

# 线性结构光编码的三维轮廓术

张舜德

(甘肃工业大学石油化工学院, 兰州 730050)

方 强

(西安邮电学院电信系, 西安 710061)

**摘 要** 提出一种新的光学轮廓术——线性编码轮廓术, 它利用周期线性结构光编码三维物面, 并辅以相移技术来解调相位。本文详细给出了线性编码轮廓术的原理, 并通过实验验证了其可行性。

**关键词** 线性编码, 相移, 轮廓术。

## 1 引 言

主动式光学轮廓术基于人为对被测物面的光学编码和与之相应的解码技术。光学编码可以是强度的, 也可以是颜色的。目前, 编码光一般采用强度分布为正弦或周期性矩形的结构光, 而在解码中, 相位的提取则多种多样。主要的光学轮廓术有: 莫尔轮廓术<sup>[1]</sup>、傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[2]</sup>及相位测量轮廓术(PMP)<sup>[3]</sup>。

相位测量轮廓术基于传统干涉计量法中所用到的正弦光栅投影和相移原理, 被测物面上某点的二维相位求解仅需该点一点的光学信息, 对计量场背景、对比度变化及系统的噪声有较低的敏感性, 是近年发展起来的一种较好的三维传感技术。但由于它借助于正弦结构光编码, 因而解码所需的采样值较多, 即使在对比度为已知的前提下, 至少还需三个采样值, 解码速度慢, 用于动态问题的研究存在一定困难。

本文提出了利用周期线性结构光编码并结合相移技术解码的新的三维传感技术, 称之为线性编码轮廓术(Linearly Coded Profilometry)。它与相位测量轮廓术相似, 但在相位求解时, 所需采样值更少, 计量速度更快。

## 2 线性编码轮廓术的原理

线性编码轮廓术由编码过程和解码过程组成。

将一线性结构光栅投影于参考面  $x-y$  上时, 参考面上投影光的强度分布可表示为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y)[\varphi(x, y)/T]_m\} \\ &= R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y)[x/T]_m\} \end{aligned} \quad (1)$$

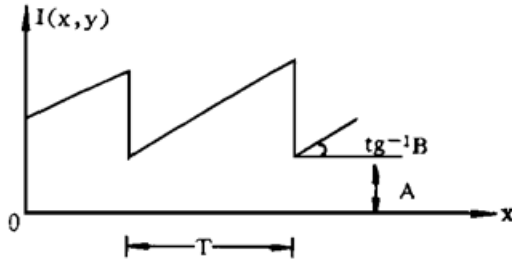


Fig. 1 Section drawing of linear coding intensity in x direction

其中,  $R(x, y)$  为被测物表面的反射率分布,  $A(x, y)$  为背景强度,  $B(x, y)$  这线性结构光斜边的斜率,  $T$  为条纹周期,  $\mathcal{Q}(x, y)$  为相位分布,  $[\ ]_m$  表示求模运算。图 1 为参考面光强分布沿  $x$  方向的剖视图。线性结构光经置于参考面  $x-y$  上的三维物体的面形调制后, 变形条纹的强度分布为

$$I(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) [\mathcal{Q}(x, y)/T]_m \} = M(x, y) \{ \mathcal{Q} + [\frac{\mathcal{Q}(x, y)}{T}]_m \} \quad (2)$$

其中,  $M(x, y) = R(x, y)B(x, y)$ ,  $\mathcal{Q} = A(x, y)/B(x, y)$ , 相位分布  $\mathcal{Q}(x, y)$  表征变形条纹的相对位移特征, 因而与物体高度分布  $Z(x, y)$  直接相关。由于  $\mathcal{Q}$  的取值对  $\mathcal{Q}(x, y)$  的相对分布无关紧要, 因此(2)式可进一步表示为

$$I(x, y) = M(x, y) \mathcal{Q}_m(x, y) \quad (3)$$

其中,  $\mathcal{Q}_m(x, y) = \mathcal{Q} + [\frac{\mathcal{Q}(x, y)}{T}]_m$ 。在现代干涉计量技术中, 为了增加  $\mathcal{Q}_m(x, y)$  提取的准确性和完备性, 通常在计量场中引入相位调制, 以辅助  $\mathcal{Q}_m(x, y)$  的提取, 即

$$I(x, y) = M(x, y) [\mathcal{Q}_m(x, y) + \delta] \quad (4)$$

其中  $\delta$  是人为引入的相移量。在该计量场中人为地改变  $\delta$ , 并探测相应的  $I(x, y)$ , 就可方便地解出  $\mathcal{Q}_m(x, y)$ 。(4) 式中仅有两个未知量, 利用两个或两个以上的采样值就可求取  $\mathcal{Q}_m(x, y)$ 。

### 2.1 利用两个采样值解码的线性编码轮廓术

在(4)式中, 分别取对应于  $\delta = 0$  的采样值

$$I_1(x, y) = M(x, y) \mathcal{Q}_m(x, y) \quad (5)$$

及对应于  $\delta = \delta_0$  的采样值。这里存在两种可能的采样, 采样方式与  $\mathcal{Q}_m(x, y)$  和  $\delta$  的取值有关, 图 2(a)、图 2(b) 分别为当  $\mathcal{Q}_m(x, y)$  一定时,  $\delta$  取不同值时的采样情况。则

$$I_2(x, y) = \begin{cases} M(x, y) [\mathcal{Q}_m(x, y) + \delta_0] & I_2 > I_1 \\ M(x, y) [\mathcal{Q}_m(x, y) + \delta_0 - T] & I_2 < I_1 \end{cases} \quad (6)$$

由(5)、(6)两式可得

$$\mathcal{Q}_m(x, y) = \begin{cases} I_1(x, y) \delta_0 / [I_2(x, y) - I_1(x, y)] & I_2 > I_1 \\ I_1(x, y) (T - \delta_0) / [I_1(x, y) - I_2(x, y)] & I_2 < I_1 \end{cases} \quad (7)$$

(7) 式中, 当  $I_2 > I_1$  时,  $0 < \mathcal{Q}_m(x, y) \leq T - \delta_0$ ; 当  $I_2 < I_1$  时,  $T - \delta_0 < \mathcal{Q}_m(x, y) \leq T$ 。

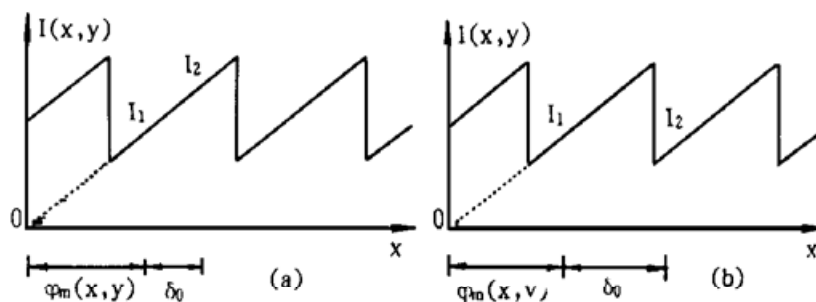


Fig. 2 The two possible sampled intensities at  $\delta = \delta_0$

利用线性结构光编码测量三维物体的面形具有以下特点:

1) 解码仅需一次相位变化和两个采样值, 数据量少, 且相位求解的运算简单(仅是一些加减乘除运算), 因此测量速度较快;

2) 理论上, 只要相移量  $\delta$  满足:  $0 < \delta < T$ , 就可通过(7) 式求得相位值。但在实际计量中, 由于受各种因素的影响, 探测值存在着误差, 从而引入了计量误差。对于不同的  $\delta$  值, 计量精度不同, 当相移量  $\delta = T/2$  时, 计量精度最高(证明从略)。在最小采样(线性编码轮廓术为两个采样值, 相位测量轮廓术为三个采样值) 及采样误差相同的条件下, 由于线性编码轮廓术的方法在具体实施中可采用最佳相移量  $\delta = T/2$  进行采样, 因此计量精度高于相位测量轮廓术的方法;

3) 对于三维机器视觉、在线检测、加工过程质量控制等系统而言, 重要的是能实现三维动态传感。线性编码轮廓术在引入多通道技术进行动态测量时, 只需两通道(而相位测量轮廓术最少为三通道)。系统构造简单, 其结构位置及各通道间的光强匹配易于标定, 光能利用率高于相位测量轮廓术, 因而在用于动态问题研究中有着明显的优势。

### 2.2 利用多个采样值解码的线性编码轮廓术

在某些场合下, 探测值往往存在着较大的误差, 为了提高测量精度, 通常利用多个采样值来求解相位。采样既可以是等间距的, 也可以是不等间距的(可以证明最佳采样方式为等间距采样), 则对应于相移量  $\delta_i (i = 0, 1, \dots, N - 1)$  的  $N$  个采样值分别为

$$\begin{aligned}
 I_0 &= M(x, y) \Phi_m(x, y) \\
 I_1 &= M(x, y) [\Phi_m(x, y) + \delta_1] \\
 &\dots \\
 I_{J-1} &= M(x, y) [\Phi_m(x, y) + \delta_{j-1}] \\
 I_J &= M(x, y) [\Phi_m(x, y) + \delta_J - T], \quad (I_J < I_0) \\
 I_{J+1} &= M(x, y) [\Phi_m(x, y) + \delta_{J+1} - T] \\
 &\dots \\
 I_{N-1} &= M(x, y) [\Phi_m(x, y) + \delta_{N-1} - T]
 \end{aligned} \tag{8}$$

(8) 式中,  $1 \leq J \leq N - 1, 0 < \delta_1 < \delta_2 < \dots < \delta_{N-1} < T$ 。图 3 为  $N$  次采样的强度分布示意图。根据最小二乘原理, 误差方程为

$$\begin{aligned}
 E(M, \Phi_m) &= \sum_{i=0}^{J-1} [I_i - M(\Phi_m + \delta_i)]^2 \\
 &+ \sum_{i=J}^{N-1} [I_i - M(\Phi_m - \delta_i - T)]^2 \tag{9}
 \end{aligned}$$

要使  $E(M, \Phi_m)$  为最小, 则必须满足

$$\begin{cases} \partial E(M, \Phi_m) / \partial M = 0 \\ \partial E(M, \Phi_m) / \partial \Phi_m = 0 \end{cases} \tag{10}$$

即

$$\begin{cases} k_1 - NM\Phi_m - k_2M + (N - J)TM = 0 \\ k_1\Phi_m + 2[k_2 + (N - J)T]M\Phi_m - NM\Phi_m^2 + [2k_6T - (N - J)T^2 - k_4]M + k_3 - k_5T = 0 \end{cases} \tag{11}$$

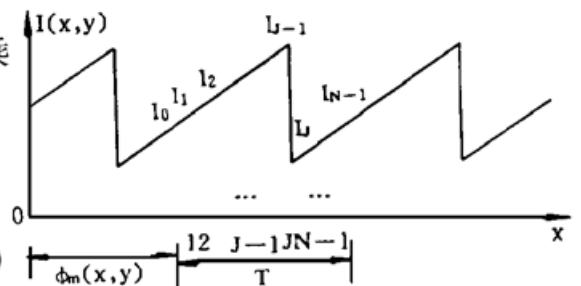


Fig. 3 Distribution of multiple sampled intensities

其中

$$\begin{aligned} k_1 &= \sum_{i=0}^{N-1} I_i, & k_2 &= \sum_{i=0}^{N-1} \delta_i, & k_3 &= \sum_{i=0}^{N-1} I_i \delta_i, \\ k_4 &= \sum_{i=0}^{N-1} \delta_i^2, & k_5 &= \sum_{i=J}^{N-1} I_i, & k_6 &= \sum_{i=J}^{N-1} \delta_i, \end{aligned} \quad (12)$$

解方程组(11)可得

$$\varphi_m = \frac{T k_2 k_5 - k_2 k_3 + (N - J) T k_3 + k_1 k_4 - 2 T k_1 k_6 + (k_1 - k_5)(N - T) T^2}{N k_3 - T N k_5 - k_1 k_2 + (N - J) T k_1} \quad (13)$$

由(7)式和(13)式求得的二维相位分布  $\varphi_m(x, y)$ , 其值包裹于  $0 \sim T$  之间, 因此还需要进行相位展开<sup>[4]</sup>。

### 3 实 验

主动式三角测量的过程实质上是利用光强、颜色或特殊标记按某种结构分布的结构光对三维物面进行编码和通过解码重建三维物面的过程, 因此三维物体面形上任意一点的可测条件为:

- 1) 该点必须位于投影系统和摄像系统的景深范围之内;
- 2) 投影系统能对该点实现编码;
- 3) 摄像系统可以获取解码所需的该点的完整编码信息。

三维物面上满足可测条件的点必定是非盲点, 即它一定位于投影系统视场与摄像系统视场的重合区且不产生遮挡, 因此系统构造首先应满足可测条件。其次, 投影系统的主光轴与摄像系统的主光轴之间的相对位置(二者接近程度及夹角)决定着系统的测量范围, 影响系统的测量精度, 故在系统构造时, 应根据实际测量要求充分予以考虑。

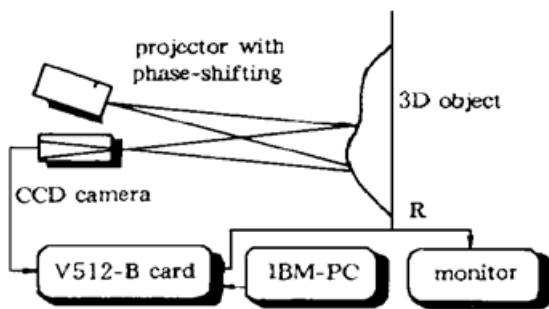


Fig. 4 Block diagram of LCP 3D sensing system

为了验证线性编码轮廓术的可行性, 在基于微机的常规三角投影测量系统上建立了基于线性编码轮廓术的三维传感系统(如图4)。投影系统由 KINDERMANN 投影仪、线性结构光栅胶片、相移器组成, 它实现对三维物面的线性编码。记录、分析系统由一台 MINTRON-1881CB CCD 摄像机、一块 V512-B 伪彩色图像卡(512×512×8 bit)、PHILIPS 彩显及 486 微机组成, 它们共同完成变形条纹图像的采集、存取、显示和处理。

实测过程为: 先求出参考面  $x-y$  上的相位分布  $\varphi_m(x, y)$ , 然后再求出三维物面的相位分布  $\varphi_m(x, y)$ , 据此可求得被测物面相对于参考面  $x-y$  的相位分布

$$\Delta \varphi_m(x, y) = \varphi_m(x, y) - \varphi_m(x, y) \quad (14)$$

最后, 通过系统定标即可由  $\Delta \varphi_m(x, y)$  求得被测物面相对于参考面  $x-y$  的高度分布  $Z(x, y)$ 。

在本系统中, 对一洗发精瓶进行了实测。利用最佳相移下探测得到的两个采样值来解码, 图5为线性结构光对被测物面编码结果的其中一个采样, 图6为测量结果的三维重建。经过对实测结果的统计分析, 本项实验的相对误差不大于5%。

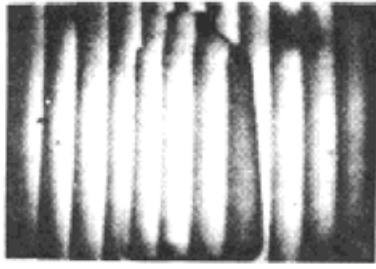


Fig. 5 Deformed fringe pattern on the measured surface of object

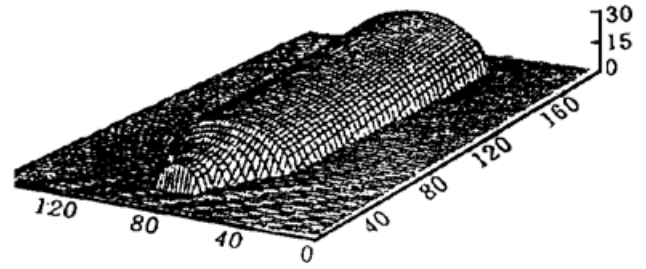


Fig. 6 3D reconstruction of the result

**总 结** 近二十多年来,人们将计算机及其相关技术引入光学三维面形的测量中,获得了许多高效、高精度的测量方法。利用正弦结构光编码并结合相移技术解码的相位测量轮廓术是近年发展起来的一种较好的三维面形测量技术。本文所提出的线性编码轮廓术,与相位测量轮廓术类似,但其所需的采样值更少,运算处理速度更快,具有用于动态问题研究的潜力。实验表明,线性编码轮廓术是一种可行的、特性优良的三维轮廓术,在机器人三维视觉、实时检测、加工过程质量控制等方面可发挥其独特的作用。

### 参 考 文 献

- [1] Guan-Chang Jin, Shouhong Tang, Automated moire contouring of diffuse surfaces. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(11): 1211~ 1215
- [2] Mitsuo Takeda, Kazuhire Mutch, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D objects shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~ 3982
- [3] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~ 3108
- [4] Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kobayashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~ 160

## Linearly Coded Profilometry

Zhang Shunde

(Oil & Chemical Engineering Institute, Gansu University of Technology, Lanzou 730050)

Fang Qiang

(Department of Telecommunication, Xi'an Institute of Post & Telecommunication, Xi'an 710061)

(Received 11 April 1996; revised 22 December 1996)

**Abstract** A new optical profilometry-linearly coded profilometry is presented. It uses a periodic linear structure illuminating light to code the surface and the phase shifting technique to decode the phase. The principle of linearly coded profilometry is discussed in detail and the reliability is verified by the experiment results.

**Key words** linear coding, phase-shifting, profilometry.