

一种新的 360°三维轮廓术

赵 宏 宋元鹤 李根乾 乐开端 陈文艺 谭玉山

(西安交通大学机械学院激光与红外应用研究所, 西安 710049)

摘 要 提出了运用相移技术的光刀投影式测量 360°回转物体三维轮廓的新方法。该方法对投影光刀引入正弦分布光场, 利用相移技术对光刀投影狭缝进行相位计算, 可得出各点的包裹相位分布, 然后再利用光刀投影测量原理得到的高度信息对相位进行去包裹处理, 从而得到具有较高精度的相位测量结果。最后根据相位与物体高度的几何关系, 得到物体的三维轮廓数据。文中详细介绍了这一技术的原理及实验结果。

关键词 相移, 光刀测量, 360°三维轮廓术, 相位去包裹。

1 引 言

三维物体面形测量技术在许多领域得到应用。相位测量轮廓术^[1]对物体的表面反射率的变化不敏感, 具有较高的测量精度, 易实现自动测量, 因而被广泛地研究。光刀测量法^[2]可由硬件电路直接实现而具有实时性, 但其受物体表面反射率的影响很大, 因而测量精度受到限制。本文旨在将二者结合起来, 实现高精度与快速性。相位测量中, 所得到的相位结果值是原理相位值, 其值在 $-\pi \sim \pi$ 之间变化。为了获得真实相位值, 就必须进行相位去包裹处理。然而, 相位去包裹处理受相位图质量的影响很大, 对噪声特别敏感, 以往有许多关于相位去包裹处理方面的研究。这些方法在遇到相位图中出现断点和在边界区域时, 很难得到正确的结果, 并可能使整个相位图的恢复失败^[3~5]。

本文提出的方法是基于三角测量基础上, 引入了相位测量技术。该方法是在投影光刀中引入正弦分布光场, 利用相移技术对光刀投影点进行相位计算, 得到各点的包裹图相位分布, 然后再利用光刀投影的三角测量原理, 获得各点的高度参考值, 并利用此值对包裹相位图进行去包裹处理, 从而得到各点的真实相位图。提高了测量精度, 并且在测量中, 各点的去包裹处理是相对独立完成的, 即使在某些点上出现了相位去包裹误差, 也不会影响其它点的处理。本文详细介绍了这一方法, 并且利用这一方法对一实物进行了 360°轮廓测量。

2 测量原理

2.1 相位测量原理

图 1 是一个相移三维物体面形测量系统。当一正弦光场投影到物体表面时, 光场受物体

表面形状调制后的变形光场的数学描述为:

$$I(x, y) = R(x, y)[A(x, y) + B(x, y) \cos \Phi(x, y)] \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为一个与物体表面的光学特征有关的物理常数, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)/A(x, y)$ 为对比度, $\Phi(x, y)$ 为相位值, 它是物体表面高度的函数。下面利用相移算法对 (1) 式中的相位进行求解。当分别引入相移量 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时, 可以得到以下四个等式:

$$\left. \begin{aligned} I_1(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) + B(x, y) \cos \Phi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) - B(x, y) \sin \Phi(x, y)] \\ I_3(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) - B(x, y) \cos \Phi(x, y)] \\ I_4(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) + B(x, y) \sin \Phi(x, y)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由以上各式可以得到:

$$\Phi(x, y) = \arctan [(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)] \quad (3)$$

2.2 相位到物体高度的转换

图 2 是一投影和成像系统的几何光路, P 为投影系统的出瞳中心, I 为成像系统的入瞳中心。 G 为空间频率为 f 的正弦光栅, 而光栅线的方向垂直于纸面。 D_c 是一个 CCD 摄像机, 其扫描方向沿 x 轴方向。通过摄像机 D_c 可以测得参考平面上 C 点的相位 Φ_c 和物体上 D 点的相位 Φ_D , 由于物体上 D 点与参考平面上 A 点具有相同的相位, 即 $\Phi_D = \Phi_A$ 。所以有:

$$\overline{AC} = \Phi_{Dc}/2\pi f \quad (4)$$

式中 Φ_{Dc} 是物体上 D 点相对于参考平面上 C 点的相位差值, 其值可由 (3) 式求出。由于 ΔPDI 相似于 ΔADC , 则物体上 D 点相对于参考平面的高度值为:

$$h(x, y) = \frac{s \overline{AC}}{d(1 + \overline{AC}/d)} \quad (5)$$

式中 s, d 为图 2 所示的距离。由于在实际中 $d \gg \overline{AC}$, 将 (4) 式代入 (5) 式得:

$$h(x, y) = k\Phi_{Dc}, \quad (6)$$

式中 $k = s/2\pi f d$ 。

2.3 相位去包裹算法

从 (3) 式可以看出, 所得到的相位值实际上是模为 2π 的原理相位值, 其真实相位值为:

$$\Phi(x, y) = \Phi(x, y) + 2\pi n(x, y) \quad (7)$$

式中 $n(x, y)$ 为整数。为了确定 $n(x, y)$ 的值, 进行以下讨论。

通过光刀投影的三角测量原理, 从图 2 可以得到:

$$h'(x, y) = \frac{sx_c}{\cos \theta (b \sin \theta + x_c \cos \theta)} \quad (8)$$

式中, $h'(x, y)$ 为被测物体表面通过光刀投影的三角测量方法获得的被测物体表面上点 (x, y) 的高度值; s, b 分别为摄像机到参考平面的距离以及摄像机镜头的焦距, x_c 为与物体高度对应的光刀在图像中的位移量。如图 2 所示。显然, 由于相位测量得到的物体高度值与光刀

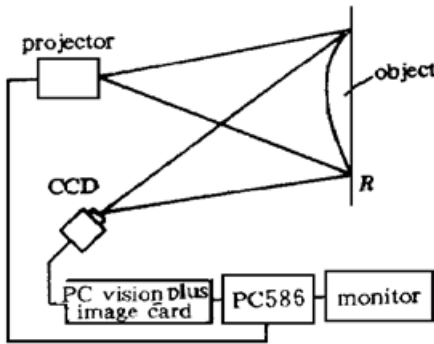


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

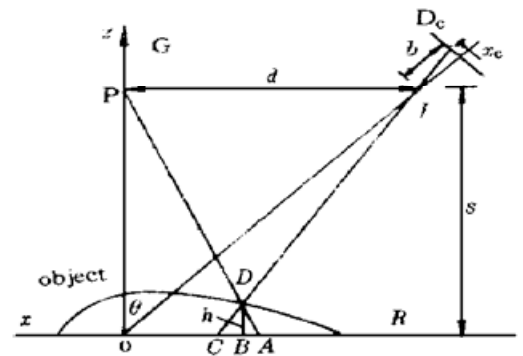


Fig. 2 Optical geometry of the projection and recording system

投影测量得到的物体高度值都是相对于同一个参考平面,因此这两个值是相等的。唯一不同的是,由相位测量得到的结果比光刀投影测量得到的结果的精度要高。但是在一定的差别下,即光刀测量的精度不小于相位测量的 0.5 级条纹,用光刀投影测量得到的结果来确定相位测量的条纹级数是可靠的。所以,

$$n(x, y) = \text{INT} \left(\frac{h'(x, y)}{k2\pi} \right) \quad (9)$$

其中 INT 表示取整操作。当(9)式中的参数接近整数时,可能会引起整数级条纹的误差,必须对(9)式的结果进行修正。设点 $P(x, y)$ 由两次不同测量精度下测得的高度之差为:

$$\epsilon(m) = k[\Phi(x, y) + 2m\pi] - h'(x, y), \quad [m = n(x, y), n(x, y) \pm 1] \quad (10)$$

显然, (10) 式中 m 必然存在一个值 $m_0(x, y) \in \{n(x, y), n(x, y) \pm 1\}$, 使得 $\epsilon(m)$ 为最小, 则 $m_0(x, y)$ 就是 $\Phi(x, y)$ 的精确条纹级数值。这样, 就可以得到点 P 的精确的相位去包裹值。

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2m_0(x, y)\pi \quad (11)$$

3 实验结果

在实验系统中, 投影的光刀宽度为 1.5 mm, 光栅的周期为 1 mm。投影仪垂直于参考平面, 摄像机光轴与投影仪光轴夹角 45°, 两者的距离 $d = 300$ mm。被测物体置于一数控回转平台上, 每次转动 2°, 测量一组数据。图 3 为具有正弦光场分布的投影光刀图。图 4 为由相移技术解调的相位图。通过使用本文的相位去包裹技术处理后的相位分布图的三维形状如图 5 所示。在每组数据采样过程中, 都是以图 3 所示的光刀投影图中光强为最大的点作为光刀计算点以及相位计算点。



Fig. 3 A light stripe with a sine brightness distribution projected on the object



Fig. 4 The wrapped phase map



Fig. 5 The 3D reconstruction shape of unwrapped phases map

4 系统性能分析

由于在光刀投影测量中引入了相移技术, 因而提高了测量精度。同时, 利用光刀投影测量的结果使得相位去包裹处理可以方便地进行。并且在测量中, 各点的去包裹处理是相对独立完成的, 即使在某些点上出现了相位去包裹误差, 也不会影响其它点的处理。

系统的测量精度由以下几个方面决定。1) 相移误差: 由于相移器采用高精度的位移平台, 其产生的相移误差量非常小, 大约 1/1000。2) 光刀中正弦光场的频率: 频率越高, 测量精度越高。但是频率太高时, 受摄像机分辨率的限制, 测量精度不可能成比例提高。3) 摄像

