

基于 LCD 数字投影技术的傅里叶变换法 测量物体三维形貌*

孙 平 张 丽 陶春先

(山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

摘 要 利用数字投影栅线技术, 采集变形前后的两幅图像, 存入计算机中, 然后根据 Fourier 变换原理进行处理, 解调出物体的形貌信息. 整个过程自动化程度较高, 尤其是投影栅线为正弦栅线且栅距随意可调, 比栅板投影栅线所含噪音小, 因此精确度较高, 而且使用的仪器常见, 对环境要求低, 简便易行, 有利于进一步推广. 给出对爆竹像的实际测量结果, 结果表明了该方法的实用价值.

关键词 信息光学; 三维形貌测量; 图像处理; 数字栅线技术; Fourier 变换

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A

0 引言

三维形貌测量在机器视觉、实物仿形、工业检测、生物医学等领域, 具有重要意义和广阔前景. 而光学三维形貌测量由于其非接触、高精度、高速等优点被广泛应用. 目前已有许多方法, 例如相位移法^[1], Fourier 变换法^[2]、莫尔 (Moiré) 条纹法^[3]、飞行时间 (Time of flight, TOF) 法^[4]、相干雷达技术^[5]等. 就如何提高其测量范围和测量精确度问题上, 一直进行着深入研究^[6~8]. 其中 Fourier 变换方法较为常用^[9], 投影条纹的质量 (受外界影响而发生的漂移和抖动程度) 和所包含的信息量是极为重要的. 近几年在改善此项技术方面也有很多进展, 如制作全息投影条纹^[10], 由计算机生成数字投影栅线^[11]等, 尤其后者可获得标准的正弦光栅, 携带的噪音很少, 且栅距随意可调, 对于实验精度有很大提高. 本文实验是根据 Fourier 变换原理, 利用数字投影栅线技术, 由连在计算机上的液晶 (LCD) 投影仪将栅线条纹投射到参考面上, 用 CCD 采集放置待测物前后的两幅图像即完成, 测量过程仅需几秒, 而且图像处理也由计算机软件控制, 人为造成的误差大大降低.

1 基本原理

图 1 中, P、C 分别为 CCD 和投影仪的光心, 两者相距 d . P-C 连线与参考面 (垂直于纸面) 平行, 且相距为 L . 当被测物不存在时, 栅线将直接投影到平直的参考面上, 此时通过 CCD 采集得到的是平直且间距相等的条纹. 放上被测物后, 投影栅线将会发生变形, 如原来直接投射到参考面上 B 点的某条

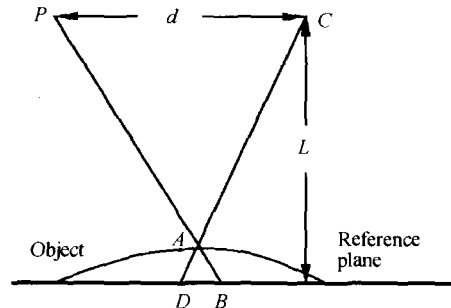


图 1 投影栅线法测量物体形貌的典型光路
Fig. 1 Shape measurement system of projected grating method

栅线, 由于物体的遮挡, 照射在物体上的 A 点. 由于 CCD 对参考面清晰成像, 因此 CCD 观察到 A 点的位置是在参考面上的 D 点, 也就是栅线由 B 点变形到 D 点, BD 称为栅线的扭曲量. 只要从变形条纹图中得到每一点的栅线扭曲量, 就可以进一步计算得到全场的高度分布 $h(x, y)$. 由三角形相似得: $h(x, y) = \frac{BD}{BD+d}L$, 若设 $\Delta\phi(x, y) = 2\pi f_0 BD$, $\Delta\phi(x, y)$ 为物体高度分布引起的相位调制, f_0 是光栅基频, 与光栅节距 p 的关系: $f_0 = 1/p$. 则 $h(x, y)$ 与 $\Delta\phi(x, y)$ 的关系为

$$h(x, y) = \frac{\Delta\phi(x, y)}{\Delta\phi(x, y) + 2\pi d/p} L \quad (1)$$

式中 $\Delta\phi(x, y)$ 而可由以下的 Fourier 变换方法得到.

Fourier 变换的原理是用 Fourier 变换把条纹图从空域变换到频域, 在频域中把高频噪音以及载波去掉, 而仅仅保留条纹频率. 然后用逆变换把频域还原到空域得到一个复数的条纹场分布, 这样通过复数运算即可得出条纹场的相位值.

由正弦光栅投影得到的变形结构光场表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\Delta\phi(x, y) + 2\pi f_0 x] \quad (2)$$

式中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为条纹幅值, $b(x,$

$y)/a(x, y)$ 为条纹对比度, $\Delta\phi(x, y)$ 为物体变形引起的相位变化, 即待求相位, 它们都是空间位置函数. 定义

$$c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y)\exp [j\Delta\phi(x, y)] \quad (3)$$

则式(2)变为

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y)\exp (j2\pi f_0 x) + c^*(x, y)\exp (-j2\pi f_0 x) \quad (4)$$

式中 j 表示虚部单位, $*$ 表示复数的共轭. 对式(4)进行 Fourier 变换就可以得到

$$H(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (5)$$

由式(5)可见频率分量集中在零频和 $\pm f_0$ 附近(如图 2). 假设这三部分频谱不重叠, 取出集中在 f_0 附近

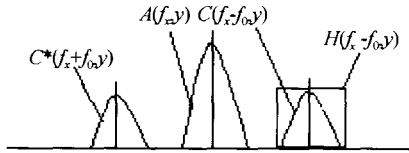


图 2 物体干涉条纹场的频谱分布
Fig. 2 Spectrum of interference fringes

的部分, 并将之移回零频, 将得到 $C(f, y)$. 对其逆变换得到 $c(x, y)$, 则相位 $\Delta\phi(x, y)$ 可由式(6)得出

$$\Delta\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \quad (6)$$

其中 $\text{Re}[\]$ 和 $\text{Im}[\]$ 分别表示复数的实部和虚部.

当条纹图不仅沿 x 方向, 而且在 y 方向上也有载波时, 则需要做二维 Fourier 变换.

2 实验及结果

实验采用 LCD 投影仪(白光光源), 其分辨率为 800×600 像素; 变焦镜头的光圈调为最小, 焦距 $f = 28 \text{ mm}$; CCD 摄像头为 WAT -902H. 采集图像为 256 色, 768×576 像素; 处理图像为真彩色(32 位).

投影仪将计算机产生的正弦栅线投射到参考屏上, 利用数字图像采集处理系统采集放置待测物(见图 3)前后的两副栅线图(见图 4(a), 4(b)), 并将两幅图存储在计算机内, 处理得到解包裹后的绝对相位图(见图 5), 再根据式(1), 将相位值转换为高度值.

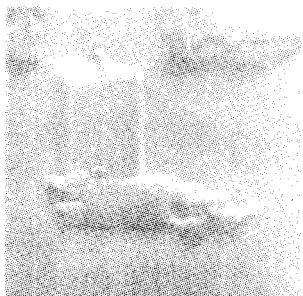


图 3 待测物(年画的一部分, 爆竹)的像
Fig. 3 Image of object(a part of picture, cracker)

最后得到物体的形貌图, 图 6 为所选区域的二维等高线图, 图 7 为三维网格图. 实际上, 物体形貌的凹面图和凸面图均可由栅线处理得出的数据绘制出来, 文中采用了物体的凹面图, 是因为凹面图更能直观地反映物体各点的高度.

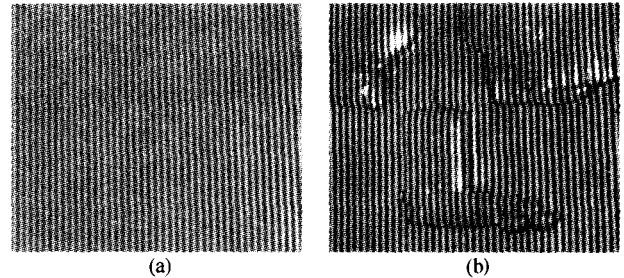


图 4 参考栅(a)和变形栅(b)
Fig. 4 Reference pattern on plane (a) and its deformed pattern on object (b)

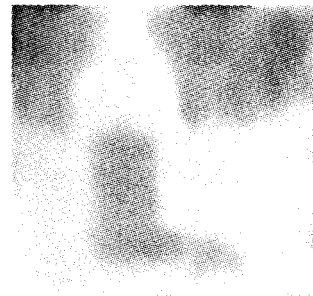


图 5 解包裹后的绝对相位图
Fig. 5 Unwrapped absolute phase

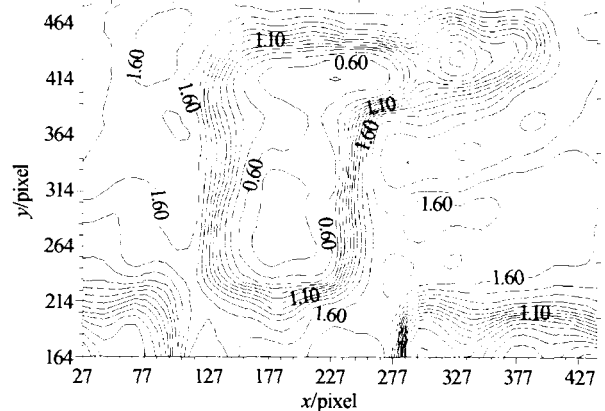


图 6 物体的二维平面图
Fig. 6 The contour of the object

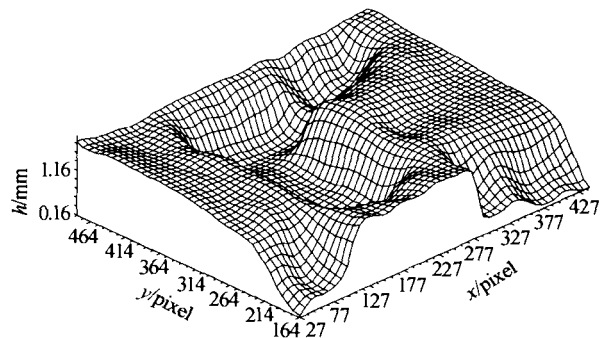


图 7 物体的三维网格图
Fig. 7 The surface of the object

由以上理论和实验可以看出,该方法采用的数字投影栅线为正弦栅线,满足变形结构光场的表达式(式(2)),且包含噪音少,因而精确度也高;结合 Fourier 变换,易于动态测量;频谱面的带通滤波能抑制噪声及背景光强不均匀. 这些优点使得三维形貌的测量过程更加简便、精确且自动化程度高. 实验结果中物体形貌清晰可见,也说明该方法的有效性. 只是在数据处理时,需要注意一级频谱范围的选择,既不能遗漏信息,也不能引入噪音.

3 结论

本文提供了一种三维形貌测量的新途径,采用了数字投影栅线技术,生成的栅线为正弦栅线,栅距随意可调且携带的噪声很少,与 Fourier 变换方法本身的优点相结合,对环境要求低,可推广到动态测量. 与其它方法相比较,自动化程度较高,人为因素较少.

参考文献

- 1 Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl Opt*, 1984, **23**(18):3105~3108
- 2 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes. *Appl Opt*, 1983, **22**(24):3977~3982
- 3 Takasaki H. Moiré topography. *Appl Opt*, 1970, **9**(10):1467~1472
- 4 Kaisto I, Kostamovaara J, Manninen Metal. Optical range finder for 1.5~10 m distances. *Appl Opt*, 1983, **22**(19):3258~3264
- 5 Dresel T, Hausler G, Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar. *Appl Opt*, 1993, **31**(7):919~925
- 6 徐建强,王蕴珊,司书春,等. 三维形貌测量的扫描相移法研究. 光子学报, 2004, **33**(10):1210~1213
Xu J Q, Wang Y S, Si S C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1210~1213
- 7 李兵,罗意平,王昭,等. 多光刀三维轮廓快速测量方法研究. 光子学报, 2002, **32**(6):738~741
Li B, Luo Y P, Wang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6):738~741
- 8 孙平,张熹,王海峰. 基于重心算法的结构光投影技术研究及应用. 光子学报, 2001, **30**(12):1481~1485
Sun P, Zhang X, Wang H F. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(12):1481~1485
- 9 翁嘉文,钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用. 光子学报, 2003, **32**(8):993~996
Wong J W, Zhong J G. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):993~996
- 10 吕晓旭,钟丽云,黄守江,等. 傅里叶变换用于全息三维物体面形测量. 光学技术, 2002, **28**(1):92~96
Lu X X, Zhong L Y, Huang S J, et al. *Optical Technology*, 2002, **28**(1):92~96
- 11 赵静,钟金钢. 数字投影系统在三维轮廓术中的应用. 光学技术, 2002, **28**(6):555~558
Zhao J, Zhong J G. *Optical Technology*, 2002, **28**(6):555~558

3-D Shape Measurement with Fourier Transform Based on LCD Projector

Sun Ping, Zhang Li, Tao Chunxian

College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014

Received date: 2005-02-28

Abstract With the digital shadow technology, reference image and deformed image are captured by CCD and saved in computer. Then the information of the object can be obtained through Fourier transform of the two images. The measurement has a high level of automation. Especially the fringes are sinusoidal patterns and the spatial line pitch can be optionally adjusted, which are more precious compared with the grating-projected fringes. The devices are common and the demand for environment is low. The results proved that the system has higher precision and further applications because of its simplicity.

Keywords Information optics; 3-D shape measurement; Image processing; Digital shadow technology; Fourier transform



Sun Ping received his B. S. degree in 1984 and M. S. degree in 1992. Then he received his Ph. D. degree in 2003. His research interests are digital image processing, shape measurement of thin shells, nondestructive testing, and experimental stress analysis.