条纹投影与相位偏折测量技术研究进展

刘 东[1],严天亮[1],王道档[2],杨甬英[1],黄 玮[3]

(1. 浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027;
2. 中国计量大学 计量测试工程学院,浙江 杭州 310018;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,长春 吉林 130033)

摘 要:条纹投影和相位偏折测量术可用于精确地测量待测物面形,在全场光学三维轮廓测量领域具有较好的发展前景。首先,介绍了条纹投影和相位偏折测量技术的基本原理,重点是这两种技术中的相位提取技术、摄像机定标技术等关键技术。其次,对条纹投影和相位偏折测量术这两种测量方法的异同点做了对比。最后,介绍了条纹投影和相位偏折测量技术在提升测量精度和速度方面的发展。为了提升测量精度,主要有校正条纹 Gamma 效应、提升相位提取精度、摄像机标定精度和相位-高度/梯度标定精度等途径;为了提升测量速度,主要有提升相位提取速度、相位解包裹速度等方法。

关键词:条纹投影轮廓测量;相位偏折测量;对比;精度;速度
中图分类号:TN247 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.0917001

Review of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry

Liu Dong[1], Yan Tianliang[1], Wang Daodang[2], Yang Yongying[1], Huang Wei[3]

(1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry can realize high accurate measurement of three-dimensional shape, which has good development prospect in the full field three-dimensional profilometry. First, the measuring principles of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry were introduced. Moreover, the technologies of phase extracting and camera calibration in fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry were also especially emphasized, which were key technologies. Then the similarities and differences of fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry were compared. What's more, the development direction and problems to be solved of enhancing the measurement accuracy and speed in fringe-projection profilometry and phase measuring deflectometry were introduced. In order to improve the measurement accuracy, main methods can be divided as follows: correcting the the Gamma effect of a

收稿日期:2017-01-10; **修订日期**:2017-02-20
基金项目:国家自然科学基金(61475141);应用光学国家重点实验室开放基金;浙江省自然科学基金(LY17E050014)
作者简介:刘东(1982-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事光电检测与遥感技术方面的研究。Email: liudongopt@zju.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

digital projector and a digital camera, improving the phase extraction accuracy of the fringes, enhancing the camera calibration accuracy, phase-height/gradient calibration accuracy and other means. In order to improve the measurement speed, the phase extraction speed and the phase unwrapping speed were improved.

Key words: fringe-projection profilometry; phase measuring deflectometry; comparison; accuracy; speed

0 引 言

获取物体全貌的三维轮廓测量技术在质量控制、在线检测、CAD/CAM、机器视觉、医学诊断以及自动导航等领域得到广泛应用，其中的光学三维轮廓测量方法因具有非接触性、高精度、测量速度快等优点受到了重视，并具有很大的发展空间。

目前国内外常采用的光学三维轮廓测量方法主要分为探针法[1]、干涉法[2-4]、几何光线法和相位测量法等。探针法是较成熟的一种检测方法，多采用单点扫描，效率极低，采样点有限，检测精度只有微米量级，无法满足高精度非球面检测要求。光学全场三维面形测量方法因为它们的高速高精度测量能力受到了关注。在这些技术中，最流行的一种是能够以非常高的精度测量物体表面的干涉法。干涉法一般是针对有规律面形的元件进行测量，精度能达到波长级。但是，干涉法通常需要复杂而昂贵的补偿光学系统与严格稳定的环境，并且测量范围有限、通用性差，特别是测量口径往往受到限制。几何光线法是指基于几何光学原理对元件面形进行测量的技术，例如 Shack-Hartmann 波前传感器法[5]、Ronchi 光栅法[6]等。其中，Shack-Hartmann 的波前传感器法是一个重要的方法。但是，该方法在动态范围和测量点数量方面有所缺陷。

相位测量法主要分为条纹投影、相位偏折测量术。这两种方法主要通过在待测物表面投影正弦条纹，经过待测面漫射/或反射后，在光的漫射或反射方向使用 CCD 来接收变形条纹，并解调出对应位置处的相位。由 CCD 和投影仪的相位对应关系确定光线的传播路径，再通过测量计算相位的改变量得到物体表面的高度/梯度分布，恢复出待测物的面形。条纹投影和相位偏折测量术在测量过程中对辅助元件要求较小，并且具有较大的动态测量范围。目前，条纹投影技术的精度能达到微米级，相位偏折测量技术可达到的精度为微米级到纳米级，可以与干涉仪的精度相较[7-8]。

文中介绍了条纹投影和相位偏折测量术的基本原理，重点介绍了这两种技术中的相位提取技术、摄像机定标技术等关键技术。并对这两种测量方法的异同点做了对比。同时，还介绍了条纹投影和相位偏折测量术在提升测量精度和速度方面的发展。

1 条纹投影与相位偏折测量基本原理

1.1 条纹投影测量的基本原理

条纹投影技术主要应用于漫反射表面的待测物，其测量原理图如图 1 所示。一般通过投影仪将某一调制正弦光栅条纹投影到被测物的表面。条纹被待测物的面形调制进而产生扭曲，变形条纹中就蕴含了被测物的高度分布信息。由 CCD 接收变形条纹，接收到的条纹图像是数字化的，并且可以通过一些提取相位的技术，如傅里叶变换、多步移相法等，获取每个像素上条纹的相位分布。导出条纹相位与物体高度的数学关系，从而获取被测物的高度分布。得到待测物高度分布之后，再使用重构算法可以恢复出面形。

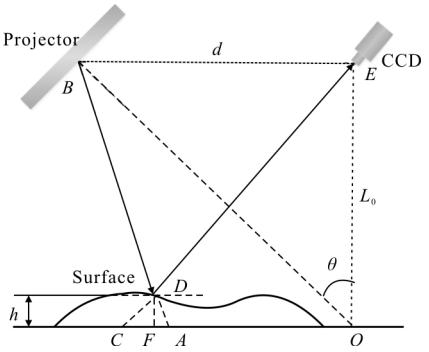

图 1 条纹投影测量系统原理图

Fig.1 Schematic of fringe-projection profilometry measurement system

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图中，记 E 为 CCD 光心，B 为投影仪光心。D 为被测物体上任意一点，A、C 两点分别为点 D 与投影仪光心、CCD 光心连线和参考面的交点。点 D 在参考面上的投影是 F，线段 DF 的长度为 h，L_0 和 d 分别是 CCD 光心到参考面、LCD 光心的距离。

可以证明得到相位-高度关系：

$$h=\frac{L_0(\theta_C-\theta_A)}{2\pi d/\lambda_0} \tag{1}$$

式中：λ_0 为光栅节距；$\Delta\theta=\theta_C-\theta_A$ 为相位差。

1.2 相位偏折测量的基本原理

相位偏折法通常用于镜面物体的测量，其测量原理图如图 2[9]所示。相位偏折测量法的基本思想是通过向被测表面投射某一调制正弦光栅条纹，在光的反射方向上用 CCD 来接收该反射光栅条纹。在这种情况下，当条纹图像投影到物体表面时，镜面的作用类似于一面镜子。所以，接收到的反射条纹的相位分布与被测物表面的梯度直接相关。由 CCD 和 LCD 显示屏的相位对应关系确定光线的传播路径，再通过测量计算相位的改变量得到物体表面的梯度分布，通过积分能够获得其三维形貌。目前，德国、日本、新加坡还有国内的一些高校对镜面反射法测量非球面均有大量的研究。德国萨尔州大学 Alexis Speck 等人[10]研究了其在自由曲面眼内镜片面形测量上的应用，国内的四川大学等[11]也有基于相位偏折法的非球面等镜面三维形貌的研究。

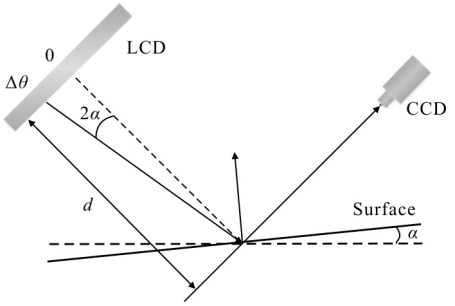

图 2 相位偏折测量系统原理图

Fig.2 Schematic of phase measuring deflectometry

图 2 中，一束光从 LCD 显示屏经由镜面反射入 CCD。每个图像像素中变形条纹的相位都能测出。根据表面的局部斜率 α，屏幕与物体间的距离 d，可以证明得到相位-梯度关系：

$$\Delta\theta=d\cdot\tan 2\alpha \tag{2}$$

使用相位提取技术可以提取拍摄得的变形条纹的相位。根据公式(2)可以得到待测物的梯度分布。与条纹投影不同的是，相位偏折术还要先积分得到高度分布，才能接着重构待测物面形。可以通过按照路径积分来重构物体表面面形。但是由于数据中包含噪声，所以重构的面形精度就与积分路径有关，按照不同的积分路径会有不同的结果。常用的有十字路径积分技术。与路径无关的重构技术有带状波前重构算法、基于 Zernike 多项式的模式重构法，以及全局积分技术。

无论是条纹投影还是相位偏折测量术，在用 CCD 接收到变形条纹之后，都要先用相位提取技术将每个像素对应的相位信息提取出来。因此，准确快速地提取出每个像素对应的相位，是精确快速地得到待测物面形分布中至关重要的一步。

2 条纹投影和相位偏折中的相位提取技术

根据第 1 节的系统原理，CCD 获取变形条纹图像，通过相位提取算法得到变形条纹的相位分布，再根据上述相位-高度/梯度关系，可以得到物体的高度/梯度分布。所以，相位的提取精度会直接影响到最后三维面形的测量精度。目前的相位提取方法归纳起来有：莫尔法、傅里叶变换法、相移法等。其中后两种较为常用。

2.1 傅里叶变换法

当使用傅里叶变换法求解相位时，首先用摄像机采集条纹图像，然后对参考平面的条纹与受待测物体调制的变形条纹分别进行傅里叶变换，在频率域进行滤波，滤出基频分量，最后对其进行逆傅里叶变换求得相位。一维正弦条纹的傅里叶变换法提取相位原理如下。

摄像机拍摄的经由待测物面形调制的条纹可表示为：

$$I(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\cos[2\pi f_0x+\varphi(x,y)] \tag{3}$$

可将它重写为：

$$g(x,y)=a(x,y)+c(x,y)\exp(2\pi if_0x)+c^*(x,y)\exp(-2\pi if_0x) \tag{4}$$

式中：$c(x,y)=\frac{\{b(x,y)\exp[i\varphi(x,y)]\}}{2}$。

将 $g(x,y)$ 对 x 做傅里叶变换得：

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$G(f,y)=A(f,y)+C(f-f_0,y)+C^*(f+f_0,y) \tag{5}$$

由于 $a(x,y)$、$b(x,y)$和 $\varphi(x,y)$相对 f_0 变化缓慢，因此，可以 $C(f-f_0,y)$将部分滤出，并将其移回原点，再做傅里叶逆变换得到 $c(x,y)$，求出 $\varphi(x,y)$：

$$\tan\varphi(x,y)=\frac{I_m[c(x,y)]}{R_e[c(x,y)]} \tag{6}$$

由于只需要使用一幅图提取相位，傅里叶变换法的一个显著优点是计算速度快。但是相比于移相法，精度不够高。

2.2 移相法

移相法是应用广泛的相位测量方法，其基本原理是使用计算机生成具有一定调制的条纹图，将其投影到待测物表面。一共投影 N 幅条纹图，则每一幅移相 $2\pi/N$。通过 CCD 接收 N 幅变形条纹图，获得了每个像素中的 N 个强度值，可以分别求得每个像素处的相位。

设原始的条纹强度分布函数为：

$$I_i(m,n)=I'(m,n)+I''(m,n)\cos[\theta_0(m,n)+\delta_i] \tag{7}$$

经过待测物表面面形调制后条纹变形为：

$$I_i(m,n)=I'(m,n)+I''(m,n)\cos[\theta_0(m,n)+\theta(m,n)+\delta_i] \tag{8}$$

式中：$\theta(m,n)$为待测物表面引入的相位偏折。在公式(8)中，有 $I'(m,n)$、$I''(m,n)$、$\theta(m,n)$这 3 个未知数。那么，至少要从条纹图像中分离出 3 个方程式来求解这些未知数。至少移相 3 次，可以产生 3 个方程式求解 3个未知数。

以最常使用的四步移相法为例。将条纹分别相移 0°、90°、180°、270°，并由 CCD 接收它们的图像。4 个条纹图像因此可以表示为：

$$\begin{cases} I_1(m,n)=I'(m,n)+I''(m,n)\cos[\theta(m,n)] \\ I_2(m,n)=I'(m,n)+I''(m,n)\cos[\theta(m,n)+\pi/2] \\ I_3(m,n)=I'(m,n)+I''(m,n)\cos[\theta(m,n)+\pi] \\ I_4(m,n)=I'(m,n)+I''(m,n)\cos[\theta(m,n)+3\pi/2] \end{cases} \tag{9}$$

由公式(9)，解得相位主值为：

$$\varphi(m,n)=\arctan\left[\frac{I_4(m,n)-I_2(m,n)}{I_1(m,n)-I_3(m,n)}\right] \tag{10}$$

除了四步移相法，移相法还包括三步、五步等多步法。三步法采集只要三幅图，因此有很快的处理速度，但是不能有效抑制相移误差的影响。四步法可以自动消除背景项，能有效抑制非线性响应的影响，但是同样不能有效抑制相移误差的影响。一般来讲，移相法的移相次数越多，精度越高，但是所花时间也越多。相比傅里叶变换法，移相法具有较高的精度，并具有一定的自消除误差性。但是由于要拍摄较多幅图片，数据处理复杂，不利于动态和实时测量。

目前最普遍使用的求解条纹相位的方法是傅里叶变换法和移相法。无论对于条纹投影技术，还是相位偏折测量技术，这两种方法都是通用的。但是，根据公式(6)与公式(9)，由于反正切的关系，求得的相位位于(0,2π)区间，并不是真实的相位，而是相位主值。所以，还需要进行进一步的相位展开，即解相位，才能得到真实的相位。

得到了图像每个像素上的相位值之后，还需要知道对应于世界坐标系中每个对应像素上的相位值，才可以计算得到待测物在世界坐标系的梯度分布。为此，需要建立一个合适的摄像机模型，对成像镜头进行标定。

3 条纹投影和相位偏折中的定标技术

在条纹投影和相位偏折测量技术中，CCD 获取了经待测面高度或梯度调制后的变形条纹。通过提取这些变形条纹，可以获得 CCD 上每个像素对应的相位值，通过相位-高度/梯度关系，可以得到 CCD 上每个像素对应的高度/梯度分布。但是这里得到的高度/梯度分布，并不是待测物所在的世界坐标系中的高度/梯度分布。为此，必须标定出从 CCD 图像坐标系到世界坐标系中的对应关系，并将成像镜头的畸变在一定程度上进行校正。标定的精度会直接决定三维面形测量的精度。

3.1 摄像机定标技术

条纹投影和相位偏折测量系统中成像镜头的径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变等透视畸变，会导致实际图像点与理想图像点存在位置偏差，进而影响最后的面形测量精度。因此，必须建立合适的成像镜头畸变模型并进行标定，从而提高测量精度。标定过程是用已知相对位置的特征点来求解摄像机模型中的参数，以此建立摄像机和显示屏间的位置关系。通过标定，将成像镜头的畸变在一定程度上进行校正，进而建立 CCD 图像坐标系与世界坐标系间准确的坐标转换关系。标定的精度会直接决定了三维面形测量的精度。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一般来说，摄像机标定技术可以分为传统标定法和自标定法这两类。传统标定法需要使用高精度加工的标定物，而自标定法不需要。该标定物的特征点及其相互间的对应关系均为已知。通过提取这些特征点，根据摄像机参数约束关系，借助优化算法计算摄像机参数。自标定法主要侧重于机动灵活，而传统的摄像机标定法精度更高。传统的摄像机标定法的典型代表有直接线性变换方法，非线性优化方法，两步法，平面模板法等。

直接线性变换方法是 Abdel-Aziz 和 Karara 于 1971 年提出的[12]。在此方法中，忽略了摄像机镜头畸变，通过建立并求解一组线性约束方程就可以求得摄像机的内参数和外参数，并且不需要迭代计算。所以，直接线性变换方法具有计算简单、易于应用的优势。但是，由于这种方法没有考虑摄像机镜头的非线性因素，所以误差较大。目前，也有一些方法根据径向畸变下的针孔模型的特点，使用线性方法分步计算参数，从而提高了精度[13]。

Faig[14]的方法是非线性优化技术的典型代表。在直接线性变换方法的基础上，该方法考虑了摄像机成像镜头的畸变因素，因此得到结果的精度较高。但是由于使用的未知数过多，非线性过程较为复杂，从而引起计算量大、优化过程不稳定的问题。并且由于使用了迭代的计算，对于初值的要求较高。

直接线性变换方法没有考虑摄像机镜头的非线性因素，而非线性优化法虽然考虑了非线性因素，提高了精度。但是由于参数过多，导致非线性优化过程复杂、计算量大，甚至结果不稳定。将这两种方法相结合，Tsai 在径向畸变影响的摄像机模型基础上提出了一种实用的两步标定算法[15]。两步法只考虑了影响因素较大的径向畸变，忽略了影响较小的切向畸变。从而可以显著减少了非线性优化中的未知数。两步法首先忽略了非线性因素，通过约束关系求解出了线性情况下的摄像机内外参数。然后以此为初值，考虑摄像机镜头的径向畸变因素，进行非线性优化。两步法中非线性优化的初值较为精确，并且非线性优化中的参数较少，所以优化过程较为稳定，精度较高。但是，两步法的标定过程比较复杂。此外，该方法也只考虑了畸变中的径向畸变。但是 Weng 等在参考文献[16]中也同时考虑了两种畸变，进一步发展了这种标定法。

平面模板法由微软的张正友在 1998 年提出[17]。该方法使用的标定物并不昂贵复杂，为一个高精度加工的平面模板。CCD 接收平面模板图像后，通过检测算法提取出模板的角点阵列。旋转模板至少两次，获得两个方向或更多方向的模板图像。通过提取出来的几组角点阵列，计算出单应性矩阵，然后进一步求得摄像机在线性情况下的内外参。然后以此为初值，考虑摄像机的非线性因素，进行非线性优化，从而求出摄像机内外参以及畸变系数的精确解。平面模板法的精度高，最后的标定精度能达到半个像素。并且由于只需使用平面模板任意旋转两个以上的方向，对标定设备的要求不高。但是也因此标定过程需要花较多时间。目前国内也有很多对张正友标定法的研究和改进[18-19]。

摄像机自标定在 1990 年由 Faugeras[20]等首先提出，该方法与传统的摄像机标定法的区别主要在于不借助任何标定物，而是直接利用场景信息进行标定。摄像机自标定主要适用于灵活性高，但是标定精度低、速度慢的场合。

摄像机定标方法同时适用于条纹投影和相位偏折。但是，经过摄像机定标之后，相位偏折系统还会出现多义性问题。

3.2 相位偏折中摄像机定标的多义性问题

相位偏折测量中，通常经过摄像机标定，即将摄像机和 LCD 坐标系汇总到一个共同坐标系中后，会出现系统多义性问题。如图 3 所示，几何标定后，对于每个像素 p，经过它的光线 v 以及观测点 q 在世界坐标系中都是已知的。但是，这些信息不足以计算出表面法线。面形上的折射点可能在 v 上的任意位置处。

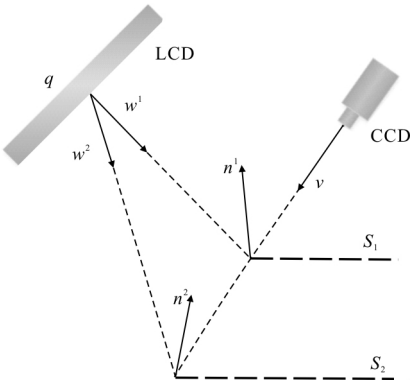

图 3 标定中的系统多义性

Fig.3 System ambiguity in calibration

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面对这个多义性问题，Markus C. Knauer 等采用一种比较新颖的双 CCD 相机的方法，得到了 20 nm 左右的重建精度[9]。如图 4(a)所示，引入第二台摄像机。对于第一台摄像机，法线由 v_1，s^i 和 q_1 计算。对第二台摄像机，法线由 v_2^i，s^i 和 q_2^i 计算。当两台摄像机对焦在面形上的点 s 时，依据 v、s、q 算得的法线方向是相同的。当假想点 s^i 是错误的时，算得的法线方向也不同(比较图 4(b)中的 α 和 β)。

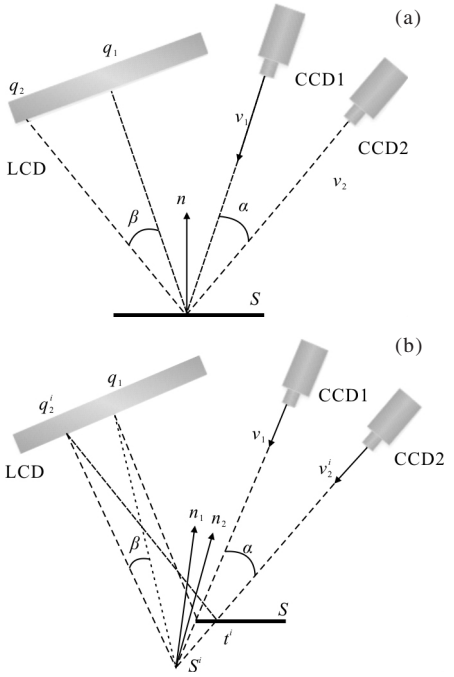

图 4 (a) 置入第二台摄像机，
(b) 通过测试一系列假想点来寻找面形点
Fig.4 (a) Place the second camera,
(b) find the surface points by testing several assumptions

当假想点 s^i 在正确的高度 z 处时，计算出的两条法线间的夹角会变为 0。在连续可微面形，一个已知面形点就足以消除这种多义性。从这点开始，就可以通过数值积分计算得到面形上其他点的高度和法线方向。

4 测量精度的提升

不同的应用领域对三维面形的测量范围、测量速度、空间分辨率和精度等提出了不同的要求。目前，条纹投影和相位偏折测量的研究关键点主要集中在两个方面：一方面是精度；另一方面是速度。在本章节将对精度方面进行进一步分析，速度方面将在第 5 节进行分析。

由于LCD 与 CCD 的非线性效应、透镜的非线性畸变、投影条纹的非正弦性以及较差的条纹对比度和条纹亮度、测量系统的校准误差等，测量系统的精度会受到较大的影响。目前，想要提高测量精度，主要可以从以下方面等着手。

4.1 条纹 Gamma 效应的校正

在基于相位恢复的条纹投影与相位偏折测量中，高质量的正弦条纹是获得高精度三维面形测量结果的前提。由于成本低和灵活性高的优点，数字投影仪和数字摄像机得到了广泛的应用。然而，数字投影仪和数字摄像机的 Gamma 效应引起的非线性效应，会对所获取的条纹图像带来额外的强度变化，使其发生了非正弦畸变，从而引发相位计算误差。除了条纹的非正弦性，条纹图像中的噪声也是影响条纹质量的一大因素。为此，必须进行一系列条纹图像处理的操作来降低这些因素的影响。

为了克服条纹非正弦性的问题，国内外学者进行了广泛而深入的研究。如四川大学苏显渝等人指出，测量时使投影设备适当离焦，能有效减小 Gamma 效应引起的相位恢复误差[21]。东南大学盖绍彦等[22]通过调整投影像素单元的灰度分布改变光栅投影的空间分布，使投影出的光栅达到最优的正弦分布。南京理工大学崔艳军等[23]提出了 Gamma 值预标定的方法，将 Gamma 校正前后的相位平面与标准相位平面之间的误差降低了一个数量级，提高了测量精度。Hoang 等[24]提出了先使用移相法检测出测试系统中的 Gamma 值，然后进行 Gamma 值预标定的方法，可以实现高精度测量。

4.2 相位求解的精度提升

以最常使用的相移法为例。相移法的精度主要与相移次数以及正弦条纹的投影质量有关。最简单的三步相移法使用三幅相移条纹，所需的条纹图像数较少。此外，还有四步相移法以及采取任意相移的多步相移法等。总体看来，随着移相次数的增加，得到的精度增加，但也会伴随着所需时间的增加。在使用时应当综合考虑。

除了相移次数，条纹的投影质量主要由条纹的非正弦误差和移相误差决定。对于非正弦误差，已在前文讨论。传统投影系统中，机械移动引起的相移误

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

差较难消除。但是,数字投影仪并不依赖于机械结构,它能方便地实现各种步长的相移,降低了移相误差。通过对数字投影仪的进一步研究和灵活应用,可以提高测量精度。

除了在硬件方面,亦可以在算法方面提升移相精度。中国科学院长春光学精密机械研究所刘江等[25]通过分析投影到待测面的条纹光强变化形式,推导出一种可以免疫光强变化的五步移相算法,达到了较高的相位计算精度。Okada 等[26]在 1991 年提出了一种基于最小二乘的迭代算法,来解决移相误差的问题。然而,由于这类迭代算法需要至少五次移相,所以仍在不断的改进中。Wang 等[27]提出了一种改进的迭代算法(AIA),可以在只需移相三次的同时保持较高的精度,并且计算过程中迭代的次数也明显减少。朱新军等提出了一种基于变分模态分解的单幅条纹投影相位提取方法[28]。

4.3 摄像机标定精度的提升

条纹投影和相位偏折测量系统中成像镜头的径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变等透视畸变,会导致实际图像点与理想图像点存在位置偏差,进而影响最后的面形测量精度。因此,必须建立合适的成像镜头畸变模型并进行标定,从而提高测量精度。标定的精度会直接决定了三维面形测量的精度。

Tsai 的两步法和张正友的平面模板法得到了广泛的应用。国内外有很多研究在这两者之上做了更进一步的改进[16,18-19]。

4.4 相位-高度/梯度标定精度的提升

在第 1 节中,介绍了条纹投影和相位偏折测量系统的基本原理,以及基本的相位-高度/梯度关系。但是,第 1 节中的模型是一种简化的、实际实验中难以达成的模型。为了进一步提升相位-高度/梯度标定精度,降低实验要求,必须改进模型和算法。

Li 等[29]提出了一种用于解决待测物动态范围过大所引起的投影仪失焦时的精度问题;Su 等[30]构建了一个简单的相位偏折测量系统 SCOTS,对系统误差进行了标定和移除,从而得到了较高的精度。

5 测量速度的提升

三维面形测量的速度主要由测量原理、硬件性能以及测量算法决定。所以,如果想要实现实时测量的话。一方面,要提升硬件的性能,如加大对高速摄像机、高速投影仪以及高速计算机技术的研究和发展;另一方面,要加强对算法的改进。

5.1 相位求解速度的提升

提升相位求解速度是实现实时测量的关键。在对算法的选择上,由于傅里叶变换法只需要拍摄一幅图像,采集时间相比移相法要短得多,所以是一种比较适合于实时三维测量的方法。四川大学岳慧敏等[31]提出一种采用复合光栅投影的方法,提高了低 π 相移傅里叶变换轮廓术的的测量速度。但是,如前文所述,傅里叶变换法提取相位的精度较低,要在高速测量的同时保证高精度测量较为困难。所以,其他一些只需拍摄一幅图像或少量图像的算法正在发展。如 Zhang 等提出投影一幅红绿蓝三色编码的彩色图样以代替三次移相[32],西安交通大学邹海华等[33]提出的基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术等。并且改进的迭代算法也在不断发展,期冀能在实现高精度测量的同时尽量提升速度,比如 Wang 等[27]提出的改进的迭代算法。并且,由于此种算法可以任意移相,所以可以使投影仪不停移相的同时随机拍照,增加了实时测量的可能性。

5.2 相位解包裹速度的提升

在通过移相法等相位提取算法求得相位主值后,还应该注意选取快速的相位解包裹算法。解相位主要有空域和时域两种方法。空域解相位法仅依赖于相位主值图,不需要其他附加信息,所以速度较快,但是精度较低。时域解相位法按照时间序列投影出足够多不同频率的条纹图,这样就有足够多的编码信息,但相应的速度也就慢了。为此,一方面要在保证精度合格的情况下尽可能提高解相位的速度;另一方面也要加强对算法的改进。如西安交通大学施展等提出[34]基于双频彩色条纹进行解相位,只需采集一帧图像,提高了测量速度,也能保证较高的解包裹精度。Zhang 等[35]结合了品质引导算法和快速线扫描算法,提出了一种多级品质引导算法。精度上比传统的算法略高一些,速度上提升了约 27 倍。南京天文光学技术研究所李博等[36]将区域重构技术引入解包运算中,得到一种新的路径无

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关类解包方法,使得计算量大大减小,计算速度优于同类解包方法。华中科技大学 Zhong 等[37]提出了一种对于任意面形也不需要进行相位解包裹的方法,从而可以较好地执行快速条纹投影测量。

6 结 论

探针法、干涉法和几何光线法等光学三维轮廓测量方法在国内外得到了广泛的应用。探针法是较成熟的一种检测方法,多采用单点扫描,效率极低,采样点有限,检测精度只有微米量级。干涉法一般是针对有规律面形的元件进行测量,精度能达到波长量级。但是,干涉法通常需要复杂而昂贵的补偿光学系统与严格稳定的环境, 并且测量范围有限、通用性差,特别是测量口径往往受到限制。而几何光线法中的 Shack-Hartmann 波前传感器法等方法,在动态范围和测量点数量方面有所缺陷。条纹投影和相位偏折测量术在测量过程中对辅助元件要求较小,并且具有较大的动态测量范围。而且,条纹投影技术的精度能达到微米量级,相位偏折测量技术可达到的精度为微米量级到纳米量级,已经可以与干涉仪的精度相比较。

相位提取技术是条纹投影和相位偏折测量中的关键技术之一。相位的提取精度会直接影响到最后三维面形的测量精度。目前的相位提取方法归纳起来有:莫尔法、傅里叶变换法、相移法等。其中后两种较为常用。傅里叶变换法只需拍摄一幅图就可用于提取相位,适合高速测量,但是精度较低;移相法需要至少拍摄三幅图进行相位的计算,并且移相的次数越多,精度越高,速度越慢。移相法相比于傅里叶变换法所花的时间更多,但是精度更高,适合高精度测量的场合。

除了相位提取技术,摄像机定标技术也是条纹投影和相位偏折测量中的关键技术之一。条纹投影和相位偏折测量系统中成像镜头的径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变等透视畸变,会导致实际图像点与理想图像点存在位置偏差,进而影响最后的面形测量精度。因此,必须建立合适的成像镜头畸变模型并进行标定,从而提高测量精度。一般来说,摄像机标定技术可以分为传统标定法和自标定法这两类。传统标定法与自标定法的主要区别在于使用标定物。自标定法主要侧重于机动灵活,而传统的摄像机标定法精度更高。所以,传统的摄像机标定法更适合于精度要求较高的场合。传统的摄像机标定法的典型代表有直接线性变换方法,非线性优化方法,两步法,平面模板法等。这其中,两步法和平面模板法的应用最多。

条纹投影和相位偏折测量在步骤和关键技术上有很多相似点。但是不同之处也有很多。条纹投影应用于漫反射表面的物体,相位偏折测量应用于镜面表面的物体; 条纹投影可以直接得到相位-高度关系, 相位偏折测量在得到相位-梯度关系后还要经过积分才能得到高度分布;条纹投影的精度比不上相位偏折测量等。

条纹投影和相位偏折测量术在提升测量精度和速度方面有很大的发展。为了提升测量精度,主要有校正条纹 Gamma 效应,提升相位提取精度,提升摄像机标定精度和相位-高度/梯度标定精度等途径。为了提升测量速度,主要有提升相位提取速度、相位解包裹速度等。

限于篇幅,文中仅对条纹投影和相位偏折测量术的一些基本技术做了简要综述。虽然目前条纹投影和相位偏折测量术相比广泛使用的干涉法还有很多缺陷,但是随着各类技术的不断进步,条纹投影和相位偏折测量术将会得到越来越多的发展与应用。

参考文献:

[1] Su P, Oh C J, Parks R E, et al. Swing arm optical CMM for aspherics [C]//SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7246: 72460J.

[2] Liu Bingcai, Li Bing, Tian Ailing. Compensation and identification of non-common path error in lateral shearing interferometry[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44 (8): 2406-2410. (in Chinese)

[3] Wang Xiaokun. Measurement of large off-axis convex asphere by systemic stitching testing method [J]. ***Chinese Optics***, 2016, 9(1): 130-136. (in Chinese)

[4] Ma Zhanlong, Peng Lirong, Wang Gaowen. High-precision CGH substrate figuring by ion beam [J]. ***Chinese Optics***, 2016, 9(2): 270-276. (in Chinese)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[5] Platt B C, Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. ***Journal of Refractive Surgery***, 2001, 17(5): S573-S577.

[6] Su X Y, Zhou W S, Von Bally G, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating [J]. ***Optics Communications***, 1992, 94(6): 561-573.

[7] Jüptner W, Bothe T. Sub-nanometer resolution for the inspection of reflective surfaces using white light[C]//SPIE Nano Science+ Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7405: 740502.

[8] Faber C, Olesch E, Krobot R, et al. Deflectometry challenges interferometry: the competition gets tougher[C]// SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8493: 84930R.

[9] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]//Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2004: 366-376.

[10] Speck A, Zelzer B, Kannengieβer M, et al. Inspection of freeform intraocular lens topography by phase measuring deflectometric methods [J]. ***Applied Optics***, 2013, 52(18): 4279-4286.

[11] Tang Y, Su X Y, Liu Y. Three dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2009, 29(4): 965-969.

[12] Abdel-Aziz Y, Karara H M. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]//Close-range Photogrammetry, 1971: 1-18.

[13] Zhang Y Z, Ou Z Y. A new linear approach for camera calibration[J]. ***Journal of Image and Graphics***, 2010, 6(8): 14-18.

[14] Faig W. Calibration of close-range photogrammetric systems: Mathematical formulation[J]. ***Photogrammetric Engineering and Remote Sensing***, 1975, 41(12): 1479-1486.

[15] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. ***IEEE Journal of Robotics and Automation***, 1987, 3(4): 323-344.

[16] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence***, 1992, 14(10): 965-980.

[17] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 2000, 22(11): 1330-1334.

[18] Liu Y, Li T F. Research of the improvement of Zhang's camera calibration method [J]. ***Optical Technique***, 2014, 40(6) :565-570.

[19] Yue X F, Qi H. Calibration of binocular stereo-vision system based on Zhang Zhengyou plane template method[J]. ***Mechanical Engineer***, 2014(2): 1-3.

[20] Faugeras O D, Maybank S. Motion from point matches: multiplicity of solutions [J]. ***International Journal of Computer Vision***, 1990, 4(3): 225-246.

[21] Su X Y, Zhou W S, Von Bally G, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating [J]. ***Optics Communications***, 1992, 94(6): 561-573.

[22] Gai S Y, Da F P. A new phase alignment method for digital project or in phase measuring profilometry[J]. ***Acta Automatiac Sinica***, 2008, 34(11): 1363-1368.

[23] Cui Yanjun, Zhang Wenfeng, Li Jianxin. A method of gamma correction in fringe projection measurement [J]. ***Acta Optia Sinica***, 2015, 35(1): 0112002. (in Chinese)

[24] Hoang T, Pan B, Nguyen D, et al. Generic Gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry[J]. ***Optics Letters***, 2010, 35(12): 1992-1994.

[25] Liu J, Wang F, Wang G W. Application of standard intensity insensitive five-step phase-shifting algorithm in projected fringe deflectometry[J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2013, 40(11): 211-217.

[26] Okada K, Sato A, Tsujiuchi J. Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase shift in phase shifting interferometry[J]. ***Optics Communications***, 1991, 84(3-4): 118-124.

[27] Wang Z, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. ***Optics Letters***, 2004, 29(14): 1671-1673.

[28] Zhu Xinjun, Deng Yaohui, Tang Chen. Variational mode decomposition for phase retrieval in fringe projection 3D shape measurement [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 24(9): 2318-2324. (in Chinese)

[29] Li B, Karpinsky N, Zhang S. Novel calibration method for structured-light system with an out-of-focus projector[J]. ***Applied Optics***, 2014, 53(16): 3415-3426.

[30] Su P, Wang Y, Burge J H, et al. Non-null full field X-ray mirror metrology using SCOTS: a reflection deflectometry

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

approach[J]. ***Optics Express***, 2012, 20(11): 12393-12406.

[31] Yue H M, Su X Y, Li Z R. Improved fast fourier transform profilometry based on composite grating [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2005, 25(6): 767-771.

[32] Zhang Z, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. ***Optics Express***, 2006, 14 (14): 6444-6455.

[33] Zou H H, Zhao H, Zhou X. Triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2011(8):165-173.

[34] Shi Z, Zhao H, Zhang L. Phase-unwrapping method based on dual-frequency colorful fringe projection[J]. ***Acta Optica Sinica***, 2007, 27(3): 461-465.

[35] Zhang S, Li X, Yau S T. Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction[J]. ***Applied Optics***, 2007, 46(1): 50-57.

[36] Li Bo, Ma Suodong. Path-independent phase unwrapping method using zonal reconstruction technique[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(2): 0229006. (in Chinese)

[37] Zhong K, Li Z, Shi Y, et al. Fast phase measurement profilometry for arbitrary shape objects without phase unwrapping [J]. ***Optics and Lasers in Engineering***, 2013, 51 (11): 1213-1222.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net