

同步扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法

卢明腾¹ 苏显渝¹ 曹益平¹ 游志胜² 钟 敏¹

¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

²四川大学计算机学院, 四川 成都 610065

摘要 基于三角法的结构光三维测量技术具有较高的精度,但投影光轴和观察光轴之间的夹角在测量过程中可能产生遮挡和阴影,需要通过两次或多次不同方向的测量和拼接解决。与三角测量不同,基于调制度测量的三维面形测量方法采用了垂直测量原理,将投影光轴和观察光轴重合,从而摆脱了基于三角测量原理的光学三维传感方法中阴影、遮挡等限制。对一种连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法进行了研究,分析了这种类型的结构光扫描条纹的特点,基于这种特点介绍了几种同步扫描的调制度测量轮廓术提取调制度及三维重建算法,比较了几种算法的特点,实验表明采用适当的三维面形重建算法,可以在垂直测量的模式下实现115 mm深度测量范围,对被测面积为120 mm×120 mm检验平面测量,标准差可达0.19 mm。

关键词 测量; 调制度测量轮廓术; 三维面形测量; 垂直测量; 傅里叶变换; 相移算法

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0308006

3D Shape Reconstruction Algorithms for Modulation Measuring Profilometry with Synchronous Scanning

Lu Mingteng¹ Su Xianyu¹ Cao Yiping¹ You Zhisheng² Zhong Min¹

¹School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

²School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract The three-dimensional profilometry based on structured light triangulation can achieve relatively high precision, but the offset angle formed by the optical axis of projection system and observation system can cause shadow and occlusion. The measurements from two directions and image stitching technology are needed. Different from the triangulation methods, the modulation measuring profilometry is based on vertical measurement theory. In its measuring system, the optical axes of projection and observation are coaxial, which avoid the shadow and occlusion problem in the triangulation methods. A modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning and the reconstruct algorithm are studied. The features of scanning fringes are analyzed, and the features of several algorithms about modulation extraction and 3D shape reconstruction are introduced and compared. Experiments indicate that choosing the proper algorithm can achieve better measuring accuracy of 0.19 mm standard deviation in the measuring range of 115 mm while measuring a 120 mm×120 mm testing plane, under vertical measuring mode.

Key words measurement; modulation measuring profilometry; 3D shape measurement; vertical measurement; Fourier transform; phase shifting algorithm

OCIS codes 120.6650; 030.4280; 110.2960

收稿日期: 2015-10-08; 收到修改稿日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61177010)、国家重大科学仪器开发专项(2013YQ49087901)

作者简介: 卢明腾(1988-),男,博士研究生,主要从事三维测量方面的研究。E-mail: firedinosaur@163.com

导师简介: 曹益平(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事三维测量及光机电一体化技术等方面的研究。

E-mail: ypcao@scu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

基于结构光的三维面形测量技术具有非接触、测量速度快、精度高和易于在计算机控制下实行自动化测量等优点,已被深入研究并被广泛用于机器视觉、自动化控制加工、工业自动检测、产品质量控制、实物仿形、生物医学、三维成像和影视特技制作等领域^[1-3]。基于三角法的结构光三维测量技术主要包括相位测量轮廓术(PMP)^[4-5]和傅里叶变换轮廓术(FTP)^[6-8]等,在这些基于三角测量原理的方法中,投影光轴和观察光轴之间存在一个夹角,投影一个正弦光栅(直条纹)到被测三维表面,从另一个方向观察到的是变形条纹,通过计算条纹的变形量重建三维面形。投影光轴和观察光轴之间的夹角越大,变形量越大,重建精度越高。然而,夹角越大可能产生的遮挡和阴影问题越严重。通常,解决这一矛盾的方法是保证必要的精度(保持投影光轴和观察光轴之间一定的夹角),通过两次以上(含两次)从不同方向的测量和拼接解决遮挡和阴影问题^[9]。与三角测量相对应,将投影光轴和观察光轴重合的测量方法称为“垂直测量”或“同轴测量”^[10-11]。基于调制度测量的三维面形测量方法采用了垂直测量原理,从而摆脱了基于三角测量原理的光学三维传感方法中阴影、遮挡等限制,可以实现表面高度变化剧烈或不连续的物体的测量^[12-15]。比较而言 PMP,FTP 等结构光面形测量方法是基于三角测量原理,具有较高的精度,而调制度测量轮廓术是基于同轴测量原理,可以实现垂直测量,但精度低于三角测量。在现有的调制度测量轮廓术中,投影的结构光对被测物进行轴向扫描,采用傅里叶变换(FT)对电荷耦合元件(CCD)相机同轴获取的每帧条纹图进行单独处理,各个像素点之间的相互影响以及滤波操作会导致物体细节信息的丢失,影响测量精度^[14-15];如果对每一扫描位置采集 $N(N \geq 3)$ 帧相移条纹图,同利用 N 步相移方法计算调制度信息,由于是点对点的计算,避免了像素点之间的相互影响^[12]。但是,轴向扫描和相移是分别进行的,走走停停的断续扫描过程影响了测量速度和精度。

最近,一种连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术被提出^[16],其特点是相移和垂直扫描是一个连续的和自动同步的过程。该方法测量时,通过对测量范围内的一系列等间距平面进行扫描,建立扫描过程中得到调制度最大值的位置序号与实际物理空间位置的对应关系,产生查找表。在对待测物体进行扫描时,得到物体上每一点的调制度最大值的扫描位置序号,然后通过之前建立的高度映射查找表恢复出物体的三维面形。

本文详细分析了连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术测量方法中获取的条纹图的特点,阐明了在该方法中,光栅在物空间的等间隔扫描,使得像平面在像空间不等间隔扫描,导致调制度包络并不是像白光干涉条纹图那样是对称的,对比了这种结构光条纹图与白光干涉条纹图的相似性和不同。该差异性决定了条纹图处理的算法的使用和系统标定的必要性。介绍了几种同步扫描的调制度测量轮廓术三维重建算法。在提取调制度包络时比较了傅里叶变换方法与相移方法,在搜索调制度最大值时对比了二次拟合法与重心法,在物体高度恢复时使用三次拟合法。实验表明,在提取调制度包络的过程中,噪声较小时选取相移法,噪声较大时选取傅里叶变换法,在找寻调制度最大值点时选取重心法,在重建物体时选取直接三次拟合方法,实现了测量范围内 0.17% 的相对测量精度,与早期提出的调制度测量轮廓术^[16]相比较有所提高。

2 同步扫描的垂直测量原理

同步扫描调制度测量轮廓术的原理如图 1 所示。

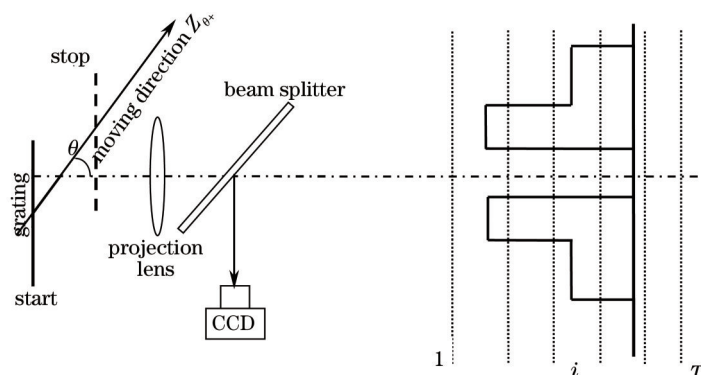


图 1 测量方法原理图

Fig.1 Principle diagram of proposed method

测量系统的实物图如图2所示,各模块与原理图图1对应。投影光栅垂直于光轴放置于一维平移台上,平移台沿与光轴成 θ 夹角方向连续移动,实现相移和垂直扫描自动同步。扫描的过程中,平移台等位移量产生的触发脉冲控制 CCD 拍摄投影的光栅条纹图。位移量可分解为垂直于光轴和平行于光轴两个方向,其中水平方向的位移量为光栅的相移量 $2\pi/N(N\geq 3)$;垂直方向,其总的位移量确保待测物体的每个高度面在扫描过程中经历正离焦-对焦-负离焦的过程。如图3(a)所示,CCD 拍摄的条纹图序列中,从每一个同位置像素点,可以得到其沿时间轴的条纹图,其条纹图及其调制包络如图3(b)所示。

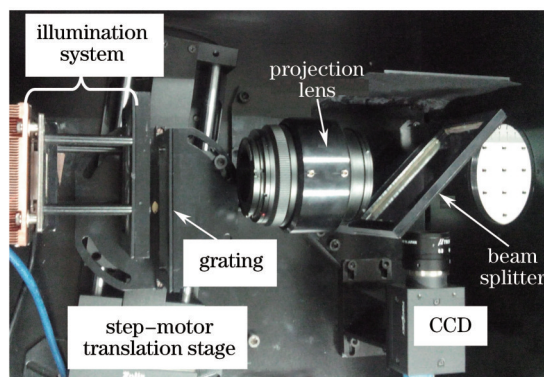


图2 测量系统实物图

Fig.2 Real object of measuring system

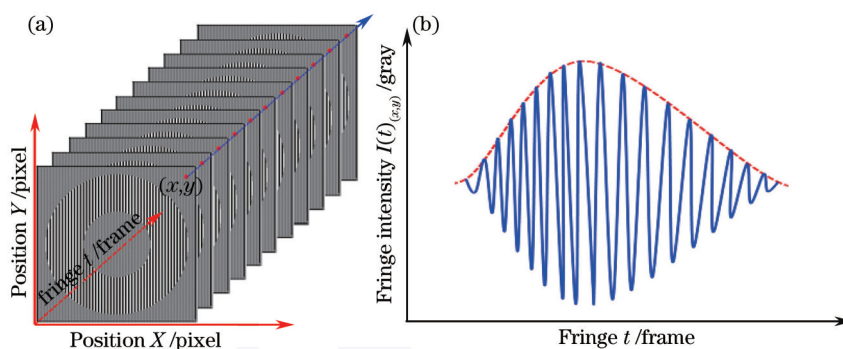


图3 (a) 扫描拍摄的图像序列; (b) 扫描图像序列同一像素点 (x,y) 灰度分布

Fig.3 (a) A series of fringe patterns captured by CCD camera; (b) gray level distribution of a definite point (x,y) in captured fringes

对于第 i 时刻, CCD 采集到的第 i 帧图像, 可以表达为

$$I(x,y,i) = \frac{R(x,y)}{M^2} [I_0(i) + C_0(x,y,i) \cos(2\pi fx + 2\pi i/N)], (i=1 \cdots T), \quad (1)$$

式中 $R(x,y)$ 为被测表面不均匀的反射率, M 为系统整体的放大率, I_0 与 C_0 分别为背景光强与投影条纹的对比度, f 为光栅的频率。

由于投影光栅同时在做 N 步相移, CCD 拍摄的图片序列中, 同一像素位置沿时间轴得到的条纹可表示为

$$I(i) = \frac{R}{M^2} [I_0(i) + C(i) \cos(\Phi_0 + 2\pi i/N)], (i=1 \cdots T), \quad (2)$$

式中 $C(i)$ 为扫描条纹由于离焦引起的沿时间轴的对比度变化。

一次扫描测量的过程, 每个像素点都可以得到类似的图3(b)条纹图, 其调制包络的最大值点即了扫描过程中, 投影光栅清晰成像的位置。通过在投影空间, 扫描测量一系列已知位置的物理平面, 建立扫描位置序号与实际物理位置的映射关系。使用该映射关系, 即可对扫描的物体, 逐点进行高度映射, 进而恢复其三维面形。

3 条纹图信号处理算法

由于结构光计量中的条纹图与传统的干涉计量中的条纹图相类似, 因此光栅像有时又被称为“干涉图”。在干涉计量中, 光波长被作为度量微观起伏的尺度, 而在结构光三维成像中与投影条纹周期有关的

“等效波长”被作为度量三维宏观面形的尺度。干涉计量和结构光计量是两个完全不同的物理过程,光波长和等效波长在数量上也存在巨大差异,但从广义的信息传递和变换观点来看,二者又存在相似性。由于本方法得到的条纹图与白光干涉计量方法中得到的干涉图样具有相似性^[17],因此,条纹图的处理可以借鉴白光干涉计量的某些算法,例如傅里叶变换算法、相移算法等。但是,由于形成条纹图的原理不同,白光干涉条纹图与提出的结构光条纹图也存在明显的差异。其差异主要体现在:1)白光干涉计量中,干涉仪与被测物是相对扫描,即像方扫描,零光程差的扫描位移量等于被测物高度,而光栅扫描是物方扫描,与被测物像方的光栅像的移动是非线性关系,需要通过标定确定;2)由于结构光条纹成像过程中受到投影系统像面弯曲的影响,与光轴垂直的被测平面上调制度分布是逐渐变化的;3)白光干涉条纹的包络线以零光程差点为中心对称分布,而这种投影结构光系统,其在像面前后的景深并不一致,且在扫描的过程中,光栅在物空间的等间隔扫描,将使像平面在像空间不等间隔扫描,最终导致调制度包络并不是像白光干涉条纹图那样是对称的,而是以调制度最大值点为中心呈不对称分布。正是这些相似性和差异性决定了条纹图处理的算法。

3.1 条纹包络线的提取

条纹包络线的提取方法之一是傅里叶变换滤波方法。对于某个像素点 (x,y) 沿时间轴得到的条纹,对其进行傅里叶变换,可得

$$G_i(f) = F[I(i)] = G_0(f) + G_{+ii}(f) + G_{-ii}(f), \quad (3)$$

式中 $G_0(f)$ 为零频分量, $G_{+ii}(f)$ 与 $G_{-ii}(f)$ 为基频分量。选择适当的滤波窗滤出基频分量并进行傅里叶逆变换和取模,可得

$$B(i) = \frac{1}{2}C_i(x,y), \quad (4)$$

式中 $C_i(x,y)$ 即为 (x,y) 像素点在扫描 i 时刻的调制度。根据(4)式,可以得到图 3(b)中虚线表示的调制度分布。

另一种条纹包络线的提取方法是相移算法^[18-19]。该方法在平移台连续运动过程中同时实现相移,由于平移台无法实现理论上的任意步长位移,难于实现严格的满周期相移,因此采用任意等步相移算法求调制度,如 5 步 Stoilov 算法:

$$\Phi_i = \arctan \left\{ \frac{2(I_{i-1} - I_{i+1})}{2I_i - I_{i-2} - I_{i+2}} \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{I_{i-2} - I_{i+2}}{2(I_{i-1} - I_{i+1})} \right]^2} \right\}, \quad (5)$$

其对应的调制度计算公式为

$$M_i = \sqrt{\left\{ 2(I_{i-1} - I_{i+1}) \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{I_{i-2} - I_{i+2}}{2(I_{i-1} - I_{i+1})} \right]^2} \right\}^2 + (2I_i - I_{i-2} - I_{i+2})^2}, \quad (6)$$

式中 I_i 表示第 i 帧相移图像。

3.2 确定调制度最大值的位置

提取调制度包络最大值的算法主要有:极大值法、二次曲线拟合算法、重心法等。

1) 极大值法:对于求得的调制度包络,直接取其最大值点。

2) 二次拟合算法:对于得到的调制度包络数据 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3 \dots m$, 用二次多项式函数 $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ 拟合,求出拟合函数与数据序列的均方误差, $Q(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^m [p(x) - y_i]^2$, 由多元函数 Q 的极小值条件

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1x_i + a_2x_i - y_i) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1x_i + a_2x_i - y_i)x_i = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1x_i + a_2x_i - y_i)x_i^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

得到拟合系数 a_0, a_1, a_2 , 再对二次函数求导得到最大值的亚像素位置。

3) 重心法: 重心法就是寻找信号重心, 以这个重心作为调制度最大值点。重心法的计算公式为:

$$P = \left[\sum_{i=1}^N I(i) \right] \cdot i / \left[\sum_{i=1}^N I(i) \right]. \quad (8)$$

4 调制度计算及系统标定

4.1 条纹包络线的提取

实验得到的某一像素点的条纹图如图 4(a) 所示, 使用傅里叶变换滤波得到的调制度包络如图 4(b) 中的红色线所示, 使用相移方法求取的调制度包络如图 4(b) 中的绿色线所示。

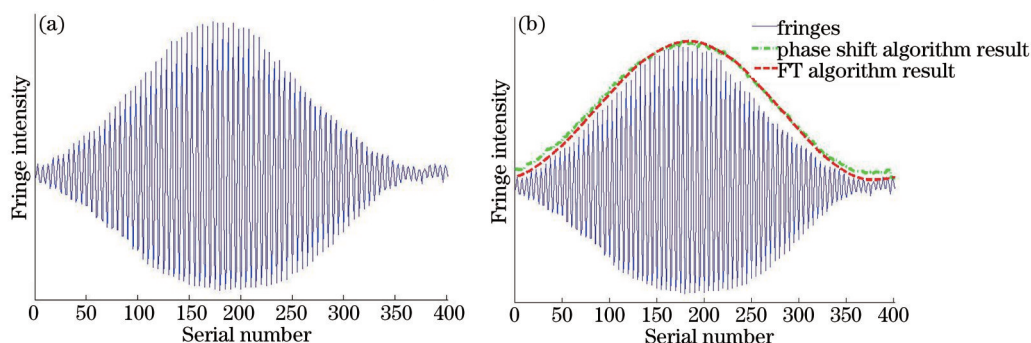


图 4 提取调制度包络算法对比。(a) 条纹图; (b) 条纹包络图

Fig.4 Algorithm comparison for modulation extraction. (a) Fringe image; (b) fringe envelope

由图 4 可以看出, 傅里叶变换滤波的方法, 能有效将噪声滤掉, 调制度包络较光滑; 而相移方法, 因受噪声及条纹非线性的影响, 其调制度包络有起伏。

当扫描到靠近测量范围边缘的位置时, 条纹的不对称情形更为明显, 两种方法提取调制度包络的情况分别如图 5(a) 与图 5(b) 所示。

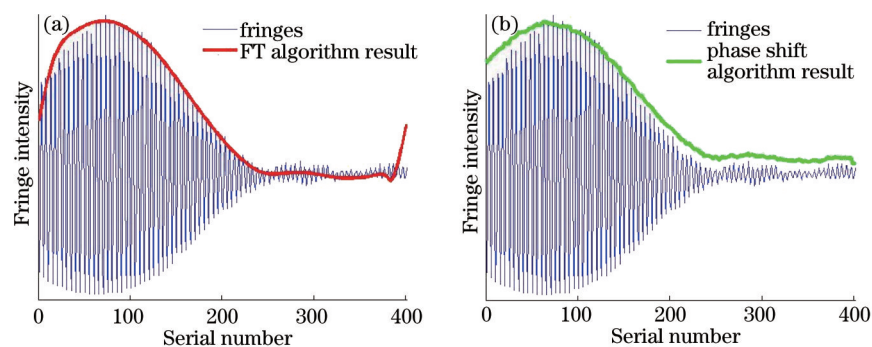


图 5 测量范围边缘位置提取调制度包络算法对比。(a) 傅里叶算法; (b) 相移算法

Fig.5 Comparison for modulation extraction algorithm at edge position of measurement range. (a) FT algorithm; (b) phase shift algorithm

图 5 中可以看到, 傅里叶变换滤波的方法求得的调制度包络的边缘部分, 因离散傅里叶变换的周期延拓性, 已经不能准确反映条纹的包络。相移算法求得的调制度包络相比于傅里叶变换方法, 在边缘位置更能准确反映原始条纹振幅变换的情况, 但其获取的整个调制度包络均受到噪声影响。

4.2 调制度最大值位置的确定

注意到这种结构光条纹的包络线以调制度最大值点为中心呈不对称分布。因此, 二次曲线拟合算法, 重心法得到的拟合曲线中心与调制度最大值点的真实位置存在明显差异, 但由于计算结果来自于较多数据点, 稳定性较好。极大值法确定的调制度最大值位置较之二次曲线拟合算法和重心法确定的位置更接近最大值的真实位置, 但由于极大值法受噪声和对信号的采样频率影响较大, 稳定性较差。

使用各算法计算调制度包络线的最大值位置的情况如下所示:

1) 使用二次拟合方法, 对傅里叶变换求得的调制度包络找最大值, 如图 6(a) 和图 6(b) 所示。

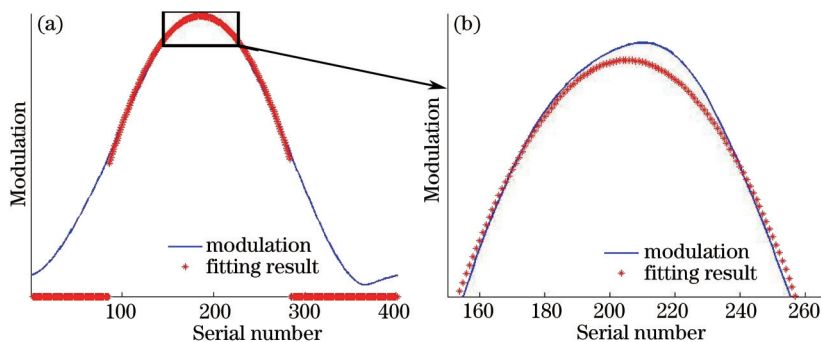


图6 (a) 傅里叶变换提取调制度和(b)二次拟合搜寻调制度最大值位置

Fig.6 (a) Modulation extraction by FT and (b) maximal modulation value searching by quadratic fit

图6中,蓝色实线为实际得到的调制度包络,红色点线为选取大于调制度幅值一半的点(有较好的信噪比)进行二次拟合得到的曲线,可以看出其在峰值处存在差异。计算结果显示二次拟合查找的最大值位置与实际最大值位置差3.59位置序号。

2) 使用二次拟合方法,对相移算法求得的调制度包络找最大值,如图7(a)和图7(b)所示。

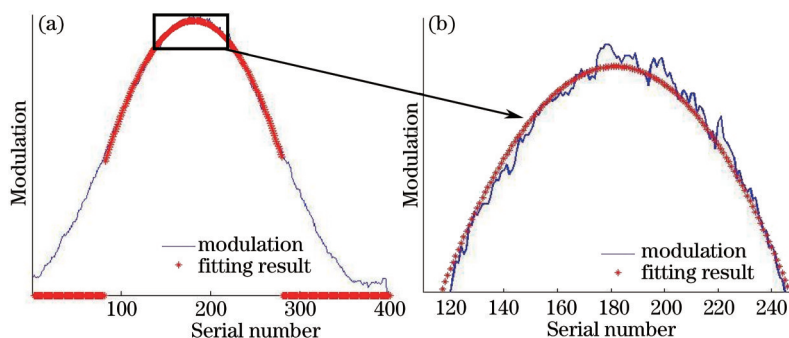


图7 (a) 相移算法提取调制度和(b)二次拟合寻调制度最大值位置

Fig.7 (a) Modulation extraction by phase shift algorithm and (b) maximal modulation value searching by quadratic fitting

图7中,蓝色实线为实际得到的调制度包络,红色点线为选取大于调制度幅值一半的点(有较好的信噪比)进行二次拟合得到的曲线,可以看出其在峰值处存在差异。计算结果显示二次拟合查找的最大值位置与实际最大值位置差2.65位置序号。

3) 使用重心法,对傅里叶变换求得的调制度包络找最大值,使用与二次拟合相同的数据点计算。计算结果显示重心法查找的最大值位置与实际位置差3.57位置序号。

4) 使用重心法,对相移求得的调制度包络找最大值,计算结果显示重心法查找的最大值位置与实际位置差2.26位置序号。

对比1)~4)结果,看似使用相移法提取的调制度包络,在确定调制度最大值位置时比傅里叶变换法准确,但从图7(b)中可以看出,调制度包络在峰值附近起伏剧烈,极大值的位置序号本身就很 inaccurate,因此,只有噪声较小,使得相移法求取的调制度包络较光滑时,才适合使用相移法。在有较大噪声影响的实际实验测量时,应使用傅里叶变换方法求取调制度包络。

从上述对比实验结果中,可看出结构光条纹的包络线以调制度最大值点为中心呈不对称分布,而白光干涉条纹的包络线以零光程差点为中心对称分布。对于这种调制度不对称分布的条纹,虽然极大值法确定的调制度最大值位置较之二次曲线拟合算法和重心法确定的位置更接近最大值的真实位置,但极大值法受噪声和对信号的采样频率影响较大,导致调制度最大值位置不稳定。图8(a)为直接将调制度最大值位置序号反映为物体高度的图示。经过二次拟合或重心法计算后,调制度最大值位置经较多数据点确定,位置将比较稳定一致,如图8(b)所示。

如前文的分析及图8所示,由于像场弯曲,在光栅扫描过程中,任一光栅位置的像场中,调制度最大值面不是一个平面,因此必须通过严格标定 CCD 探测器每一个像素建立调制度与扫描位置的关系。另外,由

于结构光条纹的包络线呈不对称分布,采用重心法或二次曲线拟合法,得到的调制度最大值点将存在偏差,该偏差也需要通过标定予以补偿,否则将影响三维重建精度。

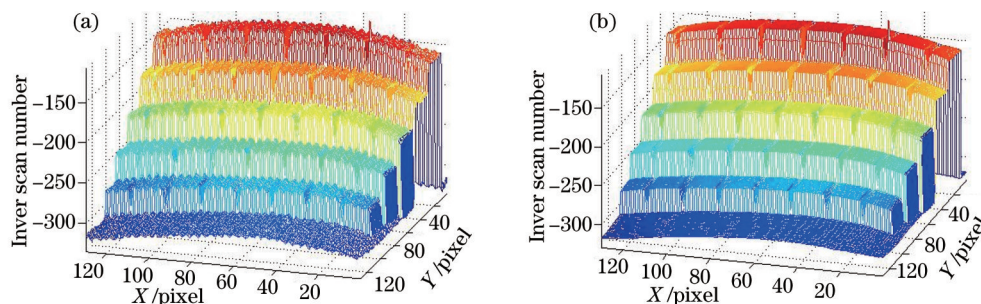


图 8 (a) 极大值算法与(b)拟合算法实验结果对比

Fig.8 Algorithm comparison for (a) maximum method and (b) fitting method

4.3 系统标定

系统标定的方法如图 9 所示,实验对 115 mm 的测量范围采用了 24 个标定平面进行标定,相邻标定面间距 5 mm。选取最远离投影系统的平面为参考平面(高度为 0 mm)。

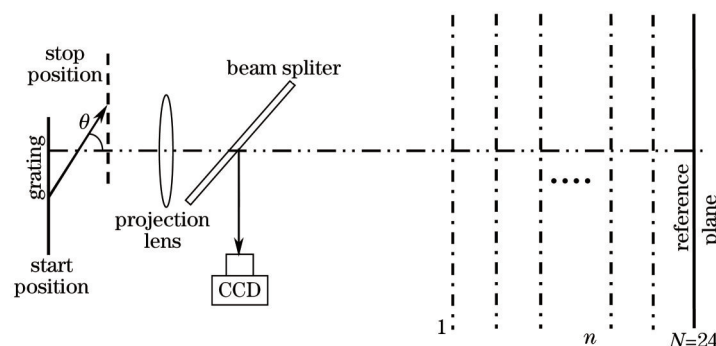


图 9 系统标定原理图

Fig.9 Diagram of system calibration

标定过程中,顺次从位置 1 到位置 24 对每一个标定平面,扫描采集 401 帧扫描相移条纹图。对于任意一个标定位置平面 n [高度 $H(n)$],由同步触发 CCD 采集的序列图像的任一位置像素点 (x, y) ,都可以找到其调制度最大的图像,该图像序号记为 $T(n)_{(max)}$ 。由此,通过二次曲线拟合,即可建立位置高度 $H(n)$ 与最大调制度序号 $T(n)_{(max)}$ 之间的映射关系查找表。该映射关系的公式可以写为

$$H(n) = a(x, y) + b(x, y)T(n)_{(max)} + c(x, y)T(n)_{(max)}^2 \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (9)$$

式中 $H(n)$ 为标定平面 n 上像素点 (x, y) 所对应的实际物理高度位置; $a(x, y), b(x, y)$ 与 $c(x, y)$ 分别为二次曲线拟合的系数; $T(n)_{(max)}$ 表示第 n 个标定平面,调制度最大值的扫描位置序号。对于图像的每一个像素点,都将计算得到其唯一的拟合系数 $a(x, y), b(x, y)$ 和 $c(x, y)$ 。得到每个像素点的 $a(x, y), b(x, y)$ 和 $c(x, y)$ 后,即完成高度映射查找表的建立。

图 10 展示了图像几个不同像素点位置上,高度位置 $H(n)$ 与 $T(n)_{(max)}$ 之间的关系。图中,星点表示实际测量得到的调制度最大值的扫描位置序号,实线表示对测量点二次拟合得到的曲线。每一个像素点都有唯一的映射曲线与其对应。由图中可以看出,同一平面不同像素点上,其调制度最大值对应的扫描位置序号不同,可见投影系统的像面弯曲影响较大,恢复物体高度时必须对每个像素点进行高度映射。

系统标定后,即可进行高度还原,实现方法为:标定后,得到 24 个标定面上的每个像素点的调制度最大值在扫描过程中的位置序号;则每个像素点可得到 24 个位置序号与对应实际物理位置的数据点对;根据这 24 对数据,使用三次拟合,拟合出调制度最大值位置序号与实际物理位置的对应函数关系,得到拟合系数。同理,扫描测量待测物体后,物体图上的每个像素点,亦可得到调制度最大值的位置序号,将此位置序号带入之前得到的拟合方程,即可得到每个点的实际物理位置,进而转换为高度。此重建高度的计算过程,下文

称为三次拟合方法。

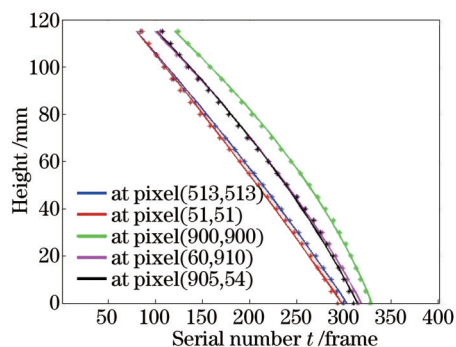


图 10 不同像素点调制度最大值位置序号与高度对应关系

Fig.10 Relationship between maximal modulation values and height values at different pixels

5 测量结果与比较

实际的实验会受到各方面的噪声影响,如:环境光,CCD 每个像素点的响应不均,物体表面的不均匀反射率等等。选择相移法求调制度包络起伏较大,易对调制度最大值位置确定造成影响,故均选用傅里叶变换方法提取调制度包络。

5.1 检验平面测量结果

为了评估标定精度,测量一个与标定平面平行的检验平面,被测面积为 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}$,检验平面为一块 $250\text{ mm}\times 290\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的浮法玻璃,并进行了哑光处理,玻璃平面度为 $4\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 。设置检验平面位置时,使用卓立汉光 TSA-300 步进平移台,其重复定位精度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。测量时,使用重心法确定调制度最大位置,使用三次拟合还原物体高度。平面的设定高度为 52.50 mm ,测量的平均值是 52.36 mm ,标准差是 0.19 mm 。图 11 是检验平面的测量结果,图(a)是该平面三维重建图,图(b)是该平面第 64 行的误差分布图,图(c)是扫描测量过程中,各像素点调制度最大值通过该平面的扫描序号。图中可以明显看出像场弯曲对调制度分布的影响。

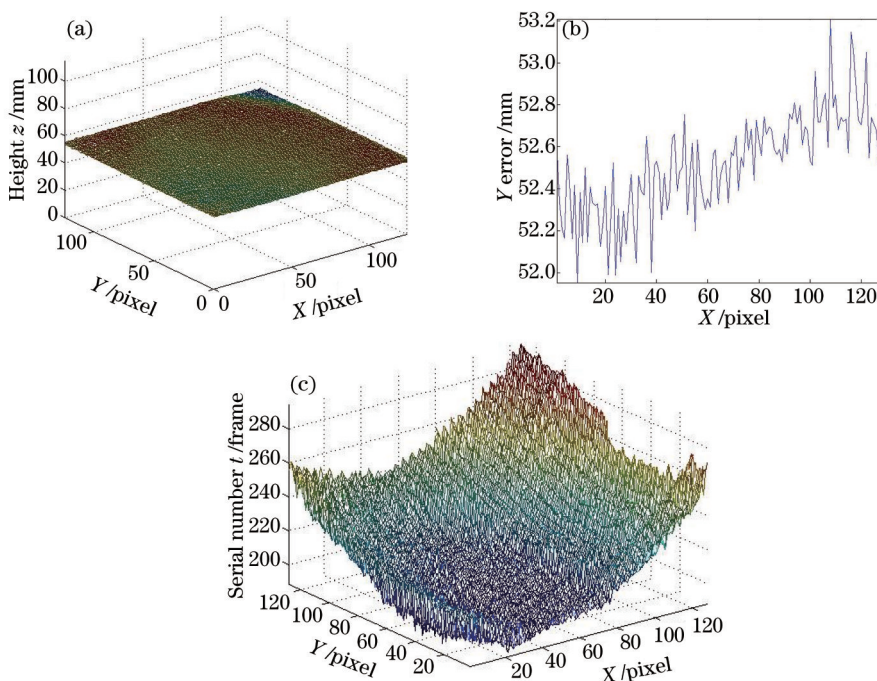


图 11 (a) 检验平面测量结果; (b) 第 64 行的误差分布结果; (c) 检验平面各点的调制度最大值序号

Fig.11 (a) Measurement result of testing plane; (b) error distribution of the 64th row;
(c) maximal modulation distribution of testing plane

5.2 陡变物体测量结果对比

为进一步验证该方法,测量了一个实际的台阶标准件物体,如图 12(a)所示,测量过程中的一幅物体条纹图如图 12 (b) 所示。物体由 5 级台阶组成,总高 100 mm,每个台阶高 20 mm。由于在实际测量中,存在噪声的影响,本次测量中,使用傅里叶变换方法提取条纹调制度包络。在寻找调制度包络最大值时,分别使用二次拟合法与重心法。图 12(c)恢复的物体三维轮廓的调制度最大值确定方法为二次拟合法,图 12(d)恢复的物体三维轮廓的调制度最大值确定方法为重心法。

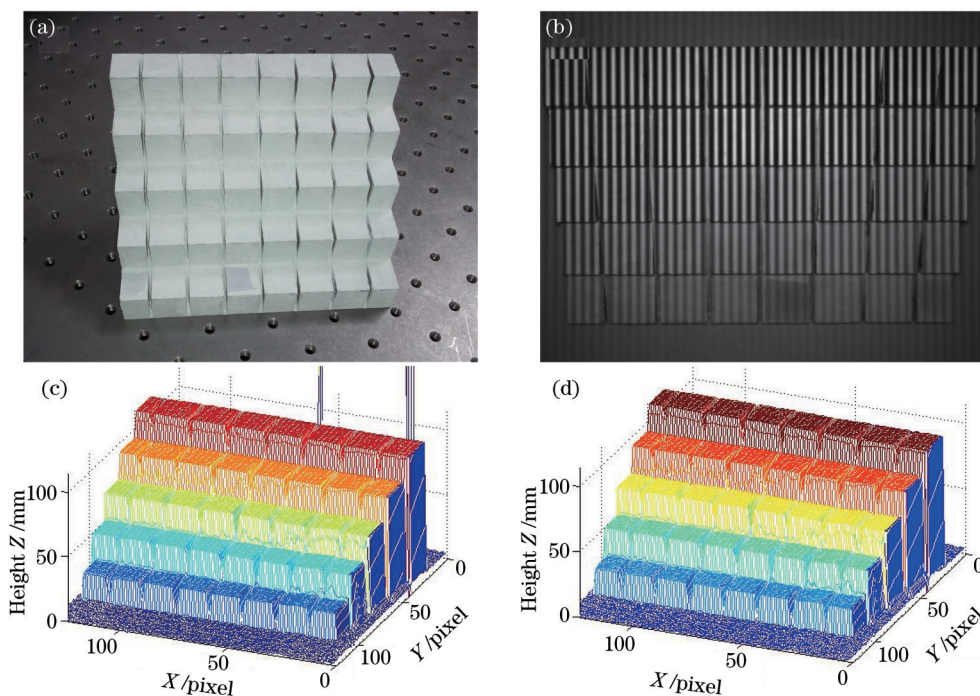


图 12 (a) 待测物体图; (b) 测量过程中的物体条纹图; (c) 二次拟合法提取的物体三维形貌;
(d) 重心法提取的物体三维形貌

Fig.12 (a) Object to be measured; (b) fringe pattern during measuring process; (c) 3D shape reconstructed by quadratic fit method;
(d) 3D shape reconstructed by gravity algorithm

从图 12(c)与图 12(d)可以看出,两种方法均实现对陡变物体的三维形貌重建。通过对比图 12(c)与图 12 (d)可以看出,标定后能够排除像面弯曲,及调制度包络经二次拟合后最大值位置有偏差等问题,得到平整面形及准确的高度值。由此可见本方法中系统标定的必要性。

对比图 12(c)与图 12(d)还可以看出,二次拟合法恢复的物体存在飞点。正如第四部分所述,当扫描到靠近测量范围的位置时,条纹的不对称情形更为明显,此时使用二次拟合得到的调制度最大值扫描位置序号将会有较大偏差,导致恢复物体高度出错。相比于二次拟合法,重心法计算简单,稳定可靠,其恢复的物体,没有明显的飞点。

图 13 以灰度形式显示了图 12(d)恢复物体的高度。对恢复的物体,每个台阶任意取一个平面区域 stage 1—stage 5,分别将其均值与底面区域的均值相减,得到每一级台阶的实际高度。各台阶的测量高度及高度区域的标准差如表 1 所示。从表 1 可以看出,各台阶高度的测量值均达到了与检验平面相当的测量精度。

表 1 各台阶高度及标准差

Table 1 Measured height of each stage and standard deviation

	Measured height /mm	Standard deviation/mm
Stage 1	20.11	0.22
Stage 2	39.99	0.15
Stage 3	59.89	0.14
Stage 4	79.95	0.13
Stage 5	100.10	0.12

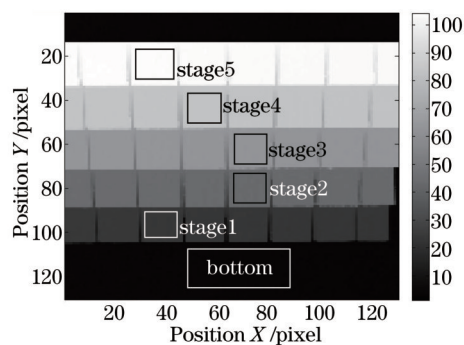


图13 灰度形式显示恢复物体高度

Fig.13 Object height display in form of gray level

6 结 论

对一种连续相移和垂直扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法进行了研究,详细分析了这种类型的结构光扫描条纹的特点,对比了这种结构光条纹图与白光干涉条纹图的相似性和不同点,据此提出了两种调制度包络提取方法,三种调制度包络最大值确定方法及物体高度三维重建算法,分析并比较了几种算法的结果。分析了像场弯曲和调制度分布不对称对测量精度的影响,提出了消除这种影响的系统标定的方法。实验表明:经过系统标定后,采用适当的三维面形重建算法,可以在垂直测量的模式下实现较高精度的测量。

参 考 文 献

- 1 Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Adv Opt Photon*, 2011, 3(2): 128-160.
- 2 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- 3 Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt Eng*, 2000, 39(1): 10-22.
- 4 Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- 5 Liu Yuankun, Evelyn O, Yang Zheng, *et al.*. A one-dimensional phase-shift technique based on dual-frequency crossed fringe for phase measuring deflectometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0308005.
刘元坤, Evelyn O, 杨 征, 等. 基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308005.
- 6 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- 7 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: A review[J]. *Optics and Laser in Engineer*, 2001, 35(5): 263-284.
- 8 Zhang Wangping, Lü Xiaoxu, Liu Shengde, *et al.*. Generalized phase-shifting phase retrieval approach based on time-domain Fourier transform[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0908004.
张望平, 吕晓旭, 刘胜德, 等. 基于时域傅里叶变换的广义相移相位恢复方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0908004.
- 9 Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(6): 533-536.
张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维面形分区测量数据的拼接研究[J]. *中国激光*, 2001, 28(6): 533-536.
- 10 Takeda M, Aoki T, Miyamoto Y, *et al.*. Absolute three-dimensional shape measurements using coaxial and coimage plane optical systems and Fourier fringe analysis for focus detection[J]. *Opt Eng*, 2000, 39(1): 61-68.
- 11 Yoshizawa T, Shinoda T, Otani Y. Uni-axis rangefinder using contrast detection of a projected pattern[C]. *SPIE*, 2001, 4190: 115-122.
- 12 Likun Su, Xianyu Su, Wansong Li, *et al.*. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(7): 1153-1158.
- 13 Yunfu Dou, Xianyu Su. A flexible 3D profilometry based on fringe contrast analysis[J]. *Opt Laser Technol*, 2012, 44(4): 844-849.
- 14 Dou Yunfu, Su Xianyu, Chen Yanfei. A fast modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1858-1862.

- 窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制度测量轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1858-1862.
- 15 Shao Shuangyun, Xu Nan. Optical three-dimensional profilometry based on modulation ratio[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 435-438.
邵双运, 徐楠. 基于调制度比的光学三维测量轮廓术[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 435-438.
- 16 Min Zhong, Xianyu Su, Wenjing Chen, *et al.*. Modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning [J]. Opt Express, 2014, 22(26): 31620-31634.
- 17 Malacara D. Optical Shop Testing[M]. Beijing: China Mechine Press, 2012.
马拉卡拉. 光学车间检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- 18 Stoilov G, Dragostinov T. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step[J]. Opt Laser Eng, 1997, 28(1): 61-69.
- 19 Hibino K, Larkin K G, Oreb B F, *et al.*. Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(4): 761-768.

栏目编辑: 何卓铭