

文章编号: 1001-3806(2007)04-0384-03

关于双频光栅对物体实时测量的研究

王向华, 何兴道, 伏燕军*

(南昌航空工业学院 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘要: 为了既可以高精度测量有突变的物体又能达到实时的目的, 采用软件 VC++ 生成双频光栅的方法, 用 LCD 投影机直接投射到物体表面, 只需采集一幅图像经过傅里叶变换便可得到相位差, 还原出物体形貌。实验结果表明, 该方法简单方便、精度高, 可以达到实时的要求, 对基于双频光栅的傅里叶变换轮廓术的发展有很大的推动作用。

关键词: 傅里叶光学与光信号处理; 傅里叶变换轮廓术; 双频光栅; 相位差; 液晶显示投影机

中图分类号: TN 247 文献标识码: A

The real-time measurement by two-frequency grating

WANG Xiang-hua, HE Xing-dao, FU Yan-jun

(Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063 China)

Abstract In order to measure an object with some breaks precisely and in real-time, the two-frequency grating was created with VC++ first and then the grating was projected on the surface of the object by LCD projector, so that the phase difference could be calculated by means of Fourier transform profilometry (FTP) from only one image, and the shape of the object could be recovered. Experiments indicate that this method is simple, exact and in real-time; it greatly promotes the development of FTP by two-frequency grating.

Key words Fourier optics and optical signal processing; Fourier transform profilometry; two-frequency grating; difference of phase; liquid crystal display (LCD) projector

引 言

非接触测量由于对被测物体没有损伤^[1,2], 应用越来越广泛。而利用光栅检测物体三维形貌更是具有灵敏度高、非接触、可以实时等优点, 已经成为检测物体三维形貌的一种重要测量手段^[3]。若采用四步相移法, 需要采集 4 幅图像, 达不到实时的目的; 而采用傅里叶变换法^[4], 在傅里叶逆变换求相位时, 得到的是在 $-\pi \sim \pi$ 之间的截断相位, 所以需要对这个截断相位解包裹, 还原出真实相位。对于这个问题, 人们不断提出一些新的解包裹算法^[5,6], 尽管对原来的算法有很大的改进, 但是效果仍然不理想。因此, 就引进了双频投影栅线法^[7]。而利用两个不同频率光栅投影, 就需要采集图像两次, 这样既达不到实时, 也容易因为两次测量时周围的环境发生变化, 影响了测量精度。作者提出用 VC++ 生成一个包含两个不同频率的复合光栅, 直接用液晶显示 (liquid crystal display, LCD) 投影

机投射到物体表面^[8], 这样只需采集一幅图像就可以还原物体三维形貌, 达到实时的目的。

1 投影栅线法的原理

由图 1 知道, 物体表面 A 点与基准面 B 点具有相

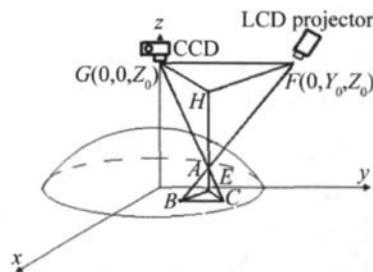


Fig 1 Principle of grating measurement

同的相位, 即 $\phi_A = \phi_B$, 物体表面 A 点与基准面 C 点在 CCD 靶面成相于同一点。因此有:

$$\begin{aligned} L_{BC} &= (\phi_B - \phi_C) / 2\pi f = \\ (\phi_A - \phi_C) / 2\pi f &= \phi_{AC} / 2\pi f \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $f = 1/p$ 为基准面上投影栅的频率, ϕ_A , ϕ_B 和 ϕ_C 分别是物体表面 A, B 和基准面 C 点的相位, ϕ_{AC} 是 A 点和 C 点的相位差。由几何关系 $\triangle AEC$ 与 $\triangle AHG$ 相似 (E 点是过表面 A 点的铅垂线与基准面的交点, 则 A

作者简介: 王向华 (1982-), 男, 硕士研究生, 现主要从事物体三维形貌测量的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fyjpkh@sina.com

收稿日期: 2006-06-03 收到修改稿日期: 2006-09-12

点到 E 点的距离 L_{AE} 就是所求 A 点高度 Z_A), $\triangle ABC$ 与 $\triangle AFG$ 相似, 分别可以得到:

$$L_{AE} / L_{AH} = L_{AC} / L_{AG} \quad (2)$$

$$L_{AC} / L_{AG} = L_{BC} / L_{GF} \quad (3)$$

由 (2) 式、(3) 式可得:

$$L_{AE} / (Z_0 - L_{AE}) = L_{BC} / Y_0 \quad (4)$$

$$\text{即: } Z_A = L_{BC} \cdot Z_0 / [Y_0 (1 + L_{BC} / Y_0)] \quad (5)$$

式中, Z_0 表示 CCD 到基准面的距离, Y_0 表示 LCD 投影仪到 CCD 的距离。

由于在实际光路中 $Y_0 \gg L_{BC}$, (5) 式可近似为:

$$Z_A = L_{BC} \cdot (Z_0 / Y_0) = (Z_0 / Y_0) (\phi_{AC} / 2\pi f) = k\phi_{AC} \quad (6)$$

式中, $k = Z_0 / (Y_0 2\pi f)$ 是与光路有关的结构系数。

以上的方法对于比较平缓的物体可以适用, 但是对于有突变的物体, 就将遇到如图 2 所出现的情况^[9]。

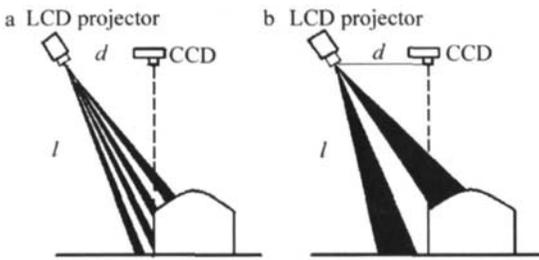


Fig 2 Single-frequency grating projected on an object with breaks

很明显, 对于有突变的物体, 采用的光栅频率太高, 就会遇到图 2a 的情况, 在物体突变处有多个周期的存在, 相位展开比较困难; 而图 2b 测量精度比较低。为了既可以测量有突变的物体, 也可以达到比较高的精度, 可以采用两种光栅相结合的方法即双频光栅投影的方法。

2 双频光栅傅里叶变换轮廓术的原理

采用两个频率不同的光栅对物体进行测量。假设这两个光栅的周期分别为 P_1 和 P_2 , 光强分布为:

$$g(x, y) = a(x, y) + b_1(x, y) \cos[2\pi f_1 x + \phi_1(x, y)] + b_2(x, y) \cos[2\pi f_2 x + \phi_2(x, y)] \quad (7)$$

式中, $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$ 分别是周期为 $P_1 = 1/f_1$ 和 $P_2 = 1/f_2$ 的光栅在物体表面和基准面投影的相位差; $2\pi f_1 x$ 和 $2\pi f_2 x$ 分别是频率为 f_1 和 f_2 在基准面上 x 点的相位; $a(x, y)$ 为背景光强; $b_1(x, y)$, $b_2(x, y)$ 分别是低频光栅、高频光栅在物体表面的反射系数。(7) 式进行傅里叶变换得^[10]:

$$G(f, y) = A(f, y) + Q_1(f - f_b, y) + Q_1^*(f + f_b, y) + Q_2(f - f_b, y) + Q_2^*(f + f_b, y) \quad (8)$$

式中, $Q_1(f - f_b, y)$ 和 $Q_2(f - f_b, y)$ 分别表示 $0.5b_1(x, y) \times \exp\{i[2\pi f_1 x + \phi_1(x, y)]\}$ 和 $0.5b_2(x, y) \exp\{i[2\pi f_2 x + \phi_2(x, y)]\}$ 的傅里叶变换。如果 P_1 和 P_2 的选择能够使

$Q_1(f - f_b, y)$ 和 $Q_2(f - f_b, y)$ 之间分离, 便可分别提取 $Q_1(f - f_b, y)$ 和 $Q_2(f - f_b, y)$ 进行傅里叶逆变换, 然后取以 $e = 2.71828$ 为底的对数, 可得:

$$\ln(0.5b_1(x, y) \exp\{i[2\pi f_1 x + \phi_1(x, y)]\}) = \ln(0.5b_1(x, y)) + i[2\pi f_1 x + \phi_1(x, y)] \quad (9)$$

$$\ln(0.5b_2(x, y) \exp\{i[2\pi f_2 x + \phi_2(x, y)]\}) = \ln(0.5b_2(x, y)) + i[2\pi f_2 x + \phi_2(x, y)] \quad (10)$$

可见, 取对数后的虚部就是物体表面相位, 但是由于傅里叶逆变换后的虚部范围在 $-\pi \sim \pi$ 之间, 得到的是点 (x, y) 的低频截断相位 $2\pi f_1 x + \phi_1(x, y)$ 和低频截断相位 $2\pi f_2 x + \phi_2(x, y)$, 因此, 还要对其解包裹还原出真实相位。真实相位和截断相位关系如下:

$$2\pi f_1 x + \phi_1(x, y) = 2\pi f_1 x + \phi_1(x, y) + 2\pi n_1 \quad (11)$$

$$2\pi f_2 x + \phi_2(x, y) = 2\pi f_2 x + \phi_2(x, y) + 2\pi n_2 \quad (12)$$

这里假设 f_1 为低频光栅的频率, f_2 为高频光栅的频率; n_1, n_2 分别是低频、高频光栅在突变处的周期个数。理想状态, 对物体同一部分, 采用两个光栅所测得的高度值应该是相同的, 即:

$$Z_1(x, y) = k_1 \phi_1(x, y) = Z_2(x, y) = k_2 \phi_2(x, y) \quad (13)$$

由 (11) 式 ~ (13) 式可推导出:

$$n_2 = \text{int} \left\{ \frac{k_1}{k_2} \cdot n_1 + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{k_1}{k_2} \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \right] \right\} \quad (14)$$

式中, k_1 和 k_2 分别是与各自的光路结构有关的常数 $k_1 = Z_0 / (Y_0 2\pi f_1)$ 和 $k_2 = Z_0 / (Y_0 2\pi f_2)$; $\phi_1(x, y)$, $\phi_2(x, y)$ 分别是低频光栅和低频光栅在突变处的截断相位差值; int 表示取整的意思。

3 实验及误差分析

3.1 实验

为了使得光栅两个频率的频谱不混叠, 采用双频光栅的频率分别为 $f_1 = 1/4 \text{ pixel}$ 和 $f_2 = 1/16 \text{ pixel}$ 光路结构如图 1 所示, 其中 $Z_0 = 119.0 \text{ cm}$, $Y_0 = 33.0 \text{ cm}$, $f_1 = 4.372 \text{ cm}^{-1}$, $f_2 = 1.093 \text{ cm}^{-1}$, 把生成的双频光栅通过投影机投射到物体表面, 得到的变形光栅如图 3 所



Fig 3 Stripe of two-frequency grating modulated by the shape of object

示。实验中采用的物体形貌如图 4a 所示。实验中只对物体左边没有阴影的部分还原 (有阴影的部分可以通过物体旋转、图像拼接或者双投影仪来消除阴影)。对左边部分的任意一个横截面进行 466 点傅里叶变换, 所得频谱如图 4b 所示。把频谱中的低频、高频部分滤出, 分别进行 466 点傅里叶逆变换, 低频部分经过傅里叶逆变换后得到的截断相位如图 4c 所示, 高频部分经过傅里叶逆变换后得到的截断

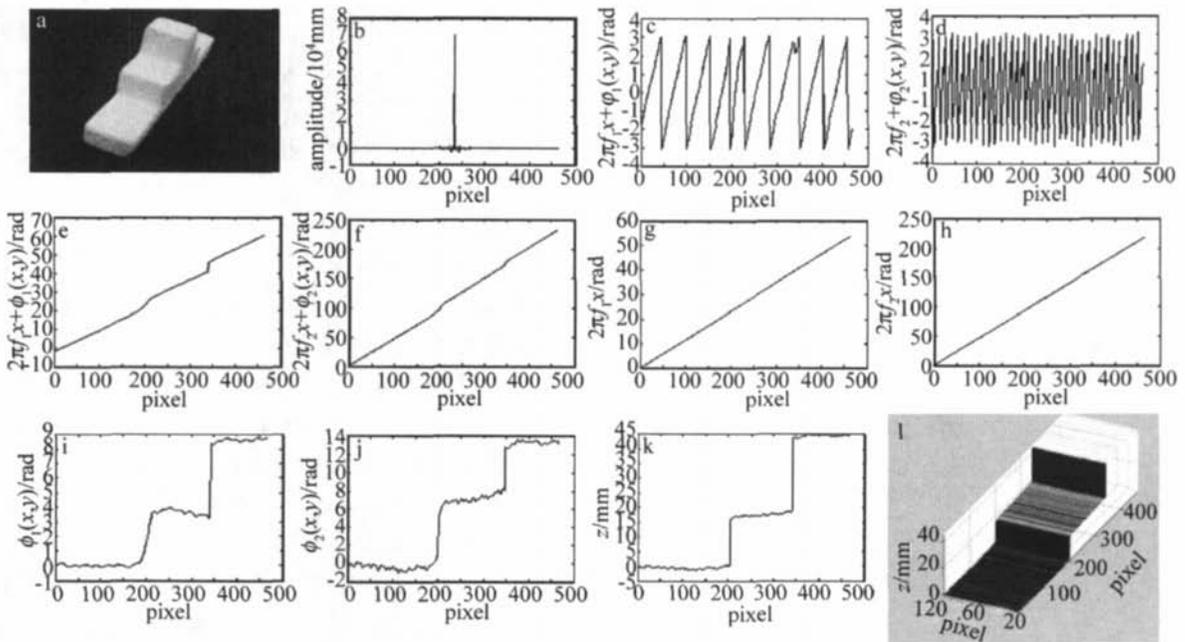


Fig 4 a—shape of object b—frequency spectra of a section c—truncation phase of low-frequency d—truncation phase of high-frequency e—unwrapped phase of low-frequency f—unwrapped phase of high-frequency g—datum plane phase of low-frequency h—datum plane phase of high-frequency i—difference phase of low-frequency j—difference phase of high-frequency k—recurrence of a section l—recurrence of the object

相位如图 4d 所示, 从图 4c 图 4d 可以看出得到的相位在 $-\pi \sim \pi$ 之间, 对其解包裹分别得到如图 4e 图 4f 所示的相位, 其中低频部分由于在突变处只有一个周期, 故图 4e 的相位就是真实相位, 而高频部分由于在突变处有可能有多个周期的存在, 还需要进一步解包裹。高、低频基准面的相位分别如图 4g 图 4h 所示 (实验中采用物体 3 个台阶中最底的台阶所在平面作为基准面), 然后分别用高、低频的真实相位减去对应的基准面的相位, 便可得到它们表面与基准面的相位差如图 4i 图 4j 所示。由于高频光栅在物体突变位置有多个周期, 故现在所求的只是高频光栅在突变位置的截断相位差, 还要根据 (14) 式利用低频光栅的相位差辅助解出高频光栅的真实相位差, 然后再乘以高频光栅的光路系数 $k_2 = Z_0 / (Y_0 2\pi f_2) = 1.313 \text{ mm/rad}$ 即可得到物体的截面形状如图 4k 所示。从图 4k 可以看到, 物体的平台部分明显比图 4j 平滑了许多, 这主要是由于平台本身有一定的起伏, 当突变位置的相位包裹没有被完全解开的时候, 其相位范围在 $0 \sim 2\pi$ 之间, 故起伏就显得比较大, 而当突变位置的包裹被解开后, 其相位范围大大地增加 (实验中为 $0 \sim 8\pi$), 所以平台的起伏就相对小了许多。把各个截面还原组合起来, 就得到物体的表面形状如图 4l 所示。实验采用的投影机为三洋 PLC-XU2520C, 分辨率为 1024×768 整个数据处理过程在奔腾 4, CPU 2.66GHz, 512M 内存的电脑上需要 0.3440s 满足实时的要求。

3.2 误差分析

本文中取物体 3 个台阶上的不同点, 比较它们的

测量值与实际值的差异, 进行误差分析。

Table 1 Metrical value and error

abscissa / pixel	practical value /mm	metrical value/mm	absolute error/mm	contrastive error/%
150	0.00	0.004	-0.004	—
250	17.52	17.482	0.038	0.22
300	17.55	17.503	0.047	0.27
400	44.90	44.953	-0.053	0.12
450	44.85	44.919	-0.069	0.15

通过表 1 可知, 由于实验中以最低的台阶所在平面作为基准面, 故其高度值为 0 测量结果的相对误差就比较大, 而随高度值的增加, 相对误差就逐渐减小。分析具体原因有下列误差因素: (1) 采用的是傅里叶变换的方法, 滤波的好坏直接影响物体还原的精度。若滤波窗口太大, 则容易有噪声的混入; 而滤波窗口太小, 就会丢失物体细节信息。(2) 实验中的“双频光栅”是通过 VC++ 模拟的, 再由投影机投射到物体表面。采集图片用的 CCD 可能和 LCD 不能完全匹配, 若 CCD 采集的像素点多于 LCD 的像素点, 那么采集的数据将合并相邻像素的灰度值, 反之, 则把一个像素的灰度值切割, 造成采集像素灰度值的不准确。(3) 通过 VC++ 模拟的“双频光栅”, 在同一个像素上的灰度值是一样的, 相邻像素的灰度值不是渐变而是按照正弦曲线跳变, 不是真正的正弦光栅, 也会影响测量精度。

(下转第 390 页)

参数补偿时标刻出来的文字,标刻图案无失真,无拉长现象,边缘轮廓清晰,与工件移动速度无关。

5 结 论

基于 DSP 和 CPLD 控制的激光飞动标刻系统通过对其标刻出的试验数据和结果分析可以发现: (1)该系统采用 DSP 和 CPLD 的动态跟踪补偿技术以及本身的飞动标刻特性,提高了加工效率,降低了劳动强度,在实际加工中能够运用与大批量生产场合。(2)利用在下位机 DSP 中进行实时的参数补偿功能能提高激光标刻图案的效果。在修正准确的情况下标刻出的文字没有变形失真,标刻出的图案光滑、细腻,图文清晰,能够达到与静止标刻相同的效果。(3)由于该系统是基于 DSP 和 CPLD 设计,其将参数补偿、修正等功能放在下位机的 DSP 中进行,而不需要在上位机中进行相关工作,减少了上位机工作的负担。因此,在系统任务多、系统资源紧张的情况下上位机可以进行其它的数据处理工作。(4)由于 CPLD 具有强大的在系统编程和快速有效的重新编程功能,因此,将其应用于激光飞动标刻系统具有开发周期短、设计灵活、控制方便等特点。

参 考 文 献

[1] ZHANG G Sh The modern technology of laser manufacture [M]. Beijing Chemical Industry Press 2006. 91~ 100 (in Chinese).

(上接第 386 页)

4 结 论

采用投影机投射双频光栅傅里叶变换法,不但可以解决单频光栅所不能测量的物体有突变情况,而且比传统的物理光栅所要求的光路精度低得多,在抗干扰、实时方面更是传统方法所不能比的。实验表明,该方法不但可以很好地解决物体有突变情况,而且通过图 4i 图 4k 还可以明显地看出,单光栅所测的精度远远没有双频光栅的精度高。但是该系统在滤波方面目前还没有很好地解决,主要靠手工选择滤波窗口,笔者下一步将在设计自适应滤波器方面做进一步的探讨。

参 考 文 献

[1] SHAO Zh Y, ZENG ZW, TANG P. Research of non-contact laser digitizing collection and machining system [J]. Laser Technology 2004 28(5): 524~ 526 (in Chinese).

[2] DU L B, GAO X H, XIA J J *et al* Research of a novel 3-D laser scanning system [J]. Laser Technology, 2005 29(4): 366~ 369 (in Chinese).

[3] ZHAO J ZHONG J G. Three-dimentioned shape measurement with

[2] LIU L, RONG T P, GUO Zh G *et al*. Application of AutoCAD in laser processing through the interface of DXF [J]. Laser Technology, 2005 29(1): 32~ 34 (in Chinese).

[3] ZHANG W N. TMS320C28X DSP's CPU and peripheral [M]. Beijing Tsinghua University Press 2004. 79~ 119 (in Chinese).

[4] LEI J Sh HUANG Zh M, GUO Zh H *et al*. A laser marker controlled by single chip microcomputer [J]. Laser Technology 2001 25(2): 140~ 142 (in Chinese).

[5] SONG W X. The technologies of automatic detect [M]. Beijing Metallurgical Industry Press 2000 197~ 216 (in Chinese).

[6] JIANG S M. Prote199 instances and exercises [M]. Beijing Posts & Telecom Press 2000 35~ 109 (in Chinese).

[7] YU H, ZHAN Zh Q, WU W. Prote198 interpret details [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2000. 223~ 251 (in Chinese).

[8] HUANG K J ZENG D W, XIE Ch Sh. The effects of curvature radius and acting speed on the top kerf width of laser cutting of thin pipe with a small diameter [J]. Laser Technology 2000 24(1): 51~ 54 (in Chinese).

[9] WAN Zh DU W X. Calibration of graphic distortion and compensation of exposure for dual galvanometer scanning [J]. Optics and Precision Engineering 2000 4(2): 115~ 118 (in Chinese).

[10] GUAN Zh Zh. The handbook of laser process arts [M]. Beijing China Metrology Publishing House, 1998 347~ 355 (in Chinese).

[11] WANG JM. The design of digital system and verilog HDL [M]. 2nd ed Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2005. 221~ 334 (in Chinese).

[12] TAN H Q. The design of C programme [M]. 2nd ed Beijing Tsinghua University Press 1999 13~ 37 (in Chinese).

digital projecting system [J]. Optical Technique 2002, 28(6): 555~ 558 (in Chinese).

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

[5] JUDGE T R, BRYANSTON-CROSS P J A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. Optics and Lasers in Engineering 1994 21(8): 199~ 239.

[6] ZHANG H, LALOR M J BURTON D R. Spatiotemporal phase unwrapping for the measurement of discontinuous objects in dynamic fringe-projection phase-shifting profilometry [J]. Appl Opt 1999 38(16): 3534~ 3541

[7] LI F, ZHOU C L. A novel profilometry with dual-frequency grating [J]. Acta Photonica Sinica 2005, 34(4): 632~ 635 (in Chinese).

[8] XU P, CHEN W J, SU X Y. Higher-precision FTP based on digital light projecting [J]. Opto-electronic Engineering 2005 32(11): 59~ 62 (in Chinese).

[9] TIAN F, ZHAO H, CHEN W Y *et al*. A novel profilometry with projecting grating [J]. Acta Optica Sinica 1996 16(10): 1506~ 1509 (in Chinese).

[10] LIU H Q, CHEN W J, SU X Y *et al*. Fast Fourier transform profilometry based on two-frequency grating projection [J]. Opto-electronic Engineering 2004 31(10): 39~ 42 (in Chinese).