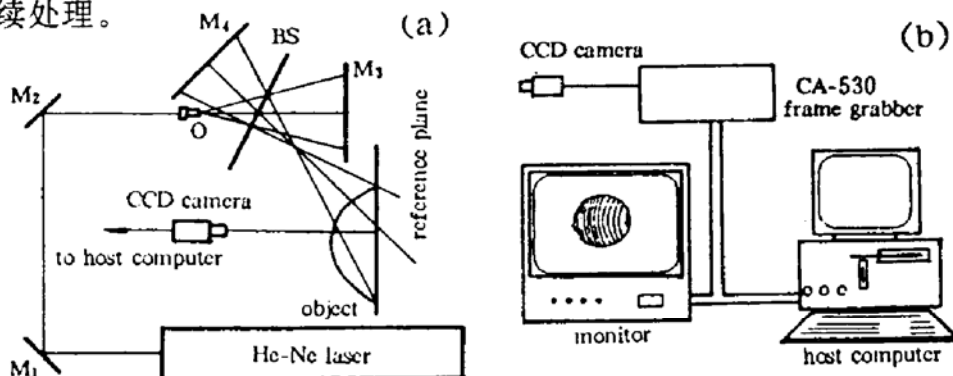


Fig. 1 Experimental set-up

(a) optical configuration, (b) digital processing unit

图 2(a)显示了投影在参考平面上的球载波条纹图，它用来作为广义投影光栅。由空间载波相移算法计算出的广义投影光栅的位相条纹分布如图 2(b)所示。图 2(c)表示同样的广义载波条纹投影在一个任意待测表面上的变形光栅，该光栅各点的变形程度描述了由于物表面相应点的高度变化对投影光栅的相位调制深度。根据空间载波相移算法计算出的变形光栅的位相条纹分布如图 2(d)所示。为了解调参考光栅和变形光栅的位相分布，可用作者提出的计算机产生模板的技术^[10]。模板周期可根据广义载波条纹的线性位相项及调整反射镜 M_1 的偏转量确定。此处所用的模板空间周期为 8 个像素。将此模板分别与参考光栅和变形光栅的位

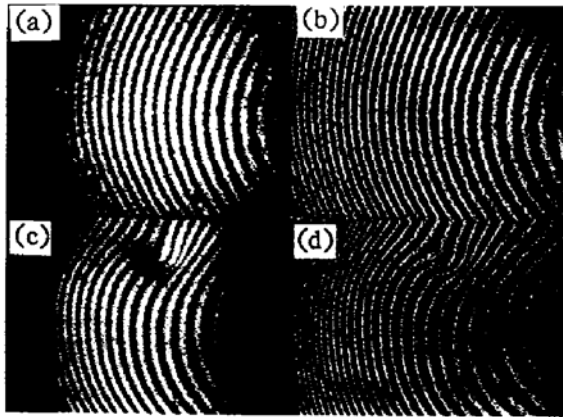


Fig. 2 Generalised carrier fringe pattern as a projected grating
 (a) reference grating, (b) phase fringe of reference grating, (c) deformed grating, (d) phaser fringes of deformed grating

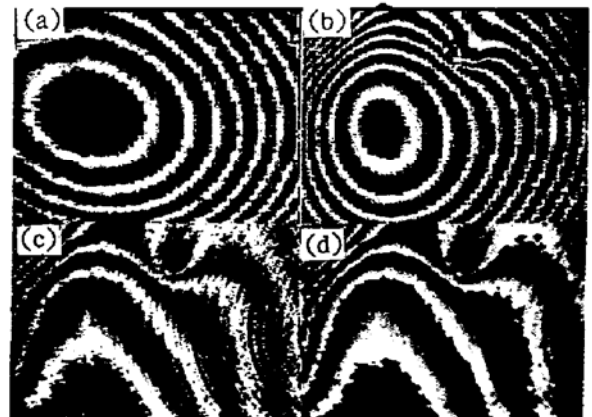


Fig. 3 Demodulation results
 (a) First demodulation of reference grating, (b) first demodulation of deformed grating, (c) second demodulation — contour fringes of test surface, (d) 5 x 5 median filtering result of (c)

相条纹相减，得到第一步解调结果，如图 3(a)和 (b)所示(它们分别对应于方程(6)和(7)描述的情况)。将图 3(a)和(b)再相减，作第二步解调可得描述物表面高度变化的等高条纹，结果如图 3(c)所示。图 3(d)显示了图 3(c)经过 5×5 中值滤波后的结果。对图 3(d)显示的位相条纹分布实行位相展开的处理可得对应物面高度变化的连续位相分布图。连续位相分布图的三维显示以及相应的等高线图如图 4 所示。

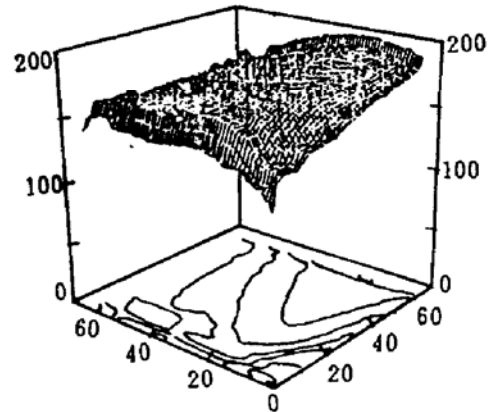


Fig. 4 3-D plot and contour map of test surface

4 讨 论

本文报道的技术与已有的基于投影光栅的莫尔技术相比，具有如下特点：

- 1) 使用球面波照明，广义载波条纹图作为投影光栅，具有能够检测大物体的优点，同时又可避免使用大的准直光学系统，从而使系统得以简化和紧凑。
- 2) 可以通过控制反射镜 M_1 的偏转角方便地获得可变的测量灵敏度。
- 3) 采用空间相移算法与计算机产生模板技术相结合的数字解调方法，整个处理过程均在空域完成而不涉及快速傅里叶变换，也不涉及特殊数字滤波器的设计。

- 4) 可并行获得空间相移条纹图, 因此使系统对于环境因素的影响的灵敏度大大降低, 并同时具有初态过程检测的潜力。
- 5) 本文报道的技术可以自动判断条纹级次, 不存在“凹凸模糊”的问题。

结 论 本文提出了一种新的数字莫尔技术的原理, 并得到了实验验证。该技术在自动检测三维物体表面形貌的应用中具有很大潜力。

参 考 文 献

- [1] J. H. Tiziani, Optical methods for precision measurements. *Opt. & Quant. Electron.*, 1989, 21(4): 253~282
- [2] J. L. C. Sanz. *Advances in Machine Vision*. Springer Verlag, Berlin, Berlin, 1989: 7~53
- [3] R. Dandliker, R. Thalmann, Heterodyne and quasi-heterodyne holographic interferometry. *Opt. Engng.*, 1985, 24(5): 824~831
- [4] X. Peng, H. Y. Diao, Y. L. Zou *et al.*, Contouring by modified dual-beam ESPI based on tilting illumination beams. *Optik*, 1992, 90(2): 61~64
- [5] K. J. Gasvk, T. Hovde, T. Vadseth, Moiré technique in 3-D machine vision. *Opt. & Lasers Eng.*, 1989, 10(3/4): 241~249
- [6] R. P. Tatam, J. C. Davies, C. H. Buckberry *et al.*, Holographic surface contouring using wavelength modulation of laser diodes. *Opt. & Laser Technol.*, 1990, 22(5): 317~321
- [7] X. Peng, Y. L. Zou, H. Y. Diao *et al.*, A simplified multi-wavelength ESPI contouring technique based on a diode laser system. *Optik*, 1992, 91(2): 81~85
- [8] L. Srinivasan, H. C. Lin, M. Halioua, Automated phase-shifting profilometry: a phase mapping approach. *Appl. Opt.*, 1985, 24(2): 185~188
- [9] S. Tang, Y. Y. Hung, Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1990, 29(10): 3012~3018
- [10] 彭 翔, 高 志, 朱绍明等, 光学广义载波条纹图的计算机辅助分析. *中国激光*, 1995, 22(7): 541~545

3-D Surface Measurement Based on Digital Demodulation of Generalised Carrier Fringe Pattern

Peng Xiang Zhu Shaoming Gao Zhi

(Department of Precision Instrumentation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 13 July 1994; revised 28 September 1994)

Abstract A new technique for 3-D surface measurement is developed. The technique is based on digital demodulation of generalised non-linear carrier fringe pattern. Theoretical analysis and experimental result are given to demonstrate the technique.

Key words generalised carrier, digital moiré, 3-D surface contouring.