

两个采样解码的线性编码轮廓术: 最佳相移量, 精度及应用

张舜德^{1, 2} 方 强³ 卢秉恒¹

- 1, 西安交通大学机械工程学院 RP&M 工程研究中心, 西安 710049
- 2, 甘肃工业大学石油化工学院, 兰州 730050
- 3, 西安邮电学院电信系, 西安 710061

摘 要 线性编码轮廓术(LCP)是最近提出的一种新的光学轮廓术, 本文从更为实际的角度出发, 考察了两个采样实现线性编码轮廓术的最佳相移量及精度, 并提出两类动态多通道方案。

关键词 轮廓术, 线性编码, 最佳采样, 精度分析, 多通道技术。

1 引 言

在文献[1]中, 作者提出并验证了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被测物面, 相移技术用于解码轮廓, 解码可利用两个或两个以上的采样值实现。当用两个采样值解码时, 计量速度最快, 而其计量精度则取决于采样方式及采样误差的大小。对确定的采样误差, 存在一个最佳采样方式, 在这种采样方式下可得到最精确的测量结果, 或者说测量结果对采样误差的抗干扰能力最强, 故计量信息的获取应在最佳采样方式下进行。

线性编码轮廓术不仅能实现静态测量, 还可与多通道技术结合用于动态测量。目前, 能实现三维动态测量的光学传感法主要有^[2]: 激光测距、立体视差、结构光编码测量等。在结构光编码测量的方法中, 相位测量轮廓术(PMP)是近年出现的一种性能优良的三维轮廓术, 但由于借助正弦结构光编码, 解码所需采样值较多(至少需三个采样值), 因而用于动态问题的研究仍有困难。线性编码轮廓术则利用周期线性结构光编码, 解码仅需两个探测值, 用于动态测量, 引入两通道就可实现。本文重点讨论两个采样实现的线性编码轮廓术的最佳采样方式及其精度, 此外, 还将给出两类双通道动态三维传感方案。

2 最佳采样方式及精度分析

2.1 最佳相移量的确定

在线性编码轮廓术中, 计量场的分布为

$$I(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) [\mathcal{Q}(x, y)/T]_m\} = \\ R(x, y) B(x, y) \{ \mathcal{Q} + [\mathcal{Q}(x, y)/T]_m \} = \\ M(x, y) \mathcal{Q}_m(x, y) \quad (1)$$

其中, $M(x, y) = R(x, y)B(x, y)$, $\mathcal{Q} = A(x, y)/B(x, y)$, $\mathcal{Q}_m = \mathcal{Q} + [\mathcal{Q}(x, y)/T]_m$, $R(x, y)$ 为被测物表面的反射率分布, $A(x, y)$ 为背景强度, $B(x, y)$ 为一决定线性结构光特征的量, T 为条纹周期, $[\cdot]_m$ 表示求模运算, 相位分布 $\mathcal{Q}_m(x, y)$ 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。在(1)式中引入相位调制, 则计量场分布可进一步表示为

$$I(x, y) = M(x, y) [\mathcal{Q}_m(x, y) + \delta] \quad (2)$$

式中 $\delta (0 < \delta < T)$ 是人为引入的可控相移量。在该计量场中, 人为地改变 δ 并探测相应的 $I(x, y)$, 就可方便地解出 $\mathcal{Q}_m(x, y)$ 。在(2)式中, 对应于 $\delta = 0$ 的采样值 $I_1(x, y)$ 和 $\delta = \delta_0$ 的采样值 $I_2(x, y)$ 分别为

$$I_1(x, y) = M(x, y) \mathcal{Q}_m(x, y) \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = \begin{cases} M(x, y) [\mathcal{Q}_m(x, y) + \delta_0] & I_2 > I_1 \\ M(x, y) [\mathcal{Q}_m(x, y) + \delta_0 - T] & I_2 < I_1 \end{cases} \quad (4)$$

联立(3)、(4)两式就可求得二维相位分布

$$\mathcal{Q}_m(x, y) = \begin{cases} \frac{I_1(x, y) \delta_0}{I_2(x, y) - I_1(x, y)} & \begin{cases} I_1(x, y) < I_2(x, y) \\ 0 < \mathcal{Q}_m \leq T - \delta_0 \end{cases} \\ \frac{I_1(x, y) (T - \delta_0)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} & \begin{cases} I_1(x, y) > I_2(x, y) \\ T - \delta_0 < \mathcal{Q}_m \leq T \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

理论上, 只要相移量 δ 满足: $0 < \delta < T$, 就可通过(5)式求得相位值。但在实际计量中, 由于采样过程受各种因素的影响, 探测值存在着误差, 使由(5)式求得的相位值含有误差。对于不同的 δ 值, 相位误差将会不同。当相移量 δ 取某个唯一的确定值时, 相位测量精度最高, 称这个相移量为最佳相移量, 利用最佳相移量的采样即为最佳采样方式。为了寻找最佳相移量, 取 $\mathcal{Q}_m(x, y)$ 对于采样 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$ 的全微分:

$$d\mathcal{Q}_m = \begin{cases} \frac{\delta_0}{[I_2 - I_1]^2} [I_2 dI_1 - I_1 dI_2] & \begin{cases} I_1 < I_2 \\ 0 < \mathcal{Q}_m \leq T - \delta_0 \end{cases} \\ \frac{(T - \delta_0)}{[I_2 - I_1]^2} [I_1 dI_2 - I_2 dI_1] & \begin{cases} I_1 > I_2 \\ T - \delta_0 < \mathcal{Q}_m \leq T \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

上式表征了相位求解误差与采样误差之间的关系。通常, 变形光栅的噪声为高斯白噪声, 采样误差具有以下统计特性:

$$\langle \Delta I_i \rangle = 0, \quad \langle \Delta I_i \Delta I_j \rangle = \begin{cases} \sigma_i^2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

(7)式中, 算符 $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均运算。则相位误差的均值 $\langle \Delta \mathcal{Q}_m \rangle$, 方差 $\langle (d\mathcal{Q}_m)^2 \rangle$ 分别为

$$\langle \Delta \mathcal{Q}_m \rangle = 0 \quad (8)$$

$$\langle (d\mathcal{Q}_m)^2 \rangle = \begin{cases} \frac{\sigma_1^2 (2\mathcal{Q}_m^2 + 2\mathcal{Q}_m \delta_0 + \delta_0^2)}{M^2 \delta_0^2} & (0 < \mathcal{Q}_m \leq T - \delta_0) \\ \frac{\sigma_1^2 [2\mathcal{Q}_m^2 + 2\mathcal{Q}_m (T - \delta_0) + (T - \delta_0)^2]}{M^2 (T - \delta_0)^2}, & (T - \delta_0 < \mathcal{Q}_m \leq T) \end{cases} \quad (9)$$

(9) 式中, 对 φ_m 的两个取值区间, 当 φ_m 分别为 $T - \delta_0$ 和 T 时, 相位误差的方差值 $\langle (d\varphi_m)^2 \rangle$ 取极大值:

$$\langle (d\varphi_m)^2 \rangle_{\text{MAX}} = \begin{cases} \frac{\sigma_I^2 [T^2 + (T - \delta_0)^2]}{M^2 \delta_0^2} & (\varphi_m = T - \delta_0) \\ \frac{\sigma_I^2 (T^2 + \delta_0^2)}{M^2 (T - \delta_0)^2} & (\varphi_m = T) \end{cases} \quad (10)$$

在上式 φ_m 的两个取值区间中, 很明显, 相位误差方差值随相移量 δ_0 的变化是沿两个相反的方向进行的, 仅当 $\delta_0 = T/2$ 时, 相位误差的两个局部极大值相等并取最小极大值, 因此, 在利用两个采样解码的方法中, 最佳相移量为 $T/2$ 。最佳采样方式下的相位分布为

$$\varphi_m(x, y) = \begin{cases} \frac{I_1(x, y) T}{2[I_2(x, y) - I_1(x, y)]} & \begin{cases} I_1(x, y) < I_2(x, y) \\ 0 < \varphi_m(x, y) \leq T/2 \end{cases} \\ \frac{I_1(x, y) T}{2[I_1(x, y) - I_2(x, y)]} & \begin{cases} I_1(x, y) > I_2(x, y) \\ T/2 < \varphi_m(x, y) \leq T \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

相位误差方差的最大值为

$$\sigma_{FH}^2 = \langle (d\varphi_m)^2 \rangle_{\text{MAX}} = \frac{5\sigma_I^2}{M^2} \quad (12)$$

2.2 精度分析

三维物体面形的测量, 实际上就是确定被测物面在指定坐标系中的高度分布 $Z(x, y)$, 高度分布 $Z(x, y)$ 主要取决于二维相位分布 $\varphi_m(x, y)$, 还与系统的几何结构有关, 故总体测量误差为

$$\sigma_H^2 = F^2 \sigma_{FH}^2 + \sigma_{CB}^2 + \sigma_{TR}^2 \quad (13)$$

式中 F 为相位与高度的转换函数, 与系统构造有关; σ_{CB}^2 为定标误差, 取决于定标方法; σ_{TR}^2 为截断误差, 取决于所选算法及计算机的字长。下面讨论相位测量误差 σ_{FH}^2 与采样误差 σ_I^2 之间的关系。

在线性编码轮廓术的具体实现中, 影响采样的主要因素有: CCD 产生的随机噪声和视频信号经过 A/D 转换的量化噪声 σ_F , 计量过程中周围环境的杂散光噪声 σ_0 , 相移器机械非稳定性产生的相移噪声 σ_{ps} , 由于这些因素通常是统计独立的, 故(12)式可进一步表示为

$$\sigma_{FH}^2 = \frac{5}{M^2} (\sigma_F^2 + \sigma_0^2 + M^2 \sigma_{ps}^2) \quad (14)$$

式中 σ_F^2 是由 CCD 中半导体材料激发产生的暗电流和视频信号引起的散粒噪声 σ_S^2 、电荷包转移和电路的热效应等引起的电噪声 σ_E^2 及图象采集的量化噪声 σ_Q^2 累加而成^[3]。文献[3]定义了这三种噪声的方差, 散粒噪声的方差为

$$\sigma_S^2 = E_q F_q \quad (15)$$

其中 E_q 为 CCD 的量子效率, F_p 为光子通量。散粒噪声的均方值亦等于信号电荷包的平均电子数。电噪声的方差为

$$\sigma_E^2 = (WD/SNR_{\text{MAX}})^2 \quad (16)$$

WD 为 CCD 像素的满势阱信号, SNR_{MAX} 为 CCD 所能达到的最大信噪比。量化噪声被定义为

$$\sigma_Q^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{WD}{2^k - 1} \right)^2 \quad (17)$$

k 为图象采集卡 A/D 转换的数位(一般为八位)。则

$$\sigma_F^2 = \sigma_S^2 + \sigma_E^2 + \sigma_Q^2 = E_q F_p + \left(\frac{WD}{SNR_{MAX}}\right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{WD}{2^k - 1}\right)^2 \quad (18)$$

由于实际 CCD 的动态范围有限, 为了使图像信号不失真, 应有:

$$B(x, y)R(x, y)\Phi_m(x, y) = M(x, y)\Phi_m(x, y) \leq I_{Sat}, \quad (0 \leq \Phi \leq T) \quad (19)$$

式中 I_{Sat} , 为 CCD 的饱和强度亦即像素的满阱信号 WD 。若使:

$$MT = K_r I_{Sat}, \quad (0 < K_r < 1) \quad (20)$$

K_r 为一比例系数。将上述有关各式代入(14)式, 则相位误差的方差变为

$$\begin{aligned} \sigma_{PH}^2 &= \frac{5}{M^2} [\sigma_F^2 + \sigma_0^2 + M^2 \sigma_{ps}^2] = \\ &= \frac{5T^2}{K_r^2 I_{Sat}^2} \left[E_q F_p + \left(\frac{WD}{SNR_{MAX}}\right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{WD}{2^k - 1}\right)^2 + \sigma_0^2 + \frac{K_r^2 I_{Sat}^2}{T^2} \sigma_{ps}^2 \right] = \\ &= \frac{5T^2}{K_r^2} \left[\frac{E_q F_p}{I_{Sat}^2} + \frac{1}{SNR_{MAX}^2} + \frac{1}{12} \left(\frac{1}{2^k - 1}\right)^2 + \sigma_0^2 + \frac{K_r^2}{T^2} \sigma_{ps}^2 \right] \end{aligned} \quad (21)$$

上式为两个采样解码的线性编码轮廓术在最佳采样方式下的相位测量误差。在实际计量中, 对于确定的图象采集系统, (21) 式中方括内的前三项为定值。

2.3 测量结果分析及建议

本文实验仍沿用文献[1]中的测量系统及测量对象, 其中, 线性结构光栅周期 $T = 10$ mm。为了评价两个采样实现的线性编码轮廓术在采用不同相移量时系统的测量精度, 事先在被测物面上随机标记了若干个观测点, 利用机械三坐标测量仪精确测得这些点相对于参考面的高度值 z' , 并借助摄像系统确定出这些观测点在二维图像坐标系中的坐标 (x, y) , 再分别采样相移量 $\delta = 0, 1, 3, 5, 7, 9$ mm 所对应的物面上变形光栅的强度分布, 利用线性编码轮廓术求得这些观测点在不同相移下相对于参考面的高度 z , 表 1 列出了利用线性编码轮廓术实测的一组观测点的高度值及其相对误差 E_r 。

Table 1. Data of height z and error E_r measured by LCP

No.	z' /mm	$\delta = 1$ mm		$\delta = 3$ mm		$\delta = 5$ mm		$\delta = 7$ mm		$\delta = 9$ mm	
		z /mm	E_r /%	z /mm	E_r /%	z /mm	E_r /%	z /mm	E_r /%	z (mm)	E_r /%
1	5.485	5.995	9.30	5.166	5.81	5.286	3.79	5.753	4.88	5.012	8.62
2	11.226	10.767	4.11	10.771	4.05	11.560	2.98	11.855	5.60	12.374	10.23
3	14.170	14.951	5.51	13.620	3.87	14.501	2.34	14.758	4.15	13.560	4.32
4	23.477	23.024	1.93	22.769	3.00	23.192	1.45	24.348	3.71	24.436	4.07
5	32.928	31.604	4.02	32.114	2.47	32.747	0.55	32.217	2.16	32.312	1.87

从表中可以看出, 随着测量高度的增加, 绝对误差较为稳定, 而相对误差减小。当相移量 $\delta = T/2 = 5$ mm 时, 测量精度最高(在 4% 之内), 测量误差的波动亦较小(均方偏差 $\sigma_H = \pm 0.273$), 随着 $|\delta - 5|$ ($0 \leq |\delta - 5| < 5$) 的增大, 测量误差及其波动亦增大。因此, 在利用两个采样值实现的线性编码轮廓术中, 采样中应使用 $T/2$ 的最佳相移量。此外, 为了提高测量精度, 建议考虑以下几个方面的问题:

1) 选择合适的 K_r 。避开非线性段和饱和区, 保证 CCD 工作在线性段以减小非线性误差, 同时, 应尽量拓宽探测信号范围(最大灰度值与最小灰值之差), 即选偏大的 K_r 。此外, 物面反射率 应尽可能均匀, 背景强度应尽可能小以增大图象信号的有效动态范围。

2) 选择合适的线性结构光节距 T 。 T 越小, 编码灵敏度增大, 但抗噪能力下降, 且所要

求精度的相移实现的难度亦增大, 因此 T 值的选取需要在这两者之间取得折衷。

3) 选用闭环反馈控制的步进式相移器, 以减小相移误差。

4) 在计算相位之前, 可对采集的图象进行一些预处理。为了减小采集系统噪声对相位计算结果的影响, 常用的预处理办法有二, 一是对每帧图像减去平均暗电流图像(暗电流图像为摄像机镜头盖未开启, 光圈系数调至最大时摄取的图像), 二是对同一相移量所对应的采样可摄取多帧图像, 以其平均灰值作为计算相位的采样值。此外, 为了消除 CCD 的行抖动差, 一般不允许使用第一行、第一列像素的灰值。

3 双通道动态线性编码轮廓术

利用两个采样解码的线性编码轮廓术,

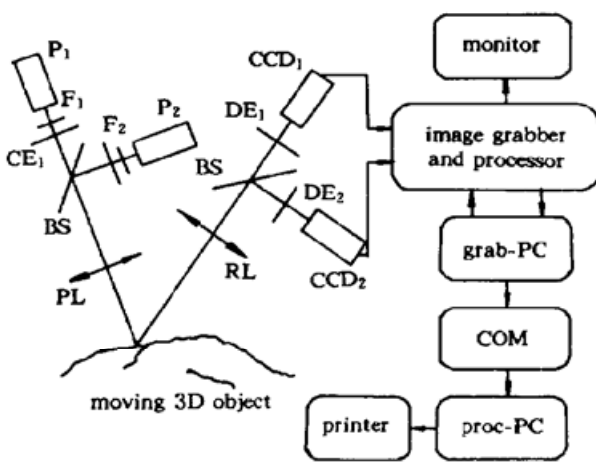


Fig. 1 Schematic diagram of the two-channel dynamic 3-D sensing system of LCP

其最有潜力的应用领域就是三维动态传感。为了能够实现动态传感, 两个采样值必须同步获得, 这可通过多通道技术来实现。图 1 为双通道动态线性编码三维传感系统示意图。

在图 1 中, 器件代号后的数字 1(或 2) 分别表示所在的通道 1(或 2)。P₁(P₂)、F₁(F₂)、CE₁(CE₂)、BS 及 PL 组成了复合投影系统, 它实现对动态三维物面的线性编码。BS 起分束作用, 两通道线性结构光经各自的通道编码器光调制后, 各有 50% 的投影光能经 BS 混合投射到物面上, 两通道之间 $T/2$ 的相位关系, 可通过精心调整任一通道光栅胶片的相对位置来标定。RL、BS、DE₁(DE₂)、CCD₁(CCD₂)、高速图像采集卡、

Grab-PC(数据采集计算机), Monitor(监视器)组成了实时图像采集系统, 完成三维动态物面编码图像的采集、简单处理、存储及显示, 同时 Grab-PC 通过 COM(并行通讯接口)将采集数据实时发送给数据处理计算机(Proc-PC), 由 Proc-PC 完成物点三维坐标的计算及被测三维物面重构。物面上的反射光经探测系统的 BS 分束为两路, 分别经各自的通道解码器解调后进入 CCD, 如果不计光路损失, 该系统的光能利用率为 25%, 是 PMP 的四倍(PMP 为 6.25%)。由于物面编码的实时性, 图像采集的高速性及数据处理的并行性, 从而使本系统成为真正意义上的动态三维机器视觉系统。

在系统构造时, 以下两种方案都可采用: (1) 利用偏振原理, CE₁、CE₂ 为偏振方向相互垂直的起偏器, DE₁、DE₂ 为对应的检偏器, 这种方案适用于保偏特性的三维面形测量; (2) 引入色度调制, CE₁、CE₂ 为一对颜色差异较大(最好为相异原色)且不同于被测物表面颜色的色光片, DE₁ 为只通 CE₁ 的滤色片, DE₂ 为只通 CE₂ 的滤色片, 这种方案不受被测物表面偏振性质的限制, 由于可选调制色的范围较大, 因而色度调制方案的确定较为灵活, 但所选用的两种调制色光应与被测物表面的颜色不同。具体实施中, 双通道编码方案的确定可视测量对象的表面光学性质而定。

总 结 本文从更为实际的角度出发, 考察了两个采样解码的线性编码轮廓术在具体实现中的一些相关问题。为了提高计量精度, 采样应使用最佳相移量 ($T/2$), 被测物面的反射率应

尽可能均匀, 线性结构光节距的选择须同时兼顾测量精度和相移的实现, 还应充分考虑到图像采集系统的有效动态范围, 这些结论可用于优化实际测量系统及测量过程。文中还介绍出了两类具有广泛应用前景的动态多通道测量方案。

参 考 文 献

- [1] 张舜德, 方 强, 线性结构光编码的三维轮廓术. 光学学报, 1997, **17**(11): 1533~ 1537
- [2] 吴广玉, 姜复兴编, 机器人工程导论(第一版)。哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988: 260~ 265
- [3] F. C. Ralph, W. W. James, Absolute and random error analysis of the dynamic imaging microellipsometry technique. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15): 3187~ 3198

Two Samples Decoding in Linearly Coded Profilometry: Optimum Shifting Quantity, Accuracy and Application

Zhang Shunde^{1, 2} Fang Qiang³ Lu Bingheng¹

1, *RP&M Research Central, College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049*
2, *Petrochemical College, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050*
3, *Department of Telecommunication, Xi'an Institute of Post & Telecommunication, Xi'an 710061*

(Received 7 April 1997; revised 2 July 1997)

Abstract Linearly coded profilometry (LCP) is a new optical profilometry presented recently. The optimum shifting quantity and accuracy of LCP implemented with two samples are investigated from a more practical point. Two kinds of dynamic multichannel LCP are proposed.

Key words linear coding, profilometry, optimum sampling, accuracy analysis, multichannel technique.