

文章编号 1004-924X(2016)增-0657-08

基于三波长相移轮廓术的相位展开算法

丁明君^{1,2}, 习江涛^{1,2,3}, 李光旭^{1,2*}, 宋丽梅⁴

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

2. 天津市光检测技术与系统重点实验室, 天津 300387;

3. 伍伦贡大学 电气、计算机与通信工程学院, 新南威尔士州 澳大利亚 2522;

4. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387)

摘要:针对多波长相移轮廓术方法测量速度慢、测量范围局限的问题,本文提出了三波长相移轮廓术测量方法,实现了对表面有阶跃变化的彩色三维物体的测量。介绍了三波长相移轮廓术的等效波长和包裹相位的正问题。然后,从等效波长的相位求解入手,进而推导出三个独立光波的相位展开方程。通过分析相位噪声产生的原因,提出了基于展开相位的相位去噪方法。实验结果表明:该方法的平均测量精度为 0.018 mm,普通台式机处理耗时 0.308 s。通过比较测量精度、测量速度、算法稳定性以及适应光源的范围等,证明了所提方法比目前常用的格雷码法和多波长相移轮廓术更优越。

关键词:相移轮廓术;多波长;相位展开

中图分类号:TP391.44 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0657

Phase unwrapping algorithm based on three-wavelength phase shift profilometry

DING Ming-jun¹, XI Jiang-tao^{1,2}, LI Guang-xu¹, SONG Li-mei³

(1. School of Electronics and Information Engineering,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and system,
Tianjin 300387, China;

3. School of Electrical, Computer and Telecommunication Engineering,
University of Wollongong, New South Wales 2522, Australia;

4. School of Electrical Engineering and Automation,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

* Corresponding author, E-mail: liguangxu@tjpu.edu.cn

Abstract: Aiming at problems of low measurement speed and limited measurement range for method of multi-wavelength phase shift profilometry, a three-wavelength phase shift profilometry was presented to realize the measurement of color three-dimensional object with step change on surface. Direct problem of equivalent wavelength and wrapped phase of three-wavelength phase shift profilometry was introduced. Then, starting with the phase solution of the equivalent wavelength, and therefore phase

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60808020);天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(No. 14JCYBJC42300)

unwrapping equations of three independent light waves were deduced. By analyzing phase noise generation reasons, phase denoising method based on unwrapping phase was presented. Experimental results show that average measurement accuracy of the method is 0.018 mm; processing time of ordinary desktop computer is 0.308 s. By comparing measurement precision, measurement speed, algorithm stability, range of adaptive light source and other performances, it is proved that the proposed method is more superior to the commonly used gray code methods and multi-wavelength phase shift profilometry at present.

Key words: phase shift profilometry; multi-wavelength; phase unwrapping

1 引言

三维形貌测量技术已广泛应用于制造检验、医学、逆向工程等领域。相移轮廓术(PSP)方法由于具有高速度、高分辨率、高准确度和非接触等特性而受到广泛应用^[1]。为了得到高精度的测量结果,通常使用相同波长的多频率条纹。然而,使用单波长光源时(假设波长为 λ_1),测量物体表面的阶跃高度不能大于 $\lambda_1/4$ ^[2]。为解决这一问题,格雷码(Gray Code, GC)方法^[3]和多波长相移轮廓术(Multi-Wavelength Phase Shift Profilometry, MWPS)方法^[4]被广泛使用。与格雷码方法相比,多波长相移轮廓术方法能够测量不同光照下颜色变化的物体,因此得到更广泛的应用^[2,5-6]。

Zhang 等人提出了一种使用条纹投影技术的双波长 PSP 算法^[7]。由于等效波长 λ_{12} 是由 λ_1 和 λ_2 计算得到的,因此如果 λ_{12} 过大的话,那么噪声将比使用单一波长(λ_1 或 λ_2)PSP算法的要大。虽然误差函数可用来降低由噪声产生的误差,但当波长变化很明显的时候,将会减小短波长相位展开的准确性。此外,使用移动的投影仪可能会导致无法精确控制波长以及相移步长。多于 2 个波长的多波长 PSP 方法,用于进一步增加等效波长^[8]。Towers 提出了一种最优频率多波长选择方法^[9]。之后,他们通过仿真验证了 3D 形貌测量的最优三波长^[10]。归一化的明确测量范围随着误差的增加而减少。Towers 方法最大的局限是等效波长的噪声太大,而不能直接产生 3D 坐标,并且没有给出有效的相位展开方法以提高测量精度。Pribranic 等人提出了一种 MWPS 方法展开相关相位,并且使用不多于两张 PSP 图,进行不同物体的密集 3D 采集^[11]。每个 PSP 图使用 8 幅变换的图像。另外使用 2 幅图像作为参

考,以便于检测阴影和遮挡区域。由于双波长难以覆盖整个投影区域,一般来说,使用的波长越长,引起的相位噪声越大。Zhang 等提出了一种数字条纹投影和多波长相移方法,以扩展测量范围并增加其对表面不连续的鲁棒性^[12]。该方法中,对于 3D 相貌测量,捕获一系列波长为 $\lambda_k = (W/2^{k-1})$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)的条纹图像。 W 为投影仪水平(如果条纹为垂直的)或垂直(如果条纹为水平的)方向上的像素个数。对于使用波长为 λ_1 的条纹图像,单个条纹即可覆盖整个测量区域。因此,不需要相位展开。连续的相位图 $\varphi_k(x, y)$ 是将前一个展开相位图 $\varphi_{k-1}(x, y)$ 逐像素展开,而不访问邻域像素。然而,由于该方法使用了多组条纹图像,其测量速度低于单波长或双波长的测量方法。

目前,三波长相移轮廓术(TWPS)方法仅使用最终的等效相位 $\theta_{123}(x, y)$ 计算 3D 数据。但是,因为 $\theta_{123}(x, y)$ 的值是由原始包裹相位 $\theta_1(x, y)$, $\theta_2(x, y)$ 和 $\theta_3(x, y)$ 计算得到的,如果在 3 个原始相位中有任何噪声,则测量效果会变差。为此,本文提出一种新的相位展开算法。该方法通过 3D 测量系统捕获一系列条纹图像,通过计算原波长的等效波长来获得相位展开。同时,对于图像中的每个点,同样可以算出等效相位。本文方法不直接使用等效相位 $\theta_{123}(x, y)$ 计算 3D 数据。相位 $\theta_{123}(x, y)$ 仅用于得到 3 个原始包裹相位的展开的相位,而三维表面数据则由展开相位算出。

2 TWPS 算法简介

对于单波长 PSP 算法,一些具有某个相移的条纹图像可用于获得相位值。具有 $\pi/2$ 相移的经典 4 步 PSP 算法更加流行,因为其对于背景亮度不敏感。4 步 PSP 的亮度可以写成:

$$I_k(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \sin \left[\theta(x, y) + (k-1) \frac{\pi}{2} \right], \quad (1)$$

$$k = 1, 2, 3, 4$$

其中, $a(x, y)$ 是背景亮度; $b(x, y)$ 是亮度调制; $\theta(x, y)$ 是待展开的包裹相位。由上述 4 个公式, 包裹相位值 $\theta(x, y)$ 可以按照下式计算:

$$\theta(x, y) = \arctan \left[\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)} \right]. \quad (2)$$

式中 $\theta(x, y)$ 是范围为 $[-\pi, +\pi]$ 的包裹相位, 具有 2π 不连续。在本文实验中, 每个 $\theta(x, y)$ 加上 π 以使包裹相位范围为 $[0, 2\pi]$ 。

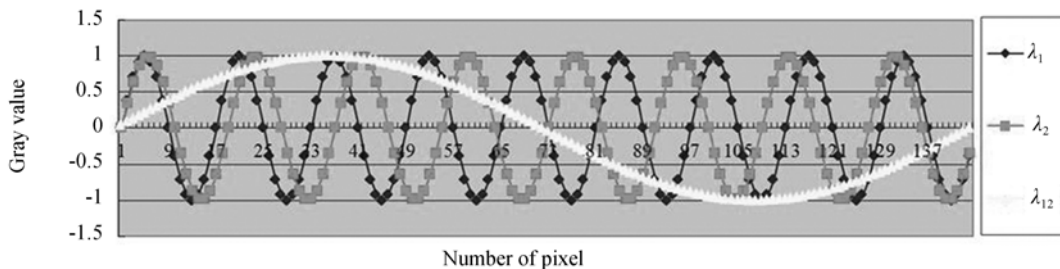
对于三波长 PSP 算法, 假定波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。 λ_1 和 λ_2 可以产生较长的等效波长 λ_{12} , λ_2 和 λ_3 可以产生较长的等效波长 λ_{23} 。等效波长 λ_{12} ,

λ_{23} 可以产生更长的等效波长 λ_{123} 。基于文献[12, 13, 15]的等效波长原理, 等效波长 $\lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{123}$ 可以由下式计算:

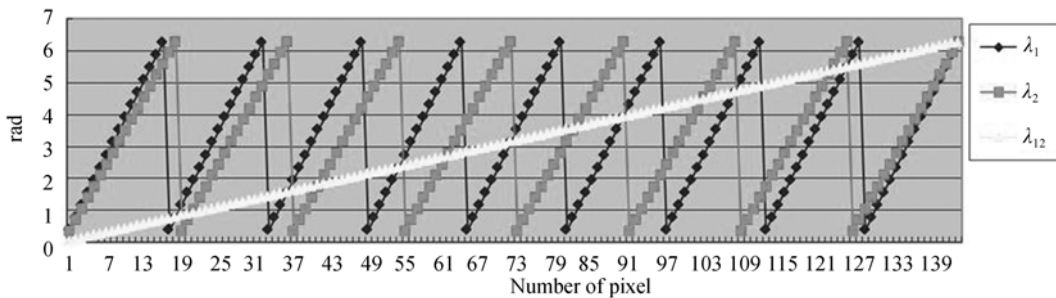
$$\lambda_{12} = \left| \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right|,$$

$$\lambda_{23} = \left| \frac{\lambda_2 \times \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_3} \right|, \lambda_{123} = \left| \frac{\lambda_{12} \times \lambda_{23}}{\lambda_{12} - \lambda_{23}} \right|. \quad (3)$$

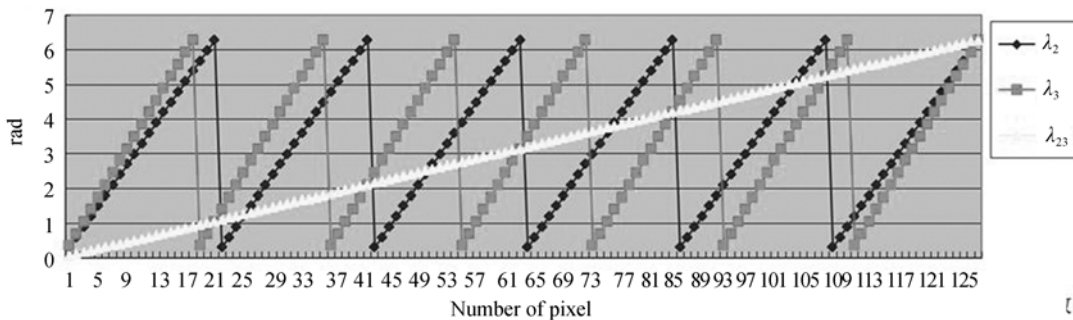
等效波长 λ_{123} 应该不小于条纹间的像素数。假设 $\lambda_1 = 16, \lambda_2 = 18, \lambda_3 = 21$ 则 $\lambda_{12} = 144, \lambda_{23} = 126, \lambda_{123} = 1\ 008$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{12}$ 的波形及包裹相位值分别如图 1(a) 和 1(b) 所示。 $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_{23}$ 的包裹相位值如图 1(c) 所示。 $\lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{123}$ 的包裹相位值如图 1(d) 所示。从图 1 可以看出, 除 λ_{123} 外, 每个包裹相位都需要通过调整相位展开算法来去除 2π 不连续。为此, 本文提出一种新的相位展开方法。



(a) 波形 λ_1, λ_2 和 λ_{12}
(a) λ_1, λ_2 and λ_{12}



(b) 相位 λ_1, λ_2 和 λ_{12}
(b) Phase of λ_1, λ_2 and λ_{12}



(c) 相位 λ_2, λ_3 和 λ_{23}
(c) Phase of λ_2, λ_3 and λ_{23}

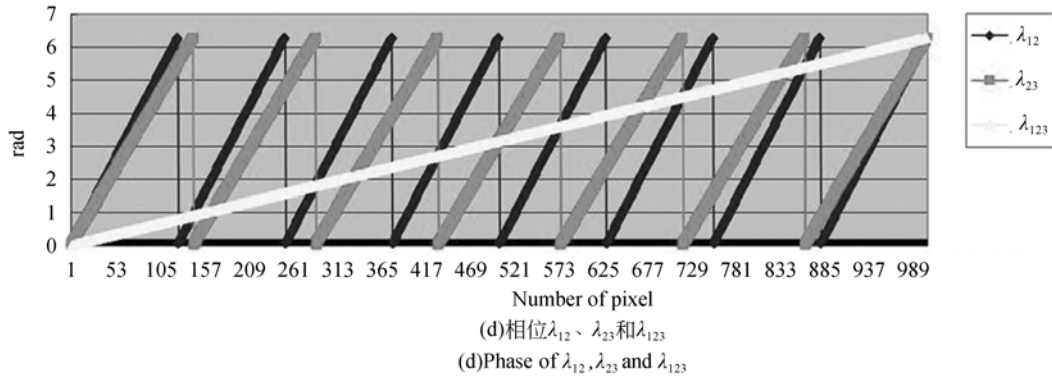


图 1 期望的亮度函数和包裹相位值

Fig. 1 Desired intensity function and wrapped phase value

3 新的基于 TWSP 的相位展开方法

通常,相位的计算是利用下式得到:

$$\theta_G(x, y) = \theta(x, y) + 2\pi m(x, y), \quad (4)$$

其中 $\theta_G(x, y)$ 是绝对展开相位, $m(x, y)$ 是整数。

由于等效波长 λ_{123} 满足条件 $\lambda_{123} \geq W$, 在整个测量区域, 相位 $\theta_{123}(x, y)$ 的范围为 $[0, 2\pi]$, 无 2π 不连续。不需要相位展开获得 $\theta_{123}(x, y)$ 的绝对相位 ($\theta_{G-123}(x, y)$), 即:

$$\theta_{G-123}(x, y) \equiv \theta_{123}(x, y). \quad (5)$$

3.1 波长 λ_{12} 和 λ_{23} 的相位展开方法

波长 λ_{12} 和 λ_{23} 的相位展开方法基于 $\theta_{123}(x, y)$ 的绝对值。在测量范围中从像素 1 到像素 1 008, 波长 λ_{123} 的相位值 $\theta_{123}(x, y)$ 是从 0 到 2π 的直线, 但对于波长 λ_{12} 有 $\lambda_{123}/\lambda_{12}$ 个 2π 不连续, 对于波长 λ_{23} 有 $\lambda_{123}/\lambda_{23}$ 个周期不连续。也就是说, 对于波长 λ_{12} , λ_{123} 的相位值可以分成 $\lambda_{123}/\lambda_{12}$ 个部分, 每个部分的长度为 $2\pi/(\lambda_{123}/\lambda_{12})$ 。对于点 (x, y) , 如果 λ_{12} 的包裹相位为 $\theta_{12}(x, y)$, 并且 λ_{123} 的相位为 $\theta_{123}(x, y)$, 则:

$$m(x, y) = \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y) \cdot \lambda_{123}}{2\pi \cdot \lambda_{12}} \right\}. \quad (6)$$

基于公式 $\theta_G(x, y) = \theta(x, y) + 2\pi m(x, y)$, λ_{12} 的绝对相位值为:

$$\theta_{G-12}(x, y) = \theta_{12}(x, y) + 2\pi \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_{123}}{\lambda_{12}} \right\} =$$

$$\theta_{12}(x, y) + 2\pi \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_{12}} \right\}, \quad (7)$$

其中, 函数 $\text{Int}()$ 代表取整运算; $\theta_{G-12}(x, y)$ 是波长 λ_{12} 的绝对展开相位; $\theta_{12}(x, y)$ 是波长 λ_{12} 的包裹相

位, 范围为 $[0, 2\pi]$ 。类似于 λ_{12} 绝对相位值的计算, λ_{23} 的绝对相位值计算如下:

$$\theta_{G-23}(x, y) =$$

$$\theta_{23}(x, y) + 2\pi \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_{23}} \right\}, \quad (8)$$

其中, $\theta_{G-23}(x, y)$ 是波长 λ_{23} 的绝对展开相位; $\theta_{23}(x, y)$ 是波长 λ_{23} 的包裹相位, 范围为 $[0, 2\pi]$ 。

为了去除 $\theta_{123}(x, y) = 2\pi$ 时的不连续, $\theta_{G-12}(x, y)$ 和 $\theta_{G-23}(x, y)$ 的相位展开公式必须修正为:

$$\theta_{G-i}(x, y) = \theta_i(x, y) + \begin{cases} 2\pi \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_i} \right\}, & \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \\ 2\pi \left\{ \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_i} \right\} - 1 \right\}, & \theta_{123}(x, y) = 2\pi \end{cases}, \quad (9)$$

其中对于 $\theta_{G-12}(x, y)$, $i=12$; 对于 $\theta_{G-23}(x, y)$, $i=23$ 。

经过校正之后可得绝对相位 $\theta_{G-23}(x, y)$ 和 $\theta_{123}(x, y)$ 。

3.2 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的相位展开方法

对于波长 λ_{12} , 有 $\lambda_{123}/\lambda_{12}$ 个 2π 不连续。对于每个波长 λ_{12} , 波长 λ_1 有 λ_{12}/λ_1 个 2π 不连续。因此, 对于波长 λ_1 总共有 $(\lambda_{123}/\lambda_{12}) \times (\lambda_{12}/\lambda_1)$ 个 2π 不连续。波长 λ_1 的绝对相位可以计算为:

$$\theta_{G-1}(x, y) =$$

$$\theta_1(x, y) + 2\pi \times \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_{12}} \right\} \times \frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} + 2\pi \times \text{Int} \left\{ \frac{\theta_{12}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \right\}, \quad (10)$$

$\theta_{G-1}(x, y)$ 和 $\theta_{12}(x, y)$ 如图 2(c) 所示, 其中很多点不正确, 因为如果 $\theta_1(x, y) = 2\pi$, 该点将产生不连续。为去除不连续, $\theta_{G-1}(x, y)$, $\theta_{G-2}(x, y)$ 和 $\theta_{G-3}(x, y)$ 的相位展开公式应修正为:

$$\theta_{G-i}(x, y) = \theta_i(x, y) + \begin{cases} 2\pi \left\{ \text{Int} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_j} \right] \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} + \text{Int} \left[\frac{\theta_j(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right] \right\}, \theta_i(x, y) \neq 2\pi, \\ \theta_j(x, y) \neq 2\pi, \text{ and } \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \\ 2\pi \left\{ \text{Int} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_j} \right] \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} + \text{Int} \left[\frac{\theta_j(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right] - 1 \right\}, \theta_i(x, y) \neq 2\pi \text{ or } \\ \theta_j(x, y) \neq 2\pi, \text{ and } \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \\ 2\pi \left\{ \text{Int} \left[\frac{\theta_{123}(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_{123}}{\lambda_j} - 1 \right] \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} + \text{Int} \left[\frac{\theta_j(x, y)}{2\pi} \times \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right] \right\}, \theta_i(x, y) \neq 2\pi, \\ \theta_j(x, y) \neq 2\pi, \text{ and } \theta_{123}(x, y) \neq 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

其中对于 $\theta_{G-1}(x, y), i = 1, j = 12$; 对于 $\theta_{G-3}(x, y), i = 3, j = 23$; $\theta_{G-2}(x, y)$ 值可以通过 λ_{12} 和 λ_{23} 计算得到, 因此 $i = 2, j = 12$ 或 $i = 2, j = 23$ 。经过矫正, $\theta_{G-1}(x, y)$ 和 $\theta_{12}(x, y)$ 中不连续点被移除, $\theta_{G-1}(x, y)$ 有更好的连续性。

4 相位噪声去除

为了有效消除相位噪声, 本文设计了一种基于展开相位 $\theta_{G-2}(x, y)$ 的噪声去除方法。该方法对于明显噪声点简单有效。

假设 $\theta_{G-2}(x, y)$ 是由 $\theta_{123}(x, y)$ 和 $\theta_{12}(x, y)$ 计算出的绝对相位, $\theta_{G-2-1}(x, y)$ 是由 $\theta_{123}(x, y)$ 和 $\theta_{23}(x, y)$ 计算出的绝对相位。理论上, 对于一个点两者的值应该相同。而实际上, 由于它们是由不同信号计算得到的, 因此, 它们可能不同^[13]。对于正确相位点, $\theta_{G-2}(x, y)$ 和 $\theta_{G-2-1}(x, y)$ 相同; 而对于不正确的点, 它们不同。它们的差可得到:

$$D_{G-2}(x, y) = \theta_{G-2}(x, y) - \theta_{G-2-1}(x, y), \quad (12)$$

$D_{G-2}(x, y)$ 的值如图 2 所示。如果 $D_{G-2}(x, y) = 0$ 则该点必定为噪声点。

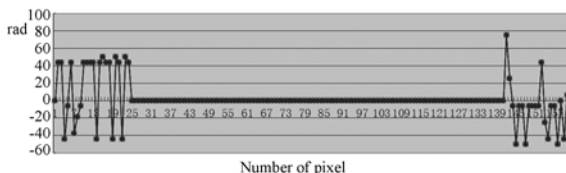


图 2 绝对相位 $\theta_{G-2}(x, y), \theta_{G-2-1}(x, y)$ 以及 $D_{G-2}(x, y)$

Fig. 2 Absolute phases $\theta_{G-2}(x, y), \theta_{G-2-1}(x, y)$ and $D_{G-2}(x, y)$

5 实验

本文使用两台 CCD 相机, 可以从不同视角获取 3D 形状。数字光处理(DLP)投影仪的分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$, 置于两台 CCD 相机的中央。CCD 相机的分辨率为 $1\,280 \text{ pixel} \times 1\,024 \text{ pixel}$ 。计算处理器采用 Deltacom 桌面平台系统

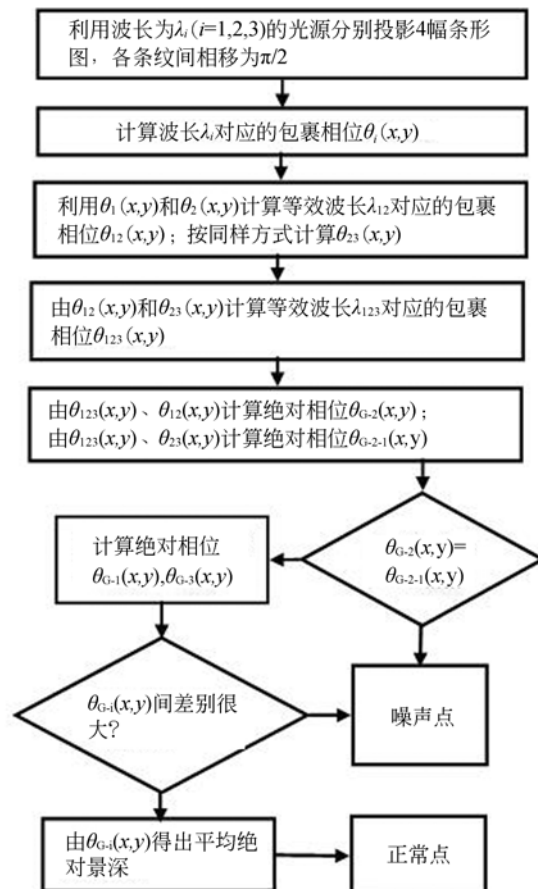


图 3 提出的 TWPSF 方法流程图

Fig. 3 Flowchart of proposal TWPSF

(Intel Q9400@2.66 GHz, 4 G 内存)。

为得到更佳的重建结果,本研究采用 4 阶条纹图像,条纹间相移为 $\pi/2$ 。即,总共用 12 幅条纹图像获得重建图像。算法流程图如图 3 所示。

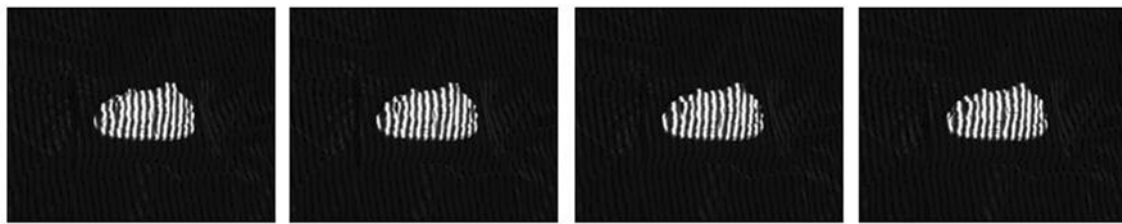
对一个放置于暗色织物上的长城模型(如图 5(a)所示)进行了测量重建。实验选取 3 个波长($\lambda_1=16, \lambda_2=18, \lambda_3=21$)获得物体投影的条纹图如图 4(a)所示。从 4 幅原始条纹图像获得的 λ_1 的相位图如图 4(b)所示。由两幅等效相位图和 3 幅原始相位图得到的等效波长 λ_{123} 的相位图如图 4(c)所示。 λ_{123} 的相位图范围为 $[0, 2\pi]$,在整个测量范围内没有 2π 不连续。使用本文提出的相位展开方法,测量结果如图 5(b)所示。

为了比较提案方法的重建精度,本文将标定板(如图 6(a)所示)放置在 10 个不同位置进行测

量。校准的目标上有 99 个圆,圆的中心经过精确加工。在本实验中,校准板由 9 行 11 列构成,总共 $90D_H$ 和 $88D_V$ 。测量结果中,假定两个相邻圆之间的标准距离为水平方向 D_H ,垂直方向 D_V ,如图 6(b)所示。测量精度表示为标准距离值与测量值之间的平均差别,由式(13)计算。

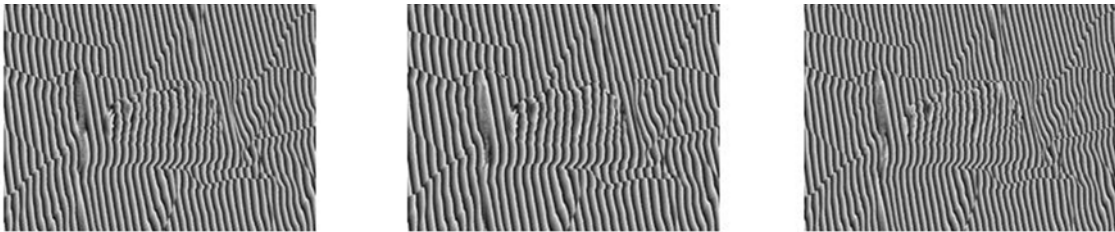
$$e = \frac{\sum_{i=1}^{90} (|x_i - D_H|/90) + \sum_{j=1}^{88} (|x_j - D_V|/88)}{2}, \quad (13)$$

其中 e 为标准值的偏差, x_i 是两个相邻圆之间水平方向上的测量值, x_j 是垂直方向。 D_H 和 D_V 分别是水平方向和垂直方向的标准值。90 和 88 分别是 D_H 和 D_V 的数量。



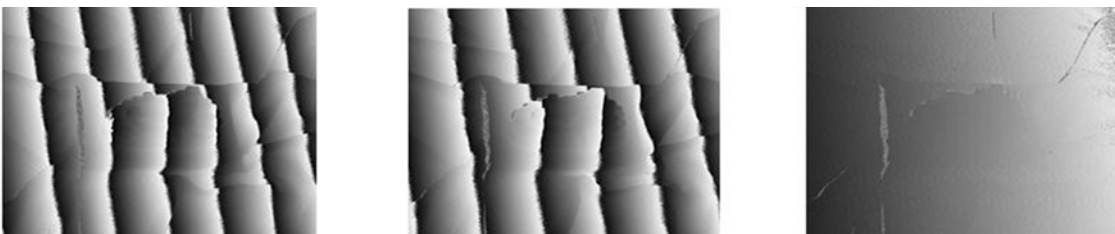
(a)在长城模型表面映射的条纹图(由左至右各图相位依次递增 $\pi/2$)

(a)Fringe images projected onto great wall model(The phases of fringe lights increases by $\pi/2$ degree)



(b)由左至右依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 对应的相位图(其中 λ_1 相位图由(a)中4个条纹图获得)

(b)Phase images corresponding to $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ in turn(The phase map of λ_1 acquired from the four fringe images in (a)above)



(c)由左至右依次为 $\lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{123}$ 的等效相位图(λ_{12} 由(b) λ_1, λ_2 获得; λ_{23} 由 λ_2, λ_3 获得; λ_{123} 由 $\lambda_{12}, \lambda_{23}$ 获得)

(c)Equivalent phase map $\lambda_{12}, \lambda_{23}$ and λ_{123} in turn(λ_{12} is acquired by λ_1 and λ_2 , is acquired by λ_2 and λ_3 , λ_{123} is acquired by λ_{12} and λ_{23})

图 4 相位图及等效相位图

Fig. 4 Phase maps and their equivalent ones

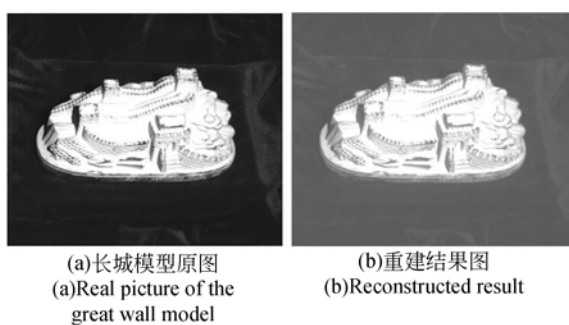


图 5 长城模型及重建结果对比图(原图中亮的长城模型被放在暗色台布上)

Fig. 5 Comparison of the great wall model and its reconstructed result

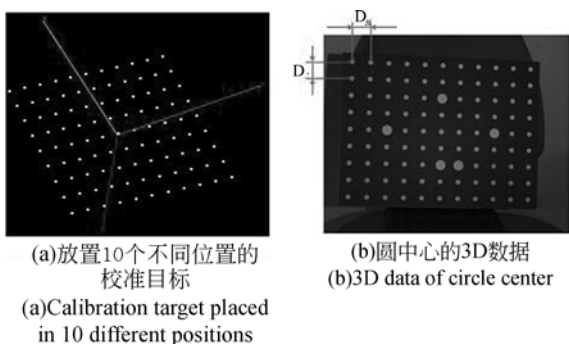


图 6 精度和速度比较的图像

Fig. 6 Precision and speed contrast images

本文利用所提方法进行测量,并与格雷码方法和多波长相移轮廓术方法进行了比较。结果列于表 1。

由表 1 可知,与 GC 相比,本文方法精度高,鲁棒性强。尽管光照变化,本文方法也不需要阈值。而对于 GC 方法,如果光照变化,阈值需要操作员手动修改,否则测量结果非常差。另外,GC 不能测量不同颜色的物体。

参考文献:

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. 3rd Edition, New York: John Wiley and Sons; 2007.
- [2] CREATH K. Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(14): 2810-2816.
- [3] HAN P Y, DA F P, GAI S Y. Color structured light technology for high-speed 3D shape measurement based on Gray Code method[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(9): 1359-64.

表 1 MWSP 方法,格雷码方法,提案方法的测量结果

Tab. 1 Measurement results by MWSP method, Gray Code method and proposed method

	MWSP	Gray Code	Proposal
e_1	0.021 3	0.031 2	0.017 6
e_2	0.023 2	0.031 9	0.017 9
e_3	0.021 5	0.031 4	0.018 1
e_4	0.022 8	0.032 1	0.018 4
e_5	0.023 2	0.032 4	0.018 3
e_6	0.022 7	0.032 7	0.017 7
e_7	0.022 4	0.033 1	0.018 1
e_8	0.023 5	0.032 9	0.018 2
e_9	0.023 1	0.031 1	0.017 8
e_{10}	0.023 3	0.031 2	0.017 9
mean/mm	0.023	0.032	0.018
speed/s	5.12	2.03	3.08

与 Zhang 提出的 MWSP 相比,本文方法精度高,速度快。假定两种方法均采用相移为 $2\pi/3$ 的相同条纹图像,即每个波长需要 3 幅条纹图像,则 Zhang 方法需要 18 幅图像,而本文方法仅需要 9 幅图像。在本文方法中所有条纹图像用于减少噪声和提高精度。

6 结 论

本文提出了一种新的基于三波长的相位轮廓术的相位展开算法。该方法需要图像数量少,精度高,能处理表面有颜色渐变的物体,速度快,稳定性高。标定板测量结果显示平均测量精度为 0.018 mm。在普通台式机操作环境下处理速度为 3.08 s。

- [4] POLHEMUS C. Two-wavelength interferometry [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(9): 2071-2074.
- [5] CHENG Y Y, WYANT J C. Two-wavelength phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(24): 4539-4543.
- [6] ONODERA R, ISHII Y. Two-wavelength interferometry that uses a Fourier-transform method[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(34): 7988-7994.
- [7] ZHANG H, CHEN W, TAN Y. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes[J]. *Applied Optics*, 1994, 33

- (20):4497-4500.
- [8] CHENG Y Y, WYANT J C. Multiple-wavelength phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 1985,24(6):804-807.
- [9] TOWERS D P, JONES J D C, TOWERS C E. Optimum frequency selection in multi-frequency interferometry[J]. *Optics Letters*, 2003,28(11):887-889.
- [10] TOWERS C E, TOWERS D P, JONES J D C. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry [J]. *Opt. Lasers in Eng.*, 2005,43(7):788-800.
- [11] PRIBANIC T, MRVOŠ S, SALVI J. Efficient multiple phase shift patterns for dense 3D acquisition in structured light scanning[J]. *Image and Vision Computing*, 2010,28(8):12-255.
- [12] ZHANG S. Digital multiple wavelength phase shifting algorithm [C]. *Conference on Optical Inspection and Metrology for Non-optics Industry*, 2009.
- [13] ZHANG S. Phase unwrapping error reduction framework for a multiple-wavelength phase-shifting algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2009,48(10):105601-1-8.

作者简介:



丁明君(1982—),男,天津人,讲师,2005年、2010年于天津工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事信号与信息处理、三维光学测量方面的研究。E-mail: dingmingjun@tjpu.edu.cn



李光旭(1983—),男,辽宁人,2006年、2009年于辽宁工业大学获得学士、硕士学位,2013年于获日本九州工业大学获得博士学位,现为天津工业大学电子与信息工程学院讲师,主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail: liguangxu@tjpu.edu.cn



习江涛(1962—),男,河南宜阳人,教授,博士生导师,1982年于北京理工大学(原北京工业学院)获得学士学位,1985年于清华大学获得硕士学位,1995年于澳大利亚伍伦贡大学获得博士学位,现为澳大利亚伍伦贡大学电气、计算机与通信工程学院院长,主要从事信号与信息处理、三维光学测量方面的研究。E-mail: jiangtao@uow.edu.au



宋丽梅(1976—),女,河北秦皇岛人,教授,1999年、2001年和2004年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事计算机视觉、三维光学测量、逆向工程和模式识别方面的研究。E-mail: lilimay1976@126.com