

相移逻辑云纹法用于三维物体面形测量

张海波 伍小平

(中国科技大学近代力学系, 合肥 230026)

摘 要 讨论了相移逻辑云纹法用于三维形状测量的原理, 并给出了多个测量实例, 实验证明, 此法可快速得到物体的三维形状轮廓图, 误差小于10%.

关键词 相移, 逻辑云纹, 三维物体面形测量.

三维物体形状测量要求具有非接触、高精度、高灵敏度以及快速反应. 已有的方法有利用线光源照明的结构光法^[1]、用激光逐点扫描物表面, 测量表面反射回来时间推知距离的时间差法^[2]、利用光线的入射角随物体的斜率变化, 观测光线变化可得物体形状信息的阴影栅法^[3]以及提供了一种类似人眼原理的立体视觉法^[4]. 这些方法在不同的应用范围以及不同的测量对象中都有其成功的应用, 但也同时存在很多问题. 如结构光方法要花费很多时间得到全场形状信息, 时间差法适用于大范围测量, 立体视觉需要两幅从不同观察角度的物像.

投影云纹法^[5,6]也是一种有效的三维形状测量方法(阴影法中的一种), 可用来测量物体曲面的几何形状和平面结构的离面位移. 其缺点是精度只能达几百微米, 且存在盲区限制, 自动化程度低. 它与投影格栅法^[7]等方案目前在智能化系统中占主流. 相移逻辑云纹法(PSALM)^[8~10]是古典云纹法的计算机模拟, 也可看作是它的一种发展. 本文报道的相移逻辑云纹法用于三维形状测量时, 由计算机生成、移动参考栅实现相移, 无需步进电机等, 使数据可以实现全自动处理, 不要进行条纹凹凸等判别, 此法设备简单自动化程度高, 可快速得到物体的三维形状轮廓图, 在三维形状测量中有极大的应用潜力.

1 相移逻辑云纹法三维形状测量原理

测量原理图如图1所示. 投影仪将栅线投影到被测物表面, 在表面形成带有表面形状信息的畸变栅线, 用CCD摄像机摄入, 并通过图像板数字化和存储; 用相移逻辑云纹软件对其处理. 处理过程是: 用CCD摄像机, 先记录下投影栅到基准面上的栅线图. 再把待测物放在基准面上(一切参数同上), 投影栅投到物面上, 再记录下物面上变形栅图. 用相移逻辑云纹软件分别处理二次得到的栅线图, 将结果相减, 即可得到物面相对于基准面的高度分布. 下面推导其运算公式:

测量原理的几何关系如图2所示, 光栅投影方向与基准面成一夹角 θ , 假设观察方向是

垂直这基准平面的(也即 CCD 摄像方向). BCD 面为基准平面即参考面, 设 A 为物面上与基准平面有一相对高度 h 的某点, 投影栅的 OD 段正好投影在 AD 段, 如果没有物面高度影响, 这一段栅线会投影在基准平面的 BD 段.

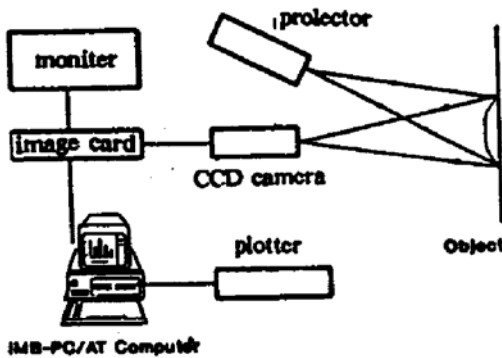


Fig. 1 Experimental setup

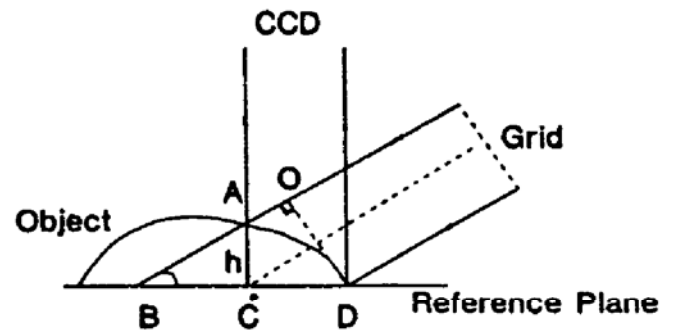


Fig. 2 Measurement principle diagram

考虑 AD 和 CD 段的逻辑云纹: 设 AD 段栅线数为 n_{AD} , CD 段栅线数为 n_{CD} . 对应于 AD、CD 段的计算机参考栅为 n_r , 这样物面和基准面上栅线与计算机参考栅形成之逻辑云纹分别为 N_{obj} 和 N_F , 由云纹原理得:

$$N_{obj} = n_r - n_{AD}, \quad N_F = n_r - n_{CD} \quad (1)$$

将二次得到的结果相减:

$$\Delta N = N_{obj} - N_F = n_{AD} - n_{CD} \quad (2)$$

由几何关系图知, AD 段的栅线数与基准面上 BD 段上相等, 故上式可变成

$$\Delta N = n_{BD} - n_{CD} = n_{BC} \quad (3)$$

式中 n_{BD} 为基准面上 BD 段栅线数, n_{BC} 为基准面上 BC 段栅线数. 设投影栅栅距为 P , (3) 式变为:

$$\Delta N = \frac{BC}{P / \sin \theta} \quad (4)$$

$$\therefore BC = h / \operatorname{tg} \theta, \quad \therefore h = (P / \cos \theta) \Delta N \quad (5)$$

如设 P_s 为基准面上投影栅栅距, 由于投影方向与基准面有个夹角 θ :

$$\therefore P_s = P / \sin \theta \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式有

$$h = P_s \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \Delta N \quad (7)$$

这就是最后的计算公式, 若已知投影在基准平面上的栅距和投影方向与基准面夹角, 就可用逻辑云纹的方法得到物面相对于基准面的形状或等高线. 从(7)可知, 影响形状测量的误差有基准面上投影栅栅距测量误差和投影方向与基准面夹角测量误差.

2 三维形状测量实例

2.1 测量一蛋糕状样品

蛋糕状样品放在一平面上(参考面), 栅线通过投影仪分别投影到样品上和参考平面上, CCD 摄像机摄像方向垂直于参考平面, 图像二值化后用相移逻辑云纹软件处理, 图 3 为形成

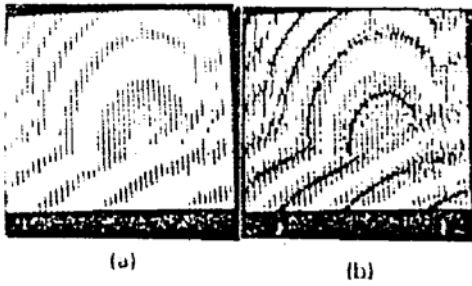


Fig. 3 (a) AND logical moire,
(b) XOR logical moire

的逻辑云纹, a) 为用逻辑运算 AND 逻辑云纹, b) 为逻辑运算 XOR 逻辑云纹, 对某一截面: 图 4 为用不同的逻辑运算方式和不同的相移代数方程完成的测量结果, 实线为用千分表测量这一截面的结果, 除了一些小的波折起伏外, 基本上一样, 少许点数据的跳跃是由于那些点栅距误差和相移不准误差引起的.

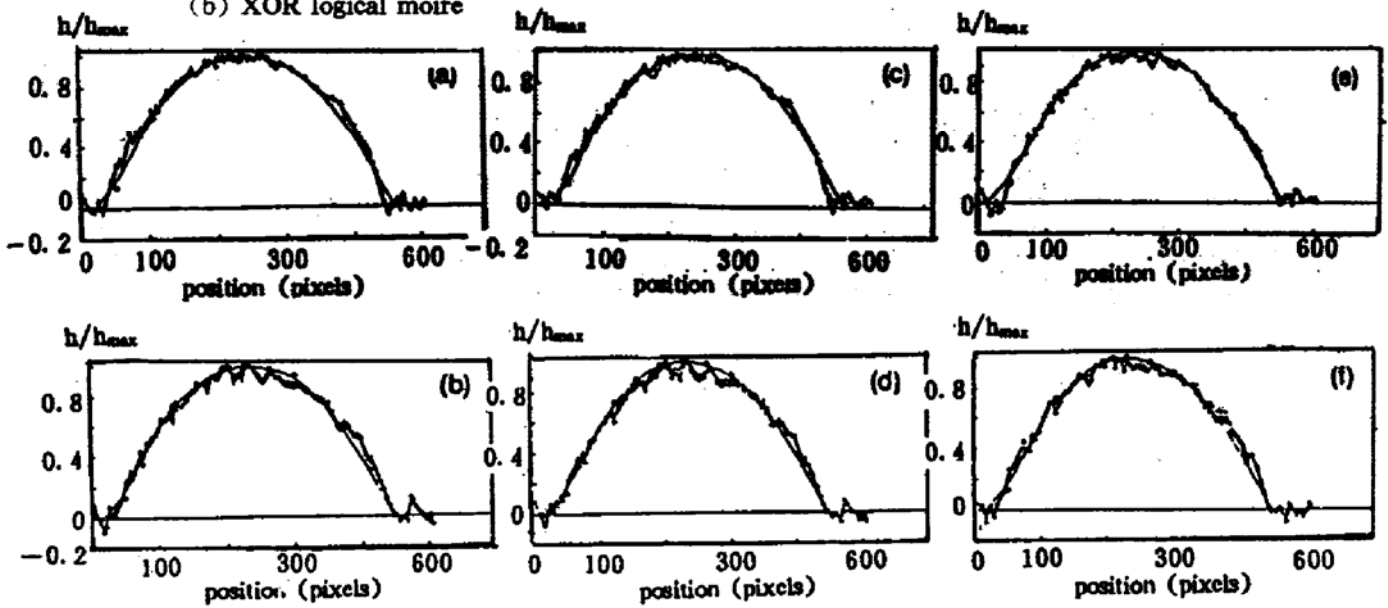


Fig. 4 Normalized depth as measured using various stepping algorithms and logical moire combinations with an average of 12.7 for two shifts (-, dial gauge; + AND operation; * XOR operation)

2.2 测量一斜面

试件为一斜块, 放在一平面上, 用投影仪投栅线于斜表面上, CCD 摄像机摄入栅线图并存储, 拿去斜面物, 摄入参考面的栅线图, 并在参考面上放一尺子, 用相移逻辑云纹法软件分别处理这两幅栅线图, 结果相减, 就可得到斜面相对于参考面的高差值. 图 5 为斜块高差三维立体形状图. 从实验数据中取出一个段面分析, 测试误差小于 10%.

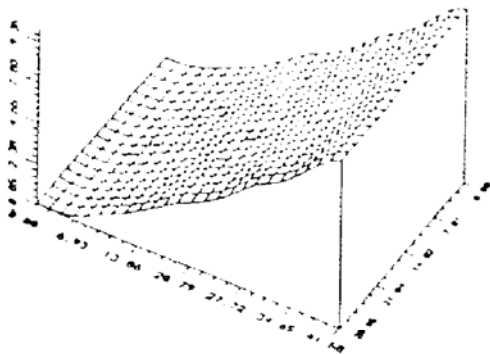


Fig. 5 The topography of the slope

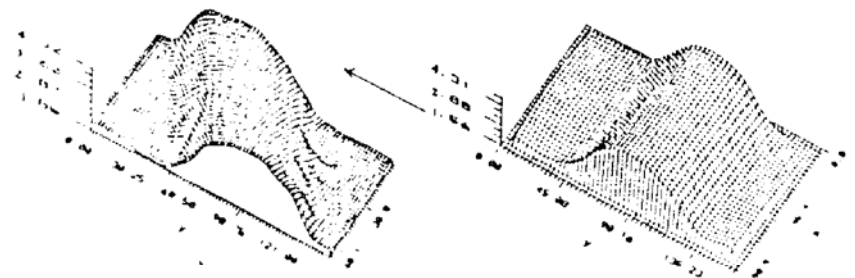


Fig. 6 The topography of the column in different positions

误差的主要来源: 实验中摄像机, 投影仪以及被测物应在同一个与栅线方向垂直的平面内, 如何保证它们的共面特性, 及如何精确测量它们相互之间的几何距离和夹角还缺少专用

工具, 另外还有栅距不均匀以及投影栅线间距测量误差等, 都影响最后的测量结果.

2.3 测量一柱面

试件为一柱表面物(测量方法同上), 柱状物放在不同位置, 测量结果如图 6 所示, 其结果有着良好的视觉效果.

小 结 相移逻辑云纹法可成功的应用于三维物体形状测量, 它是投影云纹法的一种发展, 其特点是数据可实现全自动处理, 设备简单自动化程度高. 实验表明, 此法可快速得到物体的三维形状轮廓图, 有着极大的应用潜力.

参 考 文 献

- [1] Jalkis, J. A. , Three dimensional inspection using multiscript structured light. *Opt. Eng.* , 1985, **24**(6) : 966~1002
- [2] Hansler, G. , Telecentric scanner for 3-D sensing. *Opt. Eng.* , 1985, **24**(6) : 978~984
- [3] Kender, J. R. , Shape from darkness; deriving surface information from dynamic shadows. 1987, First Int. Conf. on Computer Vision, *IEEE*, 978~982
- [4] Nishinara, H. K. , Prism; A practical real-time image stereo matcher. *Proc. SPIE*, 1983, **849** : 134~142
- [5] Takasak. H. , Moire topography. *Appl. Opt.* , 1970, **9**(6) : 1457~1463
- [6] Meadow, D. M. , Generation of surface contours by moire pattern. *Appl. Opt.* , 1970, **9**(4) : 942~950
- [7] Haliona, M. , Optical three-dimensional sensing by phase measurement profilometry. *Opt. & Lasers in Eng.* , 1989, **11**(3) : 185~215
- [8] 张海波, 相移数字云纹技术和 ESPI 新技术研究. 中国科技大学博士论文, 1992, 12
- [9] 张海波, 伍小平, A. Asundi, 相移逻辑云纹法. 实验力学, 1993, 待发表
- [10] Asundi. A. , K. H. Yung, Phase-shifting and logical moire. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1991, **8**(10) : 1591~1600

The 3-D Shape Measurement with Phase-Shift and Logical Moire Method

Zhang Haibo Wu Xiaoping

(Department of Modern Mechanics, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)

(Received 1993; revised 1993)

Abstract This paper discusses the 3-D shape measurement using phase-shift and logical moire (PSALM) method. Several specimen have been tested. The experimental results verify that the 3-D shape contour can be measured quickly by this method and the error is less than 10%.

Key words phase-shift, logical moire, 3-D shape measurement.