

电子 XOR 莫尔等高术及产生微分和旋转剖面效应的研究

张 鸿 刘立人 伍树东 王之江
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文提出利用数字电子 XOR (异或)运算,得到三维物体的实时等高线条纹,这种莫尔技术的特点是能消除莫尔纹的载频。用该方法,通过改变投影光栅周期,实现空间等高剖面的旋转,横向移动物体得到实时的斜率等位线条纹,并给出实验结果。

关键词: 莫尔拓扑; 数字处理; XOR 逻辑。

一、引 言

莫尔拓扑技术应用于分析三维物体形状,简单而实用。不少学者对其进行了许多有益的研究。莫尔拓扑技术主要有两种方法,光栅照射法^[1,2]和光栅投影法^[3]采用这些方法得到的莫尔条纹,存在载频项和高频项的噪声干扰。在大部分情况下,高频项不被记录介质或人眼分辨,所以消除载频成为主要问题。许多学者在这方面做了大量有益的工作^[4~9]。

本文提出用数字图像处理系统,对两幅带有光栅条纹的图像进行实时相减并取绝对值的运算,即异或逻辑运算方法。得到消除载频的莫尔等高线条纹。实验时用相干球面波照明矩形光栅,并利用 Talbot 自成像效应投射光栅到三维物体上。当横向移动物体时,利用上述方法,产生微分效应,得到等斜率的莫尔条纹。沿光轴方向移动光栅,改变投影光栅周期,产生旋转剖面的效应。因此,本系统不仅具有消除载频的特性,而且能够得到三维物体的各种信息,在机器人视觉和医学测量等方面具有广泛的应用价值。

二、原 理

当利用莫尔技术进行测量时,一般采用“积型莫尔条纹”^[1~2],即两块光栅的透过率相乘得到莫尔条纹,也有采用“和型莫尔条纹”^[3],即两块光栅的透过率相加得到莫尔条纹,这两种方法都无法消除载频,如图 1(a)、(b) 所示,用逻辑代数表示,“积型”等效为“与”运算,“和型”等效为“或”运算,但如用“异或”运算产生莫尔条纹,则能够消除载频。如图 1(c) 所示。三种逻辑运算结果见图 1(a')、(b')、(c')。

用数字图像处理系统,对两幅图像进行实时相减并取绝对值 $|A-B|$,能够方便地实现“异或”运算,消除莫尔条纹的载频。

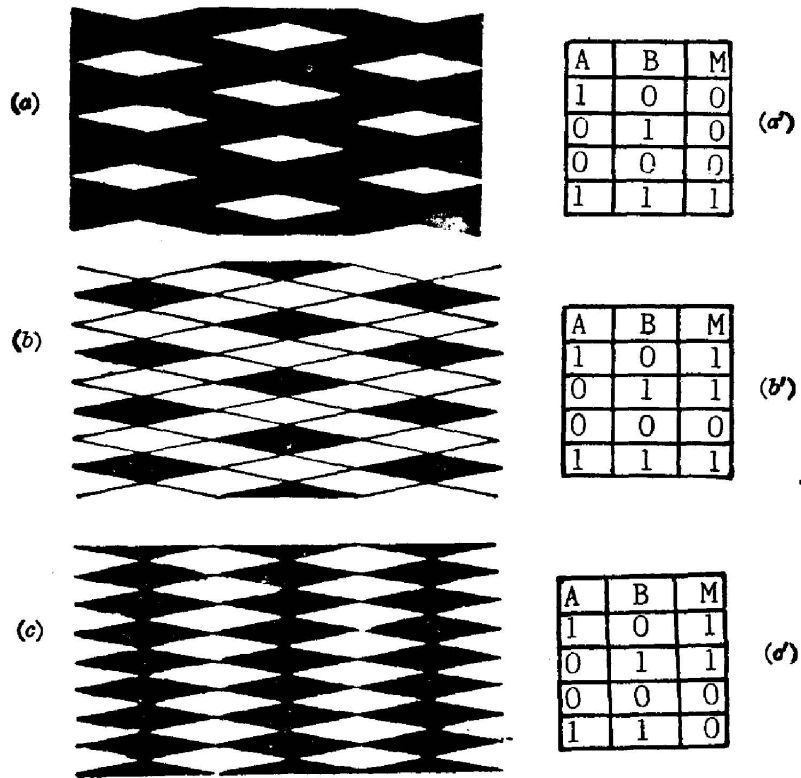


Fig. 1 Illustration of logical operation on binary Ronchi gratings
 (a) logical AND; (b) logical OR; (c) logical XOR
 operation (a') AND logic (b') OR logic; (c') XOR logic

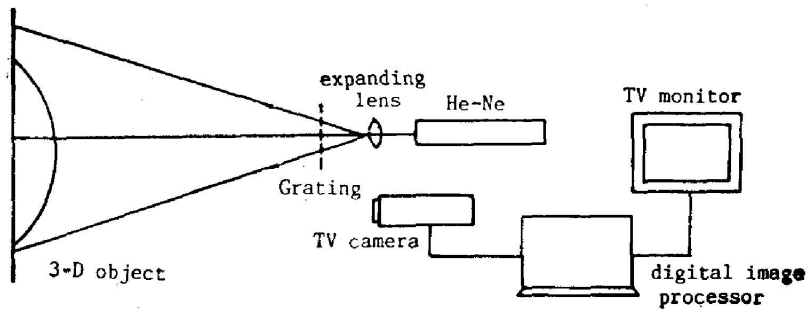


Fig. 2 Experimental setup

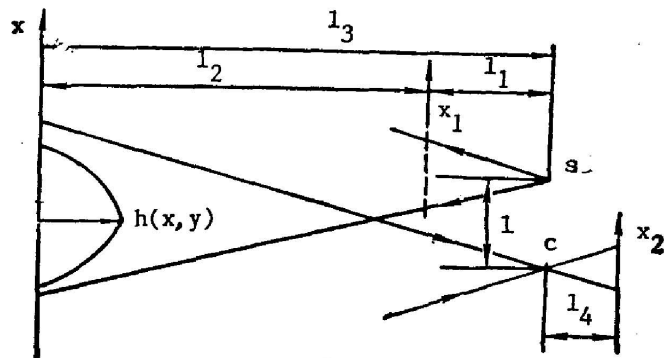


Fig. 3 Schematic diagram of optical arrangement

图 2 为实验装置。投影系统是用 He-Ne 激光器经过显微物镜扩束照明矩形光栅。利用 Talbot 自成像效应,将光栅投影到三维物体上。先将白屏放置参考面处,摄像机拍摄原光栅像,并由数字图像处理系统贮存。然后,将被测三维物体替代白屏,摄像机拍摄物体上的变形光栅,在数字图像处理系统中,原光栅和变形光栅进行 XOR 运算,所得物体的莫尔等高线条纹显示在监视屏上。

可见,用数字处理办法实现 XOR 运算,能够实时处理。但是,用光学方法实现 XOR 逻辑运算^[10]处理上比较复杂。

图 3 所示为测量系统的光学结构。Ronchi 光栅的 Talbot 自成像距离公式^[11]

$$\frac{l_1 \cdot l_2}{l_1 + l_2} = \frac{2mT^2}{\lambda}, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式中: T 为光栅周期; λ 为相干光波长, $l_3 = l_1 + l_2$ 。在 l_3 距离为一定长且 l_1, l_2 满足公式(1)时,光栅成像清晰。这时, m 为某特定值 m' , 轴向移动光栅, 改变 l_1 和 l_2 , 则 m' 不为整数, 光栅成像变为模糊。可以认为光栅连续移动的范围以 $m' \pm \frac{1}{2}$ 作为能比较清晰成像的判据。如果光栅不是连续而是间断移动, 使 m' 达到 $m' \pm 1, m' \pm 2, \dots$, 则光栅清晰成像。

周期为 T 的 Ronchi 光栅的透过率表达式为:

$$g(x) = \sum_n \text{rect}\left(\frac{x_1 - nT}{d}\right) \quad (2)$$

与 S 相距 l_3 的基准平面上的光栅投影像为:

$$I_1(x) = I_1 \sum_n \text{rect}\left(\frac{x/m_1 - nT}{d}\right) \quad (3)$$

式中: $M_1 = \frac{l_3}{l_1}$ 为放大率。

摄像机系统等效于小孔成像系统, 其放大率为 $M_2 = \frac{l_4}{l_3}$ (一般 $M_2 < 1$), 则 TV 记录的光栅像为:

$$I_2(-x_2, -y_2) = I_2 \sum_n \text{rect}\left(\frac{\frac{x_2 - M_2 l}{M_1 M_2} - nT}{d}\right) \quad (4)$$

以 x 面为基准面, 被测物体的高度为 $h(x, y)$, 则记录的变形光栅像为:

$$I_3(-x_2, -y_2) = I_3 \sum_n \text{rect}\left(\frac{\frac{x_2 - M'_2 l}{M'_1 M'_2} - nT}{d}\right) \quad (5)$$

式中: $M'_1 = \frac{l_3 - h(x, y)}{l_1}$, $M'_2 = \frac{l_4}{l_3 - h(x, y)}$ 。根据 XOR 运算特性, 输出结果为:

$$I(-x_2, y_2) = |I_2(-x_2, -y_2) - I_3(-x_2, -y_2)| \quad (6)$$

得到消除载频的莫尔等高线中心位置表达式:

$$c(x, y) = \sum_n \delta \left[\frac{l_1}{l_3} l \left(1 - \frac{1}{1 - \frac{h}{l_3}} \right) nT \right]$$

取近似 $h \ll l_3$, 则

$$c(x, y) = \sum_n \delta \left(\frac{l_1 h l}{l_3^2} - nT \right)$$

因此等高线方程为:

$$h = nT \frac{l_3^2}{l_1 l}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

三、微分效应^[12]

如前述, 摄像机记录的物体变形光栅像为 $I_3(-x_2, -y_2)$ 。若使三维物体在参考面内移动 $(\Delta x, \Delta y)$, 得到位移后变形光栅像:

$$I_3'(-x_2, -y_2) = I_3 \sum_n \text{rect} \left(\frac{x_2 - M_1'' l - nT}{M_1'' M_2'' d} \right), \quad (8)$$

式中: $M_1'' = \frac{l_3 - h(x + \Delta x, y + \Delta y)}{l_1}$, $M_2'' = \frac{l_4}{l_3 - h(x + \Delta x, y + \Delta y)}$ 。

通过数字图像处理系统作实时 XOR 运算, 由(5)式和(8)式, 得:

$$I^* = |I_3(-x_2, -y_2) - I_3'(-x_2, -y_2)|。$$

相应莫尔条纹中心位置表达式:

$$c'(x, y) = \sum_n \delta \left\{ \frac{l_1 l}{l_3^2} [h(x + \Delta x, y + \Delta y) - h(x, y)] - nT \right\},$$

给定 $\Delta x, \Delta y$ 莫尔条纹只是 $h(x + \Delta x, y + \Delta y) - h(x, y)$ 的函数, 即:

$$h(x + \Delta x, y + \Delta y) - h(x, y) = nT \frac{l_3^2}{l_1}, \quad (9)$$

当 Δx 和 Δy 较小时, 取一级近似, 得:

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{h(x + \Delta x, y + \Delta y) - h(x, y)}{(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}}。 \quad (10a)$$

由(9)式和(10a)式, 有: $\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{nT l_3^2}{l_1 (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}}$ 。这样得到了三维物体斜率等位线条纹。

如果, $\Delta y = 0, \Delta x \neq 0$ 。两个条纹间表示在 x 方向上斜率的增量为:

$$\frac{dh}{dx} = \pm \frac{T l_3^2}{l_1 \Delta x}。 \quad (10b)$$

四、旋转剖面效应

根据图 3 沿光轴方向移动光栅, 移动距离 l_1 至 l_1' , 放大率变为 m_1, m_2 , 则由摄像机记录的变形光栅像为:

$$I_4(-x_2, -y_2) = I_4 \sum_n \text{rect} \left(\frac{x_2 - m_2 l - nT}{m_1 m_2 d} \right)。 \quad (11)$$

通过数字图像处理系统作实时 XOR 运算, 由(4)式和(11)式, 得:

$$I_m = |I_2(-x_2, -y_2) - I_4(-x_2, -y_2)|,$$

相应莫尔等高线方程为:

$$\frac{x_2 - M_2 l}{M_1 M_2} - \frac{x_2 - m_2 l}{m_1 m_2} = nT,$$

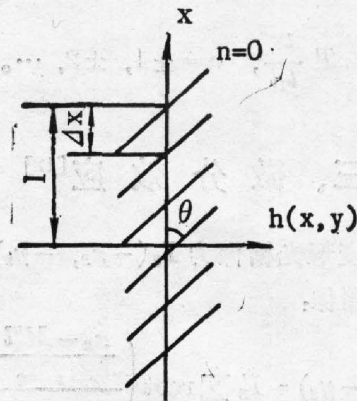


Fig. 4 Schematic diagram of equiorder surfaces rotation

将 $m_1 = \frac{l_3 - h}{l_1}$, $m_2 = \frac{l_4}{l_3 - h}$, $x_2 = \frac{l_4}{l_3} x$ 代入上式, 并对 x 求导, 取近似 ($l_3 \gg h$), 得:

$$\text{tg } \theta = \frac{dh}{dx} = -\frac{l_3}{l} \left(\frac{l_1}{l_3} - 1 \right). \quad (12)$$

(12)式表示空间等高剖面的斜率, 如图4所示:

θ 随 l_1 改变而变化, 相当于等高剖面旋转。

根据公式(1)可知, 光栅的轴向移动是非连续的, 在实验中光栅的移动范围只能是原光栅位置前后 1~2 个间距。

五、实验结果

本实验采用“VIDEO FRAME MEMORY C1257-01”数字图像处理系统, 每幅图像记

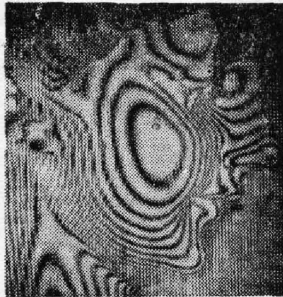


Fig. 5 Photography of moire contour pattern with electronic XOR operation



Fig. 6 Photography of traditional moire contour pattern with unwanted term



Fig. 7 Photography of slope contour pattern with electronic XOR operation

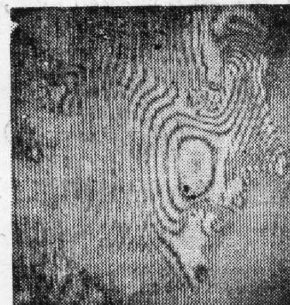


Fig. 8 Photography of equiorder surfaces rotation effect with electronic XOR operation

录的像素为 512×512 (8 bits/pixel), 实验装置光路结构各参数为: $l = 45$ cm, $l_3 = 148$ cm, $l_4 = 24$ cm, $l_4 = 6$ cm; 光栅周期 $T = 0.2$ mm。由(7)式: $\Delta h = T \cdot \frac{l_3^2}{l_1 l} \doteq 4$ mm。

用石膏人头像作为三维被测物体进行实验, 图 5 为数字电子 XOR 运算后得到的莫尔等高线条纹, 基本上消除载频。图 6 是一般的莫尔等高线条纹, 带有明显的载频。图 7 为经 XOR 操作的斜率等位线条纹, $\Delta x = 10$ mm, $\Delta y = 0$ 。由公式(10b)得 $dh/dx = 0.4$ 。从图 7 得出表面斜率大的地方条纹变密。图 8 表示轴向移动光栅并经 XOR 操作后得到的莫尔等高线图。 $l_1 = 20$ cm。由公式(12)得 $\theta = -30^\circ$, 与图 5 比较, 很明显环形条纹向前面移动是由于剖面旋转引起条纹图形的变化。

运用本系统要注意, 由于投影光束光斑不均匀和物体表面反射不均匀, 引起记录图像光强的不均匀, 使得两幅图像进行 XOR 运算后, 得到的莫尔等高线不能完全消除载频, 这从照片中可以看出。改进的办法: 在电视系统中加一个域值电平, 使整个像面光强均匀, 可以得到满意的结果。

参 考 文 献

- [1] H. Takasaki; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, No. 6 (Jun), 1457.
- [2] D. M. Meadows *et al.*; *Appl. Opt.*, 1970, **9**, No. 4 (Apr), 942.
- [3] H. Takasaki; "Holography in medicine and biology", (edited by G. Uon Bally, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979), 45.
- [4] B. Dessus *et al.*; *Opto-electronic*, 1973, **5**, 369.
- [5] P. Benoit *et al.*; *Nour. rev. Optique*, 1975, **6**, No. 2 (Feb), 67.
- [6] J. B. Allen *et al.*; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 1 (Jan), 210.
- [7] M. Halioua *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 6 (Mar), 850.
- [8] H. Kogel *et al.*; "Holography in medicine and biology", (edited by G. Uon Bally, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979), 60.
- [9] K. J. Gasvik; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 23 (Dec), 3543.
- [10] J. J. Zhang *et al.*; *Opt. Commun.*, 1988, **66**, No. 4, 179.
- [11] 廖江红等; 《光学学报》, 1985, **5**, No. 4 (Apr), 331.
- [12] O. Kafri *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 5 (Mar), 650.

Study of electronic XOR logic Moire technique and effect of differential equiorder surfaces rotation

ZHANG HONG, LIU LIREN, WU SHUDONG AND WANG ZIJIANG
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 19 April 1988)

Abstract

This paper reports the Moire technique by means of digital electronic XOR logic for obtaining 3-D object contour fringes in real time. The main advantage of this method is removal of the unwanted patterns. In this method the rotation of equiorder surfaces is obtained by changing period of projection grating. Also the slope contour fringes are obtained by moving the object in lateral. The projection system by means of self-imaging Talbot effect is used. The experimental results are presented.

Key words: Moire topography; digital processing; XOR logic.