

文章编号: 0253-2239(2004)05-687-5

结构光测量中获取高精度相位的新方法^{*}

潘 伟 赵 毅 阮雪榆

(上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030)

摘要: 随着制造技术的快速发展,三维光学测量技术也得到迅速的发展,利用双目 CCD(电耦合插件)摄像机记录的光栅投影测量技术是一种新型的光学测量方法。在该方法的测量过程中,通过测量相位值取得测量空间。为了获得连续的高精度测量相位值,提出一种结合了格雷(Gray)编码并能够优化相位精度的相移方法,该方法通过投影相位传递函数来优化测量相位值。为了消除光栅投影图像中非正弦、周期变化和其他干扰因素的影响,给出投影光栅一种新的光强函数,利用这个光强函数能够进一步提高投影光栅测量相位精度。最终,通过插值测量相位精度能达到亚像素级。

关键词: 三维测量; 结构光测量; 相移; 投影光栅; 相位传递函数

中图分类号: TP212 文献标识码: A

A New Method for Getting High Precision Phase in Structural Light Measurement

Pan Wei Zhao Yi Ruan Xueyu

(National Mould and Die CAD Engineering Research Center,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 20 September 2002; revised 2 June 2003)

Abstract: With the development of manufacturing technology, the three-dimensional optical measurement technology is developed rapidly. Projection measurement with two cameras is a new kind of optical measurement technique. In the measurement process, the measurement space can be got by the phase value. In order to get high precision measuring phase for the technique, a phase-shifting method is proposed with Gray code. The method can calculate the phase value by projected phase transfer function and irradiance function of projected structural light. The non-sinusoidal, non-periodical effects of projected structural light are considered. The precision of strip and phase is improved by the method. The result precision of phase can reach sub-pixel by interposition.

Key words: three-dimensional measurement; structural light measurement; phase shift; projection grating; phase transfer function

1 引 言

近年来,结构光测量技术已应用于汽车、航空航天、服装设计、模具制造等各个领域,能灵活快速地测量对象的复杂表面。光栅投影测量方法是一种主动结构光测量方法,它存在的主要问题是投影技

术。当前存在着多种光栅投影技术,如液晶显示(LCD)、数字镜像仪(Digital mirror device, DMD)技术和专业投影仪技术等,但常用的主要有液晶显示和专业投影仪两种。

普通的投影系统常常采用液晶显示。采用液晶显示成本比较低,但投影的对比度也较低(约为1:20),并且投影光的辐射大,投影视场的深度信息少。

相对于其他投影方法,采用专业投影仪能获得

^{*} 博士点基金(2000024838)资助课题。

E-mail: panwei@sjtu.edu.cn

收稿日期:2002-09-20;收到修改稿日期:2003-06-02

分辨率更高的投影光栅。但光栅的实际光强函数很难计算,该函数与光栅模式及投影光源的光谱函数都相关。投影仪投影的光栅,在条件良好的情况下,能获得超过 1:100 的对比度。然而,带动光栅产生相移的传动机构的运动,会造成光栅相移的对齐误差,光栅的衍射也能影响投影光栅的模式,这些都会造成不利影响^[1],为了获得高测量精度,需要消除这些影响。

光栅投影测量技术的投影要求有高的对比度、光强和良好的正弦光强函数。但当前没有足够好的技术能投影出高质量的正弦光栅模式,为了弥补光栅投影技术的不足,提出一种新的提高相位测量精度的方法。

2 光栅投影测量原理

2.1 格雷编码光栅

对于相机记录的一幅连续光栅图,能够直接确定光栅条纹数。但当仅记录了部分光栅或记录的光栅不连续时,就无法直接确定光栅条纹数。采用光栅编码能够解决这个问题。常使用的编码方法是格雷编码,它是格雷^[2]在 1953 年研究数字通讯的数模和模数转换中提出来的。光栅编码是将一系列栅距不同的光栅图像连续投影到测量对象上获得多幅图像,将视场空间分割成 2 的 n 次方份,每一份空间可用一个二进制码来表示。通过编码对应每个像素获得一个亮度值矢量,该矢量用来确定光栅条纹数 Z 。

2.2 三角测量法

光栅投影测量计算的基本原理是三角测量法,三角法基于三角形中角和边的关系计算测量值。三角测量法在平面和三维情况下计算都不很复杂^[3]。

在测量过程中,当投影仪投影光栅到对象表面

时,投影的每一条光栅在空间定义一个平面,称为投影平面(如图 1)。由双目 CCD 相机记录经测量对象调制的变形光栅,记录图像中的每个像素定义一条光线,这是一条由相机透射中心和相应物点连接成的直线,称为相机射线(如图 1)。根据标定参量、相位值 ϕ 和其他图像坐标值,应用三角法计算相机射线和投影平面的交点,即对象表面点的三维坐标值。与单目 CCD 相机测量不同,采用双目 CCD 相机要找到不同相机间的匹配对应点。这样不仅能省去投影光源的标定过程,而且可以提高测量的精度。

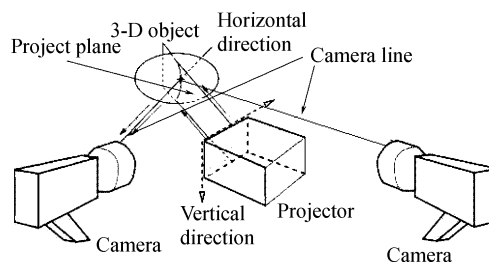


Fig. 1 Binocular camera and projector measuring sketch map

3 光栅投影的相移方法

在精度要求不高的光栅投影相位计算中,可以采用格雷码获得图像点的相位值,但格雷码的缺点是离散性,每一条光栅有一个离散值,因此仅能进行有限的条纹数编码。对于高精度的测量,需要获得更多位的编码值,这就需要采用相移方法^[4]。

相移法获得相位值的方法有多种,比较常用的是采用四幅相位变化图(如图 2)的相移方法。该方法具有能消除背景项和检测器的非线性及常数项影响的优点^[5]。对应每个像素可以得到一个强度矢量,应用该矢量能计算出像素的相对相位值 $\Delta\phi$ 。在相移的一个周期内, $\Delta\phi$ 是唯一的。

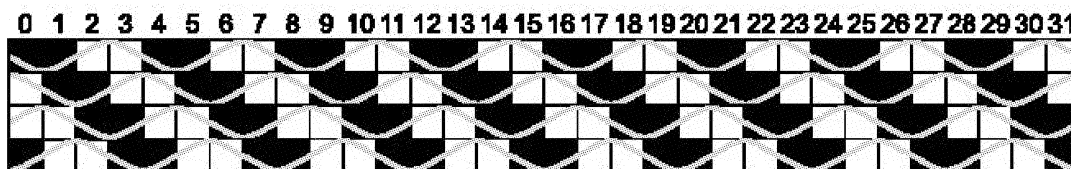


Fig. 2 Four phase image of phase-shift

下面给出传统四步法相移 90° 的相位计算公式^[6]:

$$\phi = \arctan \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4}, \quad -\pi < \phi \leq \pi \quad (1)$$

$I_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为光强。通过格雷码获得的光栅数

Z 和相移法确定的相对相位值 $\Delta\phi$ 能表示出绝对相位 ϕ 值如下^[7]:

$$\phi = 2\pi \cdot Z + \Delta\phi. \quad (2)$$

为了确定对象表面的点相关参量 (x, y, z) , 需要知道像素的坐标 (u, v) 和相位值 ϕ 。根据记录图像

很容易确定像素的坐标 (u, v) ，但如何确定光栅的相位值 ϕ 比较困难^[3]。通过四步相移法能获得相位测量值，但由于测量过程中各种外界因素的干扰，造成相位测量值与相位实际值之间存在较大的差别。为了求解更加精确的投影光栅测量对象相位值 ϕ ，必须确定对象相传递函数 (Object phase transfer function, OPTF)，对象相传递函数能绘制出相位的实际值 θ 与相位的测量值 ϕ 之间的关系图。在理想的光栅投影系统中对象相传递函数如下：

$$\phi(\theta) = 0. \tag{3}$$

为了获得复杂对象的表面对象的相位传递函数，可以利用平面物体的对象相位 $\phi(u, v)$ 。

3.1 平面对象的相函数

平面对象的相函数显示在图 3 中。在 v 不变的情况下， $\phi(u, v)$ 是一条随 u 变化的近似倾斜线，该倾斜线的一个重要特性是局部梯度矢量 $\nabla\phi(u, v)$ 垂直于相机图像中的光栅方向。

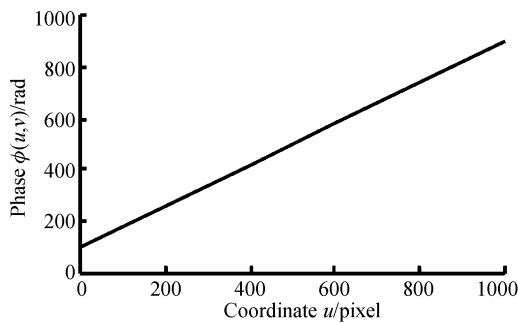


Fig. 3 The phase function of object with plane

在理想系统中，相位的实际值 θ 在相位的测量值 ϕ 的某个小范围内沿 $\nabla\phi(u, v)$ 线性增加。而在实际系统中这仅是近似值。选择一定的范围 $J_\phi = [\phi_{\min}, \phi_{\max}]$ 来计算平均梯度，对应的像素数组是

$$S = \{(u', v') \mid \phi_{\min} \leq \phi(u', v') < \phi_{\max}\},$$

S 中像素的数目为 n 。根据以上的定义，平均梯度矢量表示如下：

$$\overline{\nabla\phi} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{(u', v')} \nabla\phi(u', v'), \tag{4}$$

3.2 投影对象相位值

为了获得相位的实际值和测量值之间关系，把相位的测量值 $\phi(u, v)$ 的图像坐标矢量 (u, v) 投影到一条平行于 $\overline{\nabla\phi}$ 的线上，投影值用 λ 表示，该值与 θ 值成正比 (如图 4)，该线为 λ 轴，其物理意义表示测量值和实际值之间的线性变化。 λ 为梯度 $\overline{\nabla\phi}$ 和矢量 (u, v) 计算获得的标量值

$$\lambda(u, v) = \frac{\overline{\nabla\phi} \cdot (u, v)^T}{|\overline{\nabla\phi}|}. \tag{5}$$

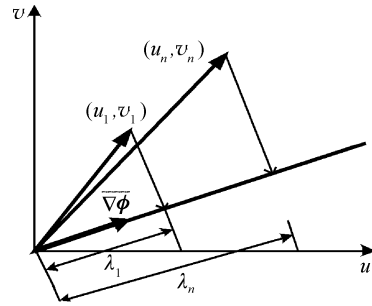


Fig. 4 The projected diagram of object phase

3.3 新的光强函数模式

在前面推导对象相传递函数时，假设其为周期性函数，但实际上对象的相位传递函数只有在理想情况下才是周期性函数。对象的相位传递函数周期发生变化的原因：1) 测量时，需要估计测量系统的定位参量，由于系统中存在机械设备的误差 (如左右 CCD 和投影仪的透射中心不能正好位于同一直线上)，这类误差造成相移各个模式有不同的周期长度。2) 因为不同的格雷码和相移光栅图都是由步进电机带动、投影幻灯片产生的，在电机运动中，幻灯片会产生无规律的摆动，所以每个光栅的焦距和投影放大率都不同，这就造成光栅的不同周期。由于周期的变化，因此在整个视图范围内存在不小的误差。为了获得更优化相位值，要采用更复杂的模型计算对象的相位传递函数。因为对象的相位传递函数基于投影的光强函数，所以利用光强函数能获得这个计算模型。在光强函数中，对象相位值 ϕ 和光栅参量 ζ 能够消除这些误差，两个参量的关系如下：

$$\zeta = N_p \phi / 2\pi, \tag{6}$$

N_p 是光栅栅距。

通过以上分析，给出非正弦光强函数 $\tilde{T}_i(\phi, \zeta)$ 的完整模型：

$$\tilde{T}_i(\phi, \zeta) = AI_i[\omega_i(\phi, \zeta)Z + \phi_s + \phi_o + \beta_i] + O, \tag{7}$$

$$i \in [1, \dots, 4]$$

在光强度、偏移和周期取标准值时， I_i 才是周期性的，理想值为正弦函数； $\omega_i(\phi, \zeta)$ 的单位为 rad，它依赖于投影图像的坐标，能够调节误对齐产生的比例误差； ϕ_s 是投影光初始相位值； ϕ_o 是测量对象的相位调制； β_i 为相移相位值； A 和 O 是振幅值和偏移量。

由以上的方法获得投影光栅的完整光强模型，在相移中应用该模型计算对象的相位传递函数。根据平面对象 $\phi(u, v)$ 的线性假设，用 $\phi(\lambda)$ 能求出相移周期的精确长度。在计算过程中， $\phi(u, v)$ 被限制在一个 (u, v) 范围，这个范围大约包括几个周期，最终获得对象相传递函数 $\phi(\theta)$ ，从而提高测量精度和可靠性。

4 计算过程分析和实验

4.1 对象相位的计算

通过格雷码投影边界的阶梯函数能精确确定 λ 轴一个周期的开始和结束,这个过程采用普遍已知的算法^[8]。如果在递增和递减边界上的 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 已知,并且在小范围内可认为 λ 值与相位值成正比。 λ 和相位的实际值 θ 间的关系如下:

$$\theta(\lambda) = (\lambda - \Delta\lambda_1) \cdot \frac{2\pi n_G}{\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1}, \quad (8)$$

这里 n_G 是格雷码边界间的相移周期数。

4.2 光强函数的确定

投影仪光学系统投影的理想光栅光强

$$I(k) = A_0 \sin[\omega_0 Z(k) - \phi_0] + O_0, \quad (9)$$

A_0 为振幅, ω_0 为周期弧度值, $Z(k)$ 为第 k 个像素所在光栅条纹数, ϕ_0 为相位值, O_0 为偏移量。

因为投影光栅图中每个像素点的光强不同,为了获得光栅参量 ζ , 定义 a 和 b 为

$$\begin{cases} a \approx \langle I(k), \sin[\omega_0 Z(k)] \rangle \approx \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I(k) \sin[\omega_0 Z(k)], \\ b \approx -\langle I(k), \cos[\omega_0 Z(k)] \rangle \approx -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I(k) \cos[\omega_0 Z(k)], \end{cases} \quad (10)$$

此时 a 和 b 可以用正弦 $A \sin \phi$ 和余弦 $A \cos \phi$ 形式表示,并得出

$$\phi = \arctan(b/a) = \arctan \left\{ -\frac{\langle I(k), \cos[\omega_0 Z(k)] \rangle}{\langle I(k), \sin[\omega_0 Z(k)] \rangle} \right\}, \quad (11)$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\langle I(k), \sin[\omega_0 Z(k)] \rangle^2 + \langle I(k), \cos[\omega_0 Z(k)] \rangle^2}, \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{N_p}{2\pi} \arctan(b/a) = \frac{N_p}{2\pi} \arctan \left\{ \frac{\langle I(k), \cos[\omega_0 Z(k)] \rangle}{\langle I(k), \sin[\omega_0 Z(k)] \rangle} \right\}, \quad (13)$$

把 ζ 值代入(7)式中计算光强函数;模型参量在光强函数 I_i 的基础上估计。估计采用自动相关函数确定实际周期长度^[4],进而获得各个参量,当遇到视图被分成几部分的情况时,分别确定各个周期长度。 $\omega_i(\phi, \zeta)$ 可由拟合的多边形模型计算获得。由于相移与灰度差值相关性不大,因此偏移 O 和振幅 A 的影响可以忽略。计算的最终结果为测量相位值。

4.3 测量实验及结果

实验测量设备包括双目 CCD 相机、投影仪、控制仪器和用于相移计算和显示的 P III 800 计算机。区别于传统的光栅投影测量系统,该测量系统采用双目 CCD 相机记录投影光栅。应用双目 CCD 相机会增加对象的相位传递函数确定和三维测量的难度,但双目 CCD 相机记录结果能提高对象的相位传递函数和测量的精度。而且在单目 CCD 系统中,相机和投影仪都要标定,投影仪的标定过程十分复杂^[7];而采用双目 CCD 相机,只需用已知的方法标定相机^[9,10]。

图 5 给出平面对象表面的投影光栅图,从图中能够大概确定对象点所在光栅条纹,但不能精确获得具体位置。采用本文的相移及其优化方法获得的相位图在图 6 中给出,变化的相位值用不同的灰度值表示,成为计算机容易识别的灰度图像。相位的

精度可以达到亚像素,即通过插值获得亚像素的相位值。计算时间为 120 s。

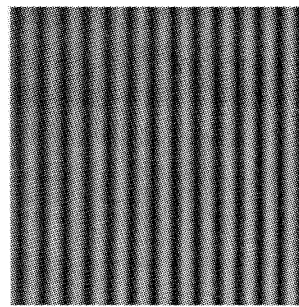


Fig. 5 Fringe projection of planar object

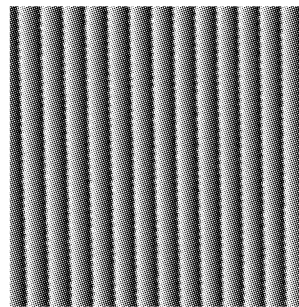


Fig. 6 Phase image of planar object

对于复杂的测量对象,投影光栅图也很复杂,采用普通的相位计算方法识别困难、误差大、相应的精度也低。而根据本文提出的相移方法不仅能够获得

清晰的相位图,而且能够提高测量精度。图 7 给出测量的复杂对象原件,根据本文方法对复杂对象的投影光栅图进行处理计算,得到如图 8 所示的相位灰度图,计算时间为 1356 s。从图中可以看出,经过处理的投影光栅的条纹清晰度、对比度、条纹精度更高。这样的相位图能被计算机很容易识别,从而能提高测量结果的精度。

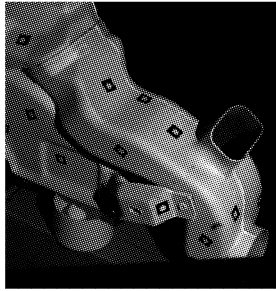


Fig. 7 Measuring prototype

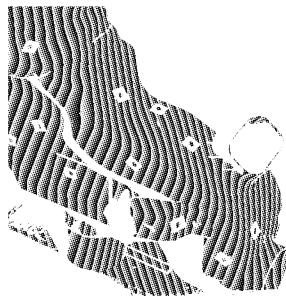


Fig. 8 Phase gray image of object

结论 在光栅投影测量系统中,相移法和格雷编码的结合具有突出的优点,因为格雷码用最少的编码步获得三维坐标,而相移法给出比格雷码更高的测量精度。当测量光与正弦光差别很大时,通过对任

意光栅模式的分析,获得光强函数的完整模型。利用这个模型能计算出更精确的对象的相位传递函数用于数据化相移,最终获得优化的相位值,相位精度可达亚像素级。

参 考 文 献

- 1 Liang meng, Fang Qiang. Measurement errors analysis of 3D profilometry based on linear coding structure light having isosceles triangle teeth. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(11):1518~1523 (in Chinese)
- 2 Gray F. Pulse code Communications. US-Patent: 2,632,058, 17. Mar. 1953
- 3 Creath K. Comparison of phase - measurement algorithms. *Surface Characterization and Testing*, 1986, **680**(3):19~28
- 4 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Analysis of two errors in grating projection profilometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(3):376~379 (in Chinese)
- 5 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Measurement* (激光测量学). Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- 6 Georg Wiora. High Resolution Measurement of Phase-Shift Amplitude and numeric Object Phase Calculation. Ulm, Germany: DaimlerChrysler AG, Research and Technology, 2000
- 7 Jan Burke, Heinz Helmers. Performance of spatial vs. temporal phase shifting in ESPI. *Proc. SPIE*, Washington USA, 1999, **3744**:980~992
- 8 Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T *et al.*. Numerical Recipes in C. New York: University of Cambridge, 1992
- 9 Kalla K U, Holma H J. Absolute calibration of photometer physical chemical earth (B). *Appl. Opt.*, 2000, **25**(5):467~470
- 10 Wang Baoguang, He Zhonghai, Chen Lincai *et al.*. Model and performance analysis of structured light sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4): 481~484 (in Chinese)