

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205374

非静态物体的光栅图像投影 3D 测量方法^{*}

张中华^{1,2} 杨延西^{1,3}

(1. 西安理工大学自动化学院 西安 710048; 2. 安康学院电子与信息工程学院 安康 725000;
3. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室 西安 710048)

摘 要:针对传统相移法不能直接应用于非静态物体三维(3D)形貌测量的问题,本文提出了 Morlet 小波辅助的改进相移法测量方法。首先,利用复 Morlet 小波脊线提取采集条纹图像的相位,估算图像帧之间的相位变化量,并根据帧间相位变化量来修正相移法的计算模型。然后,利用修正的计算模型,提取采集光栅图像的相位,并重建出非静态被测体的 3D 形貌。在对视场范围内的非静态被测体,本文方法测量的均方根误差为 0.0816 mm,分别是传统相移法和单帧投影法的 16.92%、44.42%,在对比方法中误差最小。测量结果表明,本文方法拓展了相移法适用的范围,能够更准确测量非静态被测体的 3D 形貌。

关键词:非静态物体测量;三维形貌;相移法;小波

中图分类号:TH74;TN98 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.20

3D measurement method using grating image projection for non-static object

Zhang Shenhua^{1,2} Yang Yanxi^{1,3}

(1. School of Automation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Ankang University, Ankang 725000, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Complex system Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China)

Abstract:To deal with the problem that the traditional phase-shifting (PS) method cannot be used to measure the three-dimension (3D) shape for a non-static object, a grating image projection-based method which combines the improved PS method with the Morlet wavelets is proposed. First, the phase of grating image is extracted by the Morlet complex wavelet ridge, the phase variation between image frames is estimated, and the calculation model of the phase-shifting method is modified according to the phase variation. Finally, the phase of the captured grating image is extracted using the modified calculation model, and the 3D shape of the non-static object is reconstructed. The root-mean-square (RMS) error of the proposed method is 0.081 6 millimeter for a non-static measurement object in the field of view. The RMS error of the proposed method is 16.92% and 44.42% of the PS method and the single frame projection method, respectively, and is the smallest among the comparison methods. According to the measurement result, the proposed method expands the application scope of the PS method, and can measure the 3D shape for a non-static object accurately.

Keywords:non-static object; three-dimension measurement; phase-shifting method; the wavelet

0 引 言

采用光栅图像投影的物体三维(three-dimension, 3D)形貌测量技术^[1-5]在逆向工程和工业检测等领域具

有重要的应用价值。3D 形貌测量系统通常包括一个工业投影仪、一个工业相机和一台计算机。将光栅条纹图像序列通过工业投影仪投影至被测体表面,同时由相机同步采集经过被测体轮廓调制的变形光栅条纹。再经过相移法^[6-7]和相位展开方法^[8],即可获取被测体的相位信

收稿日期: 2022-04-12 Received Date: 2022-04-12

^{*} 基金项目:国家重点研发计划网络协调制造与智能工厂重点专项(2018YFB1703000)、陕西省 2020 年重点研发计划(2020ZDLGR07-06)、安康学院应急管理专项(2020AYYJ01)项目资助

息,最后由相位-高度标定^[9]转换,就能够测量出被测体的 3D 形貌信息。然而,利用相移法进行相位提取计算的前提条件是,在投影光栅条纹的过程中,被测体必须保持静止^[10]。这一限制条件约束了相移法不能够直接应用于非静态物体的 3D 形貌测量,导致基于相移法的光栅图像投影测量技术不能在某些测量场景中得到应用,例如生产线上的玻璃缺陷检测、机器人控制^[11]等。

为了解决这一测量难题,降低工业投影仪的投影图像数量和提高投影速度是两类主要的处理思路。在降低投影数量方面,四川大学 Wu 等^[12]通过压缩投影格雷码图案的数量,重建了牛顿摆撞击过程中的形貌变化。此外,基于单帧投影的测量方法也被众多研究者提出。这类方法只需要投影一帧光栅条纹图像至被测体表面,采集到该变形光栅图像后,直接计算出其相位信息,然后就可以重建被测体的 3D 轮廓。例如管文洁等投影并采集一帧动态液膜条纹图像后,对其进行二维傅里叶变换,利用汉宁窗来提取基频分量,再对基频分量求相位操作,提取动态液膜条纹的相位,由相位-高度标定,重建出了液膜的形貌^[13]。张明照等^[14]选用 Morlet 复小波,对条纹图像进行连续变化后,根据小波脊线来提取相位信息。此外,利用 S 变换轮廓术^[15-16],对一帧采集的光栅条纹图像进行 S 变换^[17]后,当系数模值取得最大值时(S 脊线),即可计算出图像的相位,并完成 3D 形貌的测量。因为仅需一帧图像即可完成 3D 测量,所以这类方法无需考虑被测体在测量过程中姿态和位置的变化,在动态测量上拥有优势。在提高投影速度方面,南京理工大学 Zuo 等^[18]采用每秒投影频率高达 10 000 Hz 的投影设备,使光栅投影在极短的时间内完成,较好的规避了被测体的运动位移对测量结果的影响,此外,利用二进制条纹高焦投影^[19-20]也能够提高投影速度,实现高速测量。

虽然单帧投影方法只需利用一幅光栅图像即可完成测量,规避了被测体的运动状态对测量的影响,但是基于单帧投影方法的不足之处是测量结果易受噪声或环境因素干扰。由于相移法在相位计算精度和抗噪性能上具有更大的优势,而单帧投影测量法的测量效率更高,所以,将相移法和单帧投影法优势进行结合的混合测量方法既能够进行动态物体测量,又具有更好的抗噪性能。基于此,本文提出了一种新的动态物体测量方法,该方法使用小波脊辅助改进的相移法模型,实现动态物体的测量。首先,向动态的被测体投影光栅条纹图像序列并由相机同步采集。然后,利用 Morlet 复小波脊线来计算采集条纹图像的相位,估算出图像帧之间的相位变化量,并根据相位变化量修正相移法的计算模型。最后,利用修正的计算模型,完成采集光栅图像相位的提取。根据相位-高度转换关系标定出的系统参数,重建出动态被测体的 3D 形貌。仿真和测试结果表明了本文所提方法的有效性。

1 相位计算模型

以常用的四步相移法为例,在被测体静止状态下,依次由测量系统中的工业投影仪投影四帧光栅条纹图像,本文将相机同步采集的第 1 帧光栅图像称为起始图像,将采集到的第 2~4 帧中的某一帧光栅图像称为当前图像。则测量系统中的工业相机同步采集的条纹图像可以表示为:

$$F_i(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos[\phi(u, v) - \Delta\phi_i] \quad (1)$$

其中, (u, v) 表示相机平面的坐标, $A(u, v)$ 和 $B(u, v)$ 分别表示背景分量和调制度, $\phi(u, v)$ 表示待提取的相位,其受到被测体的轮廓调制, $i = 1, \dots, N$ 表示相移步数, $\Delta\phi_i$ 表示当前图像与起始图像之间的相移步长量,是一个已知量,其值可以表示为:

$$\Delta\phi_i = \frac{(i-1)}{N} 2\pi \quad (2)$$

若定义:

$$\begin{cases} B_1(u, v) = B(u, v) \cos[\phi(u, v)] \\ B_2(u, v) = B(u, v) \sin[\phi(u, v)] \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)展开,并将式(3)代入,可以得到:

$$F_i(u, v) = A(u, v) + B_1(u, v) \cos(\Delta\phi_i) + B_2(u, v) \sin(\Delta\phi_i) \quad (4)$$

假设令符号 $\mathbf{V} = [A(u, v), B_1(u, v), B_2(u, v)]^T$, 并且 $\mathbf{F} = [F_1(u, v), \dots, F_i(u, v)]^T$, 其中上标 T 表示转置操作,若定义:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\Delta\phi_1) & \sin(\Delta\phi_1) \\ 1 & \cos(\Delta\phi_2) & \sin(\Delta\phi_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\Delta\phi_i) & \sin(\Delta\phi_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

则根据文献[8]的分析,在静态测量条件下,可得:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{F} \quad (6)$$

式中:上标-1 表示对矩阵求逆。

由此,可以获得被测体的待求取的相位信息为:

$$\phi = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N F_i \sin(\Delta\phi_i)}{\sum_{i=1}^N F_i \cos(\Delta\phi_i)} \right) \quad (7)$$

如果被测对象处于非静止状态且运动量较小时,可以认为式(1)中的背景分量 $A(u, v)$ 不变而调制度 $B(u, v)$ 发生了变化,根据式(3)的定义, $B_1(u, v)$ 和 $B_2(u, v)$ 的值也将发生改变,此时,若利用式(5)~(7)所表示的传统相移法计算模型求取相位时,获取的相位量 ϕ 也会发生变化。本文将这种因被测体处于非静止态而导致 ϕ 发生的相位改变量用 ε_i 表示。由于 ε_i 的存在,使得相位

量的计算结果发生错误,从而导致3D形貌测量发生较大误差。

图1表示在投影多帧光栅条纹图像进行测量的过程中,被测体位于不同的位置。当 $t=0$ 时刻,投影仪开始向被测体投影,在投影过程中,被测体的位置因运动而发生变换,当 $t=2$ 时刻采集到了当前图像。根据前文定义,当前与起始图像之间因运动而引起的相位变化量可以用 ε_i 表示,则当前图像与起始图像之间的帧间相差可以表示为:

$$\Delta\alpha_i = \Delta\phi_i + \varepsilon_i, i \in [1, N] \quad (8)$$

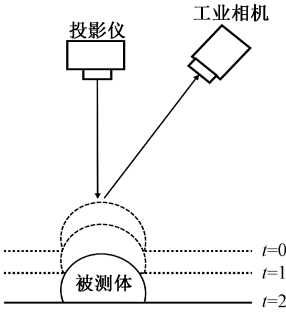


图1 非静态测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram for non-static measurement

需要指出的是,当 $i=1$ 时,表示当前光栅图像是起始帧,故 $\Delta\phi_1 = 0, \varepsilon_1 = 0$ 。假若能够检测出 $\Delta\alpha_i$,非静态下采集的条纹图像可以写成:

$$\begin{aligned} F'_i(x, y) &= A(u, v) + B(u, v) \cos[\phi(x, y) + \Delta\alpha_i] = \\ &= A(u, v) + B_1(u, v) \cos(\Delta\alpha_i) + B_2(u, v) \sin(\Delta\alpha_i) = \\ &= \mathbf{M}_a [A(u, v) \quad B_1(u, v) \quad B_2(u, v)]^T \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中矩阵 $\mathbf{M}_a$ 表示为:

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\Delta\alpha_1) & \sin(\Delta\alpha_1) \\ 1 & \cos(\Delta\alpha_2) & \sin(\Delta\alpha_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\Delta\alpha_i) & \sin(\Delta\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

令 $\mathbf{P} = [A(u, v) \quad B_1(u, v) \quad B_2(u, v)]^T$,并且假设 $\mathbf{Q} = [F'_1 \quad F'_2 \quad \dots \quad F'_N]^T$,此时式(9)的最小二乘解可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* &= (\mathbf{M}_a^T \mathbf{M}_a)^{-1} (\mathbf{M}_a^T \mathbf{Q}) = \\ &= \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F'_i \quad \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N F'_i \cos(\Delta\alpha_i) \quad \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N F'_i \sin(\Delta\alpha_i) \right]^T \end{aligned} \quad (11)$$

由此即可求解出非静止态下被测体的相位,表示为:

$$\phi = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N F'_i \sin(\Delta\alpha_i)}{\sum_{i=1}^N F'_i \cos(\Delta\alpha_i)} \right) \quad (12)$$

将式(12)中的相位展开后,再根据系统标定出的参

数^[10],即可测量出3D形貌数据。由式(7)和(12)可以看出,经过改进后,静态测量属于一种特例情形下,即 $\varepsilon_i = 0$ 时的非静态测量。

2 帧间相位差估算

根据前述的讨论,首先需要检测出被测体位置变化引起的相位变化量 ε_i ,进而计算出 $\Delta\alpha_i$,再利用式(12)计算出相位。然而在测量中获取 ε_i 的值较为困难。由于Morlet复小波在相位提取方面已经取得了较好地效果^[14,21],基于此考虑,本文先对采集的每帧光栅图像提取其相位,然后间接估算出 $\Delta\alpha_i$ 。

图2表示在投影过程中采集的图像帧,若 F'_i 表示任选的当前帧, F'_1 表示起始帧,则它们的复小波变换系数分别可以表示为:

$$m_i = \text{Mor}[F'_i] \quad (13)$$

以及:

$$m_1 = \text{Mor}[F'_1] \quad (14)$$

式中: $\text{Mor}[\cdot]$ 表示Morlet复小波变换。

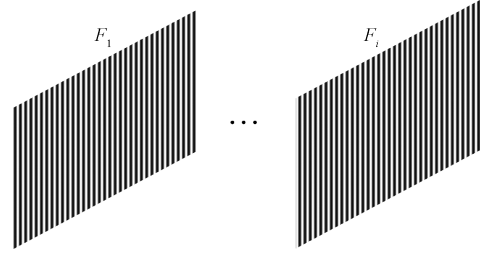


图2 模拟采集到的光栅条纹图像

Fig. 2 The simulated grating images

令 R 和 r 分别表示复系数 m_i 和 m_1 模值极大的极大值,则当前帧和起始帧的相位可以分别表示为:

$$\phi_i = \arctan \left(\frac{\text{imag}(m_i)}{\text{real}(m_i)} \right) \Big|_{\sqrt{\text{imag}(m_i)^2 + \text{real}(m_i)^2} = R} \quad (15)$$

$$\phi_1 = \arctan \left(\frac{\text{imag}(m_1)}{\text{real}(m_1)} \right) \Big|_{\sqrt{\text{imag}(m_1)^2 + \text{real}(m_1)^2} = r} \quad (16)$$

式中: $\text{imag}(\cdot)$ 及 $\text{real}(\cdot)$ 分别表示取虚部和取实部运算。

令 λ_i 表示非静态测量时的帧间相位差,且:

$$\lambda_i = \phi_i - \phi_1 \quad (17)$$

在进行噪声滤波处理^[22]后,可以分析出相差 λ_i 主要由两部分因素引起,第1部分是步进相位 $\Delta\phi_i$ 引起,第2部分是由初始帧到当前帧时间段内被测体的位置变化所引起。需要指出的是,虽然相位差 $\Delta\alpha_i$ 和 λ_i 均是由步进相位和被测体的运动量引起,但是 λ_i 表示包裹相位量,而式(8)中的 $\Delta\alpha_i$ 为绝对相位量,故 $\lambda_i \neq \Delta\alpha_i$ 。然而,当 ε_i 的值较小,可以认为式(18)和(19)近似成立:

$$\sin(\lambda_i) = \sin(\Delta\alpha_i)$$

(18)

以及:

$$\cos(\Delta\alpha_i) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(\Delta\alpha_i)} = \pm \sqrt{1 - \sin^2(\lambda_i)}$$

(19)

式(19)中的取值存在正负两种极性,其极性的选取将影响提取相位的结果,对其正负极性的分析如下。

假设 $\varepsilon_i > 0 (i > 1)$, 对于余弦函数, ε_i 在相移步长位置上会引起取值符号的变化。图 3 以四步相移法为例, 当相移步长 $\Delta\phi_i$ 等于 $\frac{\pi}{2}$ 和 $\frac{3}{2}\pi$ 时, ε_i 会引起余弦值的极性发生改变。在 $\frac{\pi}{2}$ 位置处极性由正变负, 而在 $\frac{3}{2}\pi$ 处由负变正, 在 π 位置时取负值。同理, 采用其他相移步长时 $\cos(\Delta\alpha_i)$ 的正负极性选取如表 1 所示。

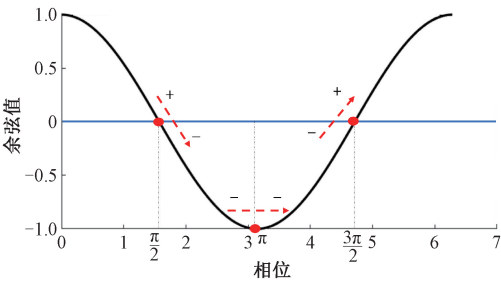


图 3 ε_i 对 $\cos(\Delta\alpha_i)$ 取值极性的影响

Fig. 3 The influence of ε_i on the polarity of $\cos(\Delta\alpha_i)$

表 1 $\cos(\Delta\alpha_i)$ 在不同相位区间的极性

Table 1 The polarity of $\cos(\Delta\alpha_i)$ at different intervals

相移步长量区间	取值极性
$\Delta\phi_i \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$	取正
$\Delta\phi_i = \frac{\pi}{2}$	取负
$\Delta\phi_i \in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)$	取负
$\Delta\phi_i = \frac{3\pi}{2}$	取正
$\Delta\phi_i \in \left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right)$	取正

需要指出的是,在现有研究中,一般取静止状态时十六步或二十步相移法的测量结果作为参考测量真值,所以理论上 $3 \leq N \leq 20$ 。当相移数 $N = 20$ 时,相移步长为 $\frac{\pi}{10}$, 在 ε_i 较小的前提下 ($\varepsilon_i < \frac{\pi}{10}$), ε_i 的变化不会对表 1 中的余弦函数极性的选取带来变化。

根据式(18)和(19),就间接实现了 $\Delta\alpha_i$ 的估算。将式(18)、(19)代入式(12),即可求出 $B_1(u, v)$ 和 $B_2(u, v)$, 进而获得非静止状态下的包裹相位信息,再利用空

域相位展开方法^[8],即可得到被测体的绝对相位。

3 仿真实验

为了验证所提方法的有效性,本对所提方法进行了仿真测试。如图 4 所示为仿真山脉的 3D 相位轮廓图像,其函数表达式可以表示为:

$$Z = \frac{3}{10}(1-x)^2 e^{-x^2-(y+1)^2} - \left(\frac{1}{5}x - x^3 - y^5\right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{30}e^{-(x+1)^2-y^2}$$

(20)

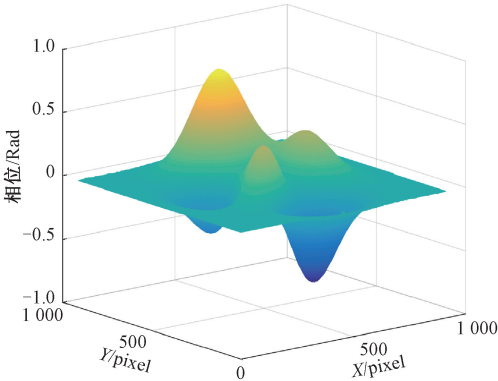


图 4 仿真山脉

Fig. 4 simulated mountain

仿真实验中,针对运动引起的不同 ε_i , 运用传统相移法、单帧投影法和本文方法的山脉轮廓恢复效果如图 5 所示。需要说明的时,本文方法应用的前提是低速运动情况下引起较小的相位变化量,因此仿真实验中 ε_i 的值设置较小。图 5(a)~(c)表示 $\varepsilon_i = 0.05$ rad 时,传统相移法、单帧投影法和本文方法的仿真误差分布图。图 5(d)~(f)表示 $\varepsilon_i = 0.15$ rad 时,传统相移法、单帧投影法和本文方法的误差分布图。由图中的各种对比方法的误差分布结果可知,随着 ε_i 的增大,由相移法计算出的相位误差也快速增大。由于仿真条件下不考虑噪声的影响,基于单帧投影的方法取得了更好的效果,由于只需一帧图像即可计算出相位信息,对比图 5(b)和(e)可以看出, ε_i 的增大基本未对误差产生影响。由图 5(c)和(f)可以看出,本文方法也较好地克服了 ε_i 增大带来的影响。

为了量化对比各种方法的表现,定义均方根 (root-mean-square, RMS) 误差为:

$$\text{RMS} = \frac{\sum_{u=1}^K \sum_{v=1}^Q \sqrt{(p(u, v) - p_0(u, v))^2}}{KQ}$$

(21)

式中: $p(u, v)$ 和 $p_0(u, v)$ 分别表示测量值和参考真值, K 和 Q 分别表示像素的行号和列号。

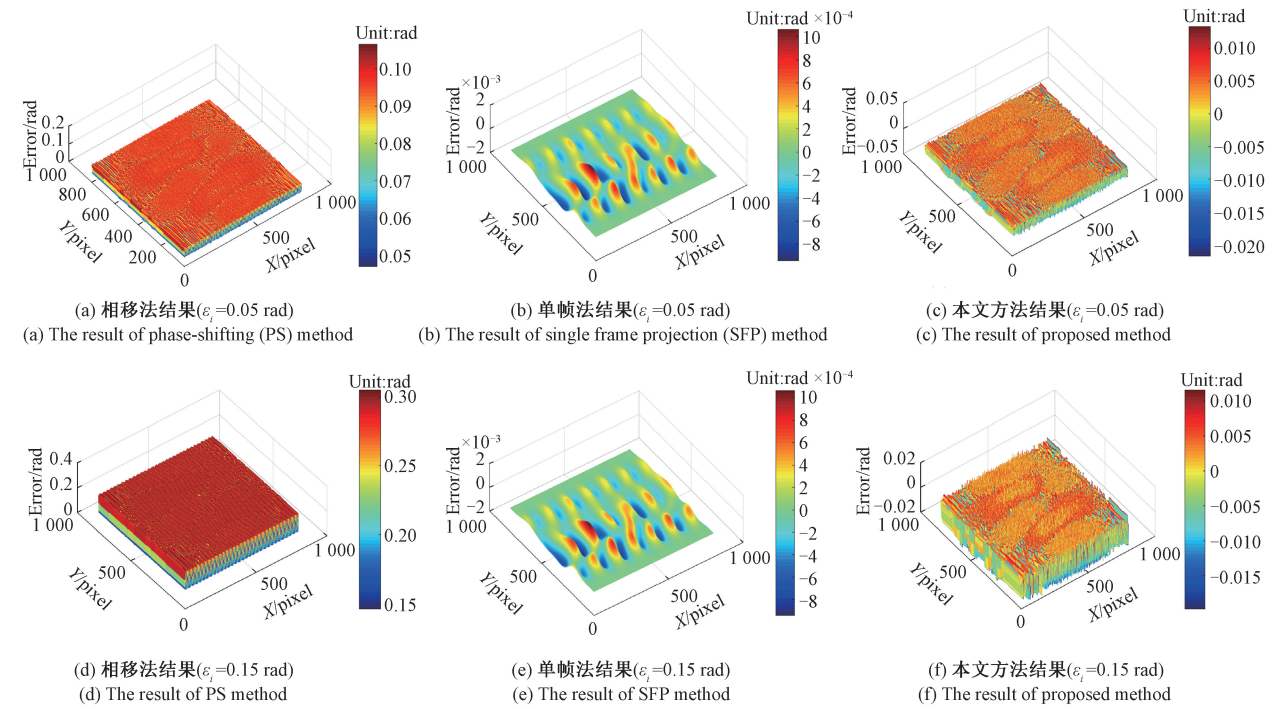


图 5 测量误差分布
Fig. 5 Measurement errors distribution

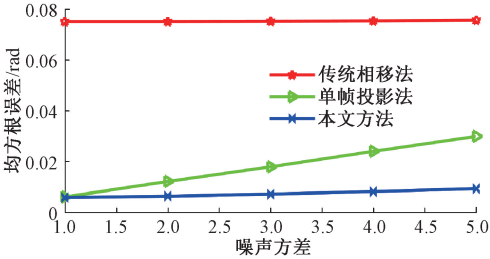
根据式(21)的定义,图 5 中不同方法重建出来的相位轮廓 RMS 误差如表 2 所示。由表 2 中数据可知,在不考虑噪声影响条件下,采用本文方法和单帧投影方法重建的 RMS 相位误差明显小于传统相移法,并且 RMS 误差在 ε_i 发生变化时基本保持稳定,表明采用本文所提方法对非静态物体的相位进行计算是可行和有效的。

表 2 均方根误差

Table 2 Result of RMS error (rad)			
ε_i	相移法	单帧投影法	本文方法
0.05	0.075 0	0.000 2	0.005 1
0.15	0.225 1	0.000 2	0.005 4

为了评估本文方法和对比方法对噪声的抗干扰能力,在不同噪声水平和 $\varepsilon = 0.05$ 的仿真条件下,比较了 3 种方法重建相位的 RMS 误差,其误差曲线如图 6 所示。由图 6 的曲线可以看出,本文方法和传统相移法在噪声发生变化时,误差曲线基本保持稳定,表明具有较好的抗干扰能力。而基于单帧投影的方法易受噪声的影响,但噪声方差增大时,相位误差也显著上升,表明该方法对噪声的抗干扰能力较弱。

综合图 5、6 和表 1 的数据可以看出,本文所提方法既能够高精度的计算出非静态被测体的相位信息,又能够有效地抑制噪声的干扰,兼具相移法和单帧投影法的优势。



4 实验验证

在搭建的测量平台上,对本文方法进行了实验测试。测试平台如图 7 所示,它主要包括投影仪(德州仪器 DLP4500)、工业相机(MV-AA1300)和背景板组成。在测试之前,借助精密平移台,将背景板移动至 4 个不同位置,利用文献[2]所述方法完成系统参数标定。

图 8 为投影光栅条纹图像过程中,相机采集到的处于缓慢无规则移动状态的被测模型图像,相机距离背景板大约为 475 mm。任意选取相邻两帧,被测对象在相机平面的垂直方向和水平方向分别移动了大约 7 和 9 pixels。采用传统相移法、单帧投影方法和本文方法对被测模型进行测量后,测试结果如图 9 所示。



图 7 测量平台
Fig. 7 The measurement platform

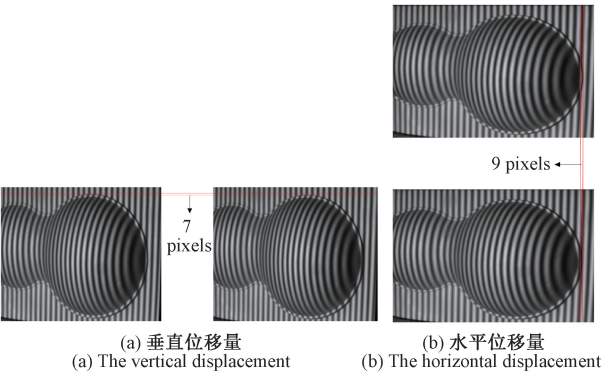


图 8 被测模型
Fig. 8 The measurement model

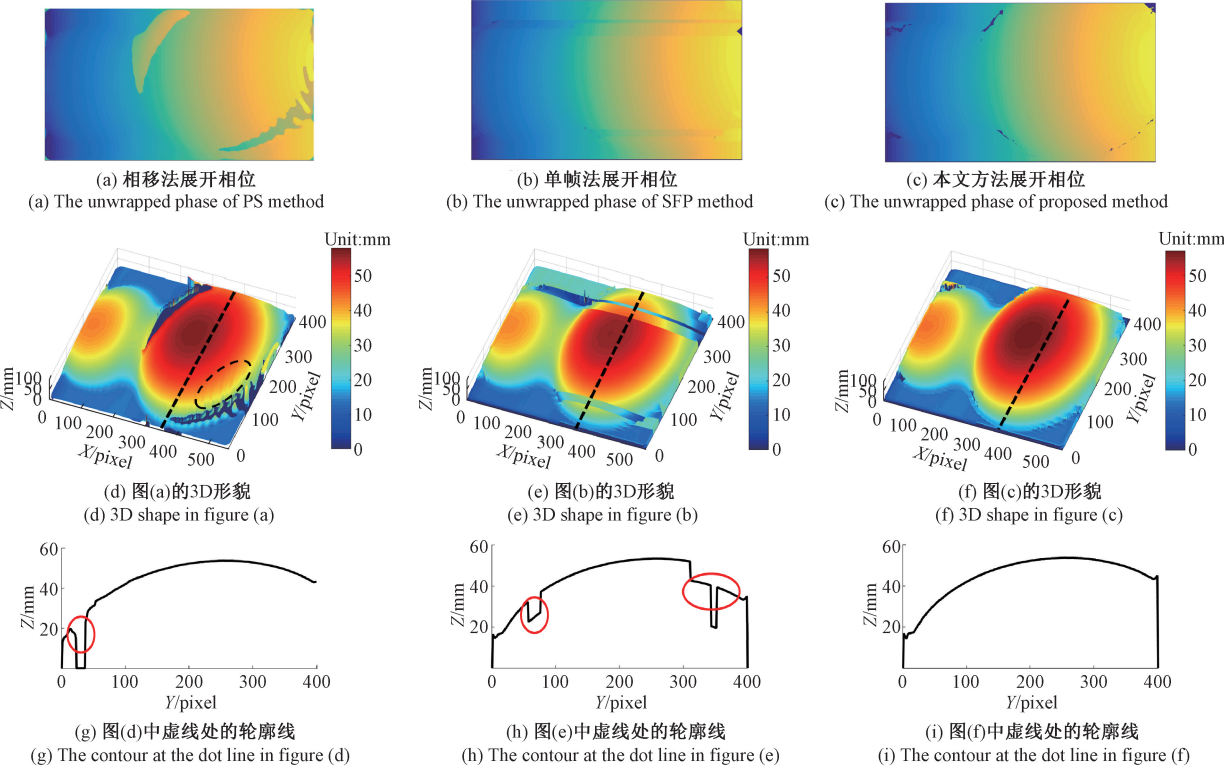


图 9 测量结果对比
Fig. 9 Comparison of measurement results

观察图 9(a) 可知采用传统相移方法获取的相位,在模型的边缘区域发生了明显的错误,经过相位-高度标定后,由图 9(d) 可以看出,测量出来的 3D 形貌发生了明显的断裂,并且在椭圆形虚线标注的区域,重建出的轮廓曲面凹凸而不光滑。基于单帧投影方法获取的相位如图 9(b) 所示,相位发生了明显的“拉丝”现象,经过标定后,在“拉丝”区域重建的 3D 形貌也发生错误。相比较而言,本文方法获取的相位图更加平滑,从重建的 3D 形貌轮廓看(图 9(f)),本文方法测量出来的 3D 形貌轮廓更加完整。

分别在图 9(d) ~ (f) 中的虚线位置处选择 401 个点,其组成的轮廓曲线分别对应于图 9(g) ~ (i)。在图 9(g) 和 (h) 中,由圆形标注的区域内,测量出的轮廓线明显发生错误,而本文方法获取的轮廓线(图 9(i))过渡自然、平滑,未发生明显的突变。

为了客观评价各种方法测量效果,利用 RMS 误差作为评价指标,借鉴现有研究^[23] 的处理方法,本文也以被测体在静止状态时的 3D 测试结果为参考真值,求出图 9(d) ~ (f) 中像素坐标 $(u, v) \in [10 : 510, 100 : 220]$ 区域内的误差分布图,如图 10 所示,图中颜色表示误差的大小。

为了量化比较误差,对图 10 所表示的各种方法误差求 RMS,计算结果如表 3 所示。由表 3 中的数据可知,在测量视场范围内,本文方法的误差是 0.081 6 mm,分别是

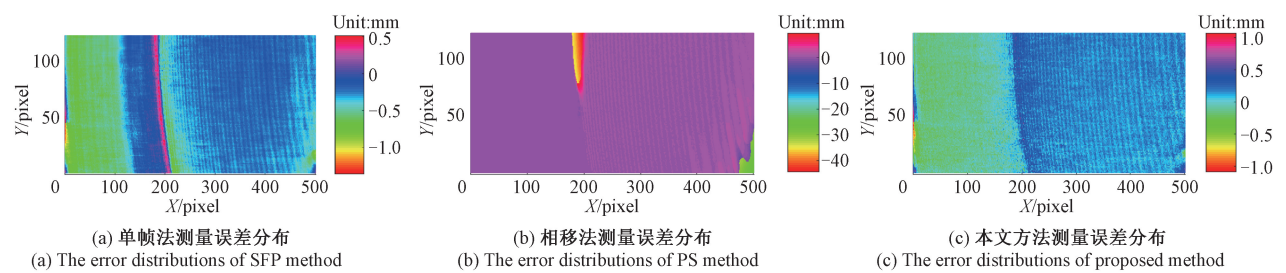


图 10 误差分布颜色图
Fig. 10 Color-coded map of error distributions

传统相移法和单帧投影法的 16.92%、44.42%。实验结果表明,本文方法的误差值最小,表现优于对比方法。

表 3 测量的均方根误差

Table 3 The RMS error of measurement (mm)			
测量方法	相移法	单帧投影法	本文方法
rms	0.482 4	0.183 7	0.081 6

为了验证本文方法对于非静态物体形貌测量的适用

范围,利用图 8 中的平移台对图 11(a)所示的测量模型进行了移动,并采用本文方法计算出了相位分布信息。选择图 11(a)中虚线框所示的区域,在不同移动速度时获得相位信息的分布情况如图 11(b)~(e)所示。由图中可以看出,当移动速度为 4 mm/s 时,相位图开始出现错误,当移动速度为 5 mm/s 时发生了较大的错误,此时无法完成形貌测量。因此,当被测体在 1 s 内的位置发生 5 mm 的改变,本文方法难以取得好的测量效果。

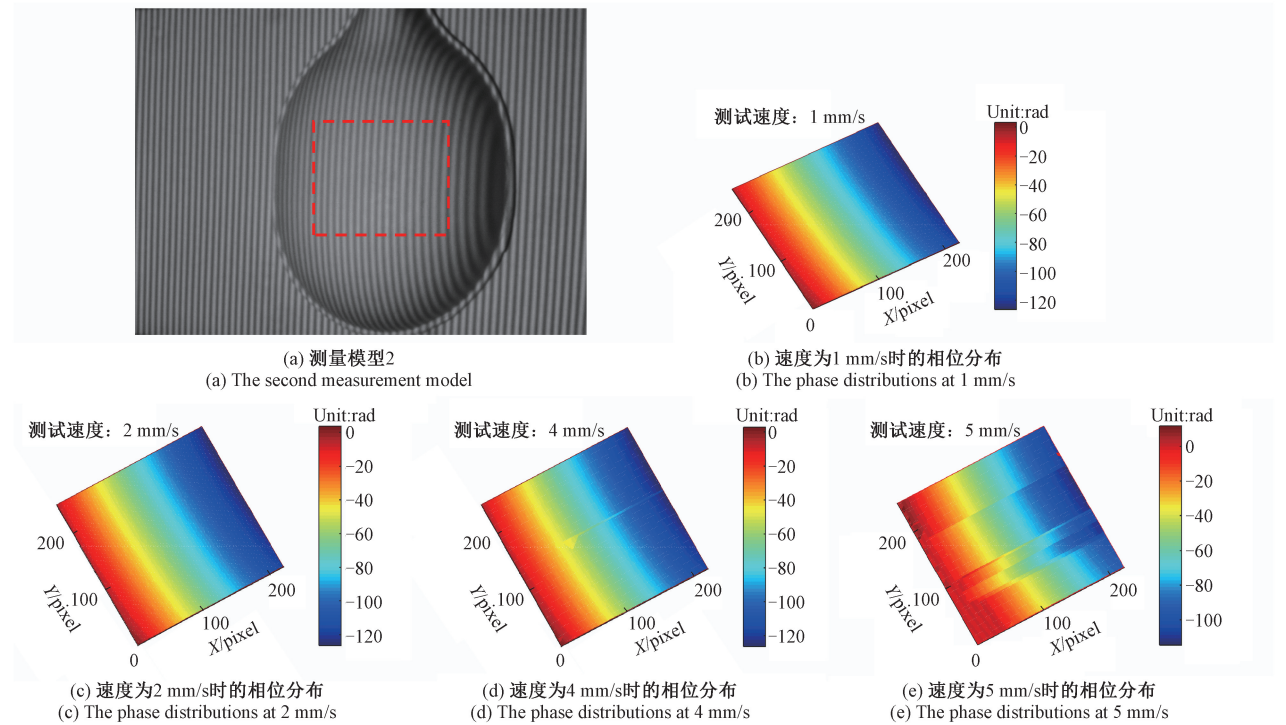


图 11 不同测量速度时获得的相位分布
Fig. 11 The obtained phase distributions under different measurement velocity

5 结 论

本文提出了一种针对动态物体的 3D 形貌测量方法。首先,本文对传统的相移法相位计算模型进行了修正,并

将修正的模型扩展到动态物体的相位计算。其次,本文引入了 Morlet 复小波,来检测采集的两帧光栅条纹图像之间因被测体位置变化而导致的相位差,最后,根据检测结果和修正后的模型,计算出动态被测体的相位。由相位-高度标定后,即可测量出被测体的 3D 形貌。本文对

所提方法进行了仿真测试,测试结果表明,本文对计算模型的修正是有效的。在不同噪声水平下的仿真测试也表明,本文方法具有更好的抗噪性能。在搭建的测试平台上对不同测量方法进行了测试,实验结果表明,在视场范围内,本文方法的 RMS 误差为 0.081 6 mm,和对比方法相比,本文方法测量的误差值最小,进一步表明了所提方法的有效性。

在测试过程中发现,若被测量物体运动速度达到 5 mm/s,本文方法的测量结果会发生较大的错误,如何进一步拓宽本方法的测量范围,是下一步需要继续努力的方向。

参考文献

- [1] 白雪飞,张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量[J]. 仪器仪表学报,2017,38(8):1912-1925.
BAI X F, ZHANG Z H. 3D shape measurement based on color fringe projection techniques[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(8):1912-1925.
- [2] ZHANG S, YANG Y, SHI W. 3D shape measurement method for high-reflection surface based on fringe projection [J]. Applied Optics, 2021, 60 (34): 10555-10563.
- [3] 邓吉,李健,封皓,等. 编码条纹投影技术的阶次校正算法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):250-258.
DENG J, LI J, FENG H, et al. Fringe order correction algorithm for code-based fringe projection profilometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 250-258.
- [4] 李茂月,马康盛,王飞,等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(8):55-66.
LI M Y, MA K SH, WANG F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud based on structured light on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 55-66.
- [5] 李云梦,关丽敏,王会峰,等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(7):66-73.
LI Y M, GUAN L M, WANG H F, et al. Three-dimensional detection system of rotating scanning structured light and its calibration [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7):66-73.
- [6] PEARS N, LIU Y, BUNTING P. 3D Imaging, Analysis and Application [M]. Springer, 2012.
- [7] LIU X R, TAO T Y, WAN Y Y, et al. Real-time motion-induced-error compensation in 3D surface-shape measurement [J]. Optics Express, 2019, 27 (18): 25265-25279.
- [8] WANG J H, YANG Y X. Branch-cut algorithm with fast search ability for the shortest branch-cuts based on modified GA [J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(5): 473-485.
- [9] 张启灿,吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3):0303004.
ZHANG Q C, WU ZH J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3):0303004.
- [10] LU L, SURESH V, ZHENG Y, et al. Motion induced error reduction methods for phase shifting profilometry: A review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 141: 106573.
- [11] THILAKANAYAKE T, HERATH N, LIYANAGE M. Development of a stereo vision-based pick and place system for robotic manipulators [J]. Instrumentation, 2021, 8(2):1-13.
- [12] WU Z, ZUO C, GUO W, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light [J]. Optics Express, 2019, 27(2):1283-1297.
- [13] 管文洁,吴庆尉,公超,等. 基于傅里叶变换轮廓术的动态液膜测量[J]. 应用光学, 2020, 41(2):366-374.
GUAN W J, WU Q W, GONG CH, et al. Dynamic liquid film measurement with Fourier transform profilometry [J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 366-374.
- [14] 张明照,牟建华,刘杨,等. 应用复 Morlet 小波变换分析分析条纹图相位[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 643-650.
ZHANG M ZH, MOU J H, LIU Y, et al. Phase extraction for fringe patterns based on complex Morlet wavelet transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 643-650.
- [15] ZHONG M, CHEN F, XIAO CH. A frequency-based window width optimized two-dimensional S-transform profilometry [J]. Optics Communications, 2017, 402: 1-8.
- [16] 韩梦奇,陈文静. 提高二维 S 变换轮廓术测量精度的方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10):1012001.
HAN M Q, CHEN W J. Improving measurement accuracy of two-dimensional S-transform profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10):1012001.
- [17] 蒋模华,陈文静,陈志平. 基于 S 变换的解相技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(4):0412001.
JIANG M H, CHEN W J, ZHENG ZH P. Research of

- phase demodulation technique based on S-transform[J]. *Acata Optica Sinica*, 2011, 31(4):0412001.
- [18] ZUO C, TAO T, FENG S, et al. Micro Fourier transform profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102:70-91.
- [19] 曾灼环, 黄超, 屈国丽, 等. 基于二进制条纹加相位编码条纹离焦投影的三维测量方法[J]. *应用光学*, 2017, 38(5):790-797.
- ZENG ZH H, HUANG CH, QU G L, et al. 3D measurement method based on binary fringe plus phase coding fringe defocus projection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(5):790-797.
- [20] ZHU J P, ZHOU P, SU X Y, et al. Accurate and fast 3D surface measurement with temporal-spatial binary encoding structured illumination [J]. *Optics Express*, 24(25):28549-28560.
- [21] 王建华, 杨延西, 马晨. 基于价值函数的二维小波变换小波脊提取算法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(12):2915-2923.
- WANG J H, YANG Y X, MA CH. Wavelet ridge extraction algorithm using a cost function in two-dimensional wavelet transform[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(12):2915-2923.
- [22] ZHANG S, YANG Y, QIN Q, et al. Rapid blind denoising method for grating fringe images based on noise level estimation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6):8150-8160.
- [23] LU L, XI J T, YU Y G, et al. New approach to improve the accuracy of 3-D shape measurement of moving object using phase shifting profilometry [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25):30610-30622.

作者简介



张申华 (通信作者), 2010 年于西北大学获得硕士学位, 现为安康学院讲师、西安理工大学博士研究生, 主要研究方向为三维测量。
E-mail: zhang_shenhua@126.com



Zhang Shenhua (Corresponding author) received his M. Sc. degree in 2010 from Northwestern University. Now he is a lecture in Ankang University and a Ph. D. candidate in Xi'an University of Technology. His main research interest includes 3D measurement.

杨延西, 2003 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂系统控制、机器视觉和智能机器人。
E-mail: yangyanxi@xaut.edu.cn

Yang Yanxi received his Ph. D. degree in 2003 from Xi'an university of Technology. Now he is a professor and doctoral supervisor in Xi'an University of Technology. His main research interests include complex system control, machine vision and intelligent robot.