

doi:10.3788/gzxb20144311.1110002

采用相位半角的两步相移法

李宝顺, 蔡青青, 包亚萍, 李义丰

(南京工业大学 电子与信息工程学院, 南京 211816)

摘 要:针对经典两步相移算法对光强不均匀分布和物体不均匀反射率处理能力不强的问题,分析相移量为 90° 的情况,采用光强模型,直接对光强进行数据操作,利用三角关系,给出了求解折叠相位相位半角的计算方法,通过高度-相位差公式得到物体的三维形貌数据,避免了因归一化操作过程中取最值方法引起的误差.实验对比分析了经典四步相移法和两步移相法,表明在环境光强可以忽略不计或足够小的情况下,该方法误差范围为 ± 0.2 mm,结果优于经典两步相移法,接近于测量误差最小的四步相移法.

关键词:光学测量; 相位半角; 相移法; 折叠相位; 反射率; 光强分布分析; 三维实时测量

中图分类号: TN911.73; TP391.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1110002-6

Two-step Phase-shifting Algorithm by the Use of Half Angle of Phase

LI Bao-shun, CAI Qing-qing, BAO Ya-ping, LI Yi-feng

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The typical two-step phase-shifting algorithm cannot get rid of the problem in phase unwrapping processing, which is caused by the uneven distribution of intensity and the uneven reflectivity of objects. Aiming at the problem, a intensity formula, reflecting the reflectivity of the objects, is adopted, based on the analysis of 90° phase shift. The intensity data was operated directly. Then, according to the triangle theory, a algorithm was presented to get the half angle of wrapped phase. At last, three-dimensional shape information of the tested object was decoded, according to the relationship between height and difference of phase. This method avoids the errors caused by the method used to get the maximum or minimum value. The results of the proposed method are compared with those of the typical four-step phase-shifting algorithm and the two-step phase-shifting algorithm. When the surrounding intensity can be ignored or weak, its error is ± 0.2 mm. It is better than results of typical two-step phase-shifting algorithm, close to results of accepted low-error four-step phase-shifting algorithm.

Key words: Optical measurement; Half angle of phase; Phase shifting; Wrapped phase; Reflectivity; Intensity distribution analysis; Three-dimensional real-time measurement

OCIS Codes: 100.5088; 050.2770; 050.5080; 110.5086

0 引言

利用光学式三维物体轮廓测量技术^[1-2]进行三维测量时,精确地求解相位是光栅投影法的关键问题之一^[3].而求解相位常用的方法有傅里叶法^[4-5]和相移法^[6-8].其中相移法由于计算方法简单,并在相位求解准确度方面有突出的优势,因而得到广泛研究和应用.

利用传统相移法求解相位时,有四步和三步相移法,四步相移法具有容易消除图像固有噪音的优点,但易引入随机噪音;而三步相移法相比四步相移法,减小了图像采集耗时,但对系统非线性响应所引起的相位误差抑制性比较差^[9].再加上这类方法至少需要三幅相移光栅条纹图像^[10],增加了硬件负担^[11]和时间消耗.在此基础,研究人员提出了两步相移法^[12-13],但由于两步

基金项目:国家自然科学基金(No. 11104142)资助

第一作者:李宝顺(1974-),男,讲师,博士,主要研究方向为图像处理、三维建模、机器人视觉等. Email: baoshunleo@163.com

导师(通讯作者):包亚萍(1965-),女,教授,硕士,主要研究方向为图像处理、认知无线电、嵌入式设计. Email: ngdcqq@163.com

收稿日期: 2014-05-26; **录用日期:** 2014-07-24

<http://www.photon.ac.cn>

相移法采用的光栅图像更少,更容易造成误差;Saul等^[14]对此进行了改进,简化了传统光强模型,提出了Saul两步相移法(Saul Two-step Phase Shifting Method, S-TPS),但S-TPS法光强模型过于简化,不易消除反射率信息,易带来误差;康新等^[7]的两步相移法在归一化过程中,把调制光强的幅值在半个周期内设定为常量,因而也存在一定的误差.现有方法采用的模型在进行解相位时不能完全得到真实的相位信息,易引入测量误差.针对此问题,本文通过对含有反射率信息的光强模型进行分析,提出了一种采用相位半角的两步相移法,避免了光强数据的量化和归一化操作,有效地消除了物体反射率不同对求解相位造成的影响,避免了光强分布不均对相位提取造成的错误,提高了准确度.

1 S-TPS 介绍与分析

经典光栅投影测量原理的高度-相位差关系为

$$h = \frac{l\Delta\theta}{\Delta\theta + 2\pi d/\lambda} \quad (1)$$

式中, h 为待测物体高度, l 为摄像机光心到参考面的距离, d 为投影装置光心的距离, λ 为光栅节距. l 、 d 、 λ 均为系统的几何参量常量,可以通过系统校准时测量得出,只要求出相位差 $\Delta\theta$, 就可以计算得到被测物体高度值,实现三维轮廓测量.

相移法是通过条纹图像的相位场进行有规律的相移,从而得到一系列的图像,再从这些图像中将所调制的相位信息解调出来.

摄像机获取的光栅投射于待测物表面和参考平面上的条纹图像表示为

$$I_i(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + \alpha_i] \quad (2)$$

式(2)中, $I_i(x, y)$ 为获取的光强, $I'(x, y)$ 为背景光强, $I''(x, y)$ 为调制强度, $\theta(x, y)$ 为待求的相位场, α_i 为相移量. Saul等根据传统的两步相移法求解过程,将式(2)简化为

$$I_i(x, y_0) = \frac{I_{\max}(x, y_0) + I_{\min}(x, y_0)}{2} + \frac{I_{\max}(x, y_0) - I_{\min}(x, y_0)}{2} \cos[\theta(x, y_0) + \alpha_i] \quad (3)$$

该两步相移法中认为光强值分布区间必定分布在0到可量化的最大值的区间内,因此,由式(3)可以得到

$$\begin{aligned} c_1(x, y_0) &= \cos \theta(x, y_0) = 2NI_1(x, y_0) - 1 \\ c_2(x, y_0) &= \cos[\theta(x, y_0) + \alpha] = 2NI_2(x, y_0) - 1 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $N = \frac{1}{2^n - 1}$, n 为光强量化的数据位数.运用三角关系推导出求折叠相位的主值计算方法,即

$$\varphi(x, y_0) = \arctan \left[\frac{c_1(x, y_0) \cos \alpha - c_2(x, y_0)}{c_1(x, y_0) \sin \alpha} \right] \quad (5)$$

该算法在简化光强公式时,传统的两步相移法用一行(或一列)的光强最大和最小值代替整行(或整列)的周期内光强最大和最小值,在式(3)中, S-TPS 直接用计算机获取图像时所能量化的区间最大和最小值取代整场光强最大和最小值,当光强分布不均时周期内的最值会发生变化,简单的用量化区间代替必然会造成影响.在式(4)中提取余弦值时进行了减法操作,并在式(5)中再进行更多的乘法和减法操作,使得物体的反射率不但没有能在除法操作中消除,还扩大了计算误差.因此,该算法对光强分布不均和物体不同反射率的处理能力不够.

2 本文提出的两步相移法

根据在相移 90° 的情况下的光强数据的特性,直接对光强数据进行除法操作,推导出理论模型,利用三角关系,推导出新的两步相移公式求解相位半角值.

2.1 算法原理

根据文献[6]中的光强公式,有

$$I(x, y) = A(x, y) + R(x, y) \{1 + \sin[\theta(x, y) + \alpha_i]\} \quad (6)$$

式中, $A(x, y)$ 是与测量环境光强有关的背景项, $R(x, y)$ 是物体反射率.在实际测量中,不同材质的物体或不同位置处的反射率并不均匀,式(6)直观地表达了物体表面反射率与光强分布的关系,也便于算法消除反射率引起的测量误差,所以采用该光强模型可满足理论分析的需求.

2.1.1 理论模型

1) 若 $A(x, y) = 0$, 则式(6)可以写成参考文献[6]中的形式,即

$$I(x, y) = R(x, y) \{1 + \sin[\theta(x, y)]\} \quad (7)$$

采集相移量为0和 $\pi/2$ 的两幅图像,获取的图像光强按式(7)可以写成

$$I_1(x, y) = R(x, y) \{1 + \sin[\theta(x, y)]\} \quad (8)$$

$$I_2(x, y) = R(x, y) \{1 + \cos[\theta(x, y)]\} \quad (9)$$

将式(8)除以式(9)得到

$$\frac{I_1(x, y)}{I_2(x, y)} = \frac{1 + \sin[\theta(x, y)]}{1 + \cos[\theta(x, y)]} \quad (10)$$

2) 若 $A(x, y) \neq 0$, 且 $R(x, y) \{1 + \sin[\theta(x, y)]\} \geq A(x, y)$ 时,采集相移量为0和 $\pi/2$ 的两幅图像,获取式(6)的图像的光强公式为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + R(x, y) \{1 + \sin[\theta(x, y)]\}$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + R(x, y) \{1 + \cos[\theta(x, y)]\}$$

将两式相除,分子、分母同时除以 $A(x, y)$ 得到

$$\frac{I_1(x, y)}{I_2(x, y)} = \frac{1 + \frac{R(x, y)}{A(x, y)} \{1 + \sin[\theta(x, y)]\}}{1 + \frac{R(x, y)}{A(x, y)} \{1 + \cos[\theta(x, y)]\}} \approx$$

$$\frac{R(x,y)}{A(x,y)} \{1 + \sin[\theta(x,y)]\} = \frac{R(x,y)}{A(x,y)} \{1 + \cos[\theta(x,y)]\} = \frac{1 + \sin[\theta(x,y)]}{1 + \cos[\theta(x,y)]} \quad (11)$$

因为两幅图像的采集时间间隔很短,可以认为同一点的 $A(x,y)$ 和 $R(x,y)$ 值在两幅图像中保持不变;同时,式(10)和式(11)表明,在上述两种情况下进行理论推导,最终得到的结果趋于一致. 综上分析,当光栅投影测量系统工作在密闭的暗室或环境光足够弱的环境中, $A(x,y)$ 可以忽略不计^[6]或足够小.

2.1.2 折叠相位分析

由三角关系的倍角关系可知

$$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta, \cos 2\theta = 2\cos^2\theta - 1.$$

又由三角关系的平方和公式

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1, \text{ 令 } a = \sin\left(\frac{\theta(x,y)}{2}\right), b =$$

$\cos\left(\frac{\theta(x,y)}{2}\right)$, 则式(10)、(11)进一步化简为

$$\frac{I_1(x,y)}{I_2(x,y)} = \frac{a^2 + b^2 + 2ab}{1 + 2b^2 - 1} = \frac{(a+b)^2}{2b^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} + 1\right)^2$$

将 a, b 替换后得到

$$\frac{I_1(x,y)}{I_2(x,y)} = \frac{1}{2} \left[\tan\left(\frac{\theta(x,y)}{2}\right) + 1 \right]^2 \quad (12)$$

虽然正切函数在周期内具有单调性,但由于式(12)含有平方项,因此,不能直接用开平方得到正切值. 通过对正切函数特性分析可知,式(12)的值在区间 $(2k\pi - \pi, 2k\pi - \pi/2]$ 内单调递减,在区间 $(2k\pi - \pi/2, 2k\pi + \pi)$ 内单调递增,完整的折叠相位求解表达式为

$$\varphi(x,y) = \begin{cases} 2\arctan\left[\sqrt{2\frac{I_1(x,y)}{I_2(x,y)} - 1}\right], & \frac{I_1(x,y)}{I_2(x,y)} \text{ 单调增} \\ 2\arctan\left[-\sqrt{2\frac{I_1(x,y)}{I_2(x,y)} - 1}\right], & \frac{I_1(x,y)}{I_2(x,y)} \text{ 单调减} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)求得整个相位场的主值,再对相位场逐行进行解包裹^[15],分别得到参考平面和放入待测物体的全场相位,再求得相位差,从而求得物体的三维形态数据.

2.2 算法实现步骤

Step1: 获取光栅相移量 0 和 $\pi/2$ 的两幅条纹图像;

Step2: 对图像数据进行高斯滤波;

Step3: 用式(10)得到除法结果,判断相除后数据的单调性,由式(12)计算得到相位主值 $\varphi(x,y)$;

Step4: 求取相位场;

由 Step3 所求得的相位区间通常为 $(-\pi, \pi)$, 完整的相位值为

$$\theta(x,y) = \varphi(x,y) + 2k(x,y)\pi, k=0,1,2,\dots \quad (14)$$

式中, $k(x,y)$ 表示各条纹的周期次数,可以看出,解相位的另一个关键技术就是确定 $k(x,y)$. 通常用的方法是满足 $|\varphi(n) - \varphi(n-1)| < \epsilon$ 来确定条纹阶次, ϵ 的取值通常为 π . 由折叠相位分布情况,得到条纹阶次计算式

$$k(x_i, y_{j+1}) = \begin{cases} k(x_i, y_j), & |\delta_{i,j}| \leq \pi \\ k(x_i, y_j) + 1, & \delta_{i,j} < -\pi \\ k(x_i, y_j) - 1, & \delta_{i,j} > \pi \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\delta_{i,j} = \varphi(x_i, y_{j+1}) - \varphi(x_i, y_j)$, $i=1,2,\dots, N_x, j=1,2,\dots, N_y-1$

利用式(15)逐行解出全场相位阶次,从而得到整个相位场 $\theta(x,y)$.

Step5: 由相位场信息得到相位差,根据式(1)求取物体高度信息 $h(x,y)$.

3 实验及测量结果

3.1 实验结果

实验系统采用 NEC 的投影仪投射出光栅周期为 16 pixel 的黑白光栅条纹图,相移步长为 90° ,用工业摄像机采集灰度图像,图像大小为 640 像素 \times 480 像素. 获取参考平面的光栅投影图如图 1,获取实物光栅投影图如图 2,图示物体为无线网卡,由于制作的材质,该物体能体现不同的反射率信息,图中光强较强部分是由光源投射所成,并不是环境光所造成,所以所采用的光强公式可以使用. 为了消除图像采集系统的随机噪音,对所获取的图像进行 5×5 的高斯滤波处理.

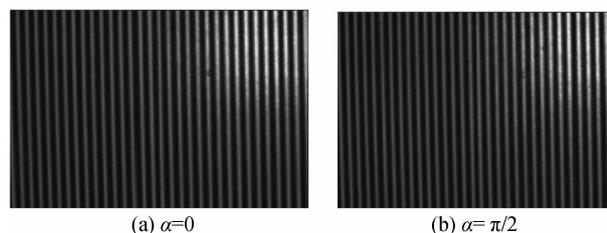


图 1 参考平面光栅图
Fig. 1 Fringe pattern of reference plane

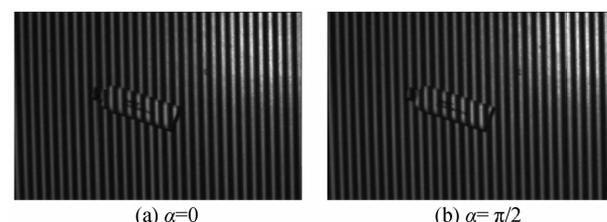


图 2 放入无线网卡光栅图
Fig. 2 Fringe pattern with the WLAN card

由 S-TPS 解得折叠相位图如图 3(a),可见该算法在光强分布不均区域和物体摆放区域处理能力不强,出现明显噪音,按式(15)展开方法得到图 3(b),得不到真实相位. 图 3(c)是本文方法得到的折叠相位,进行相位展开的结果如图 3(d).

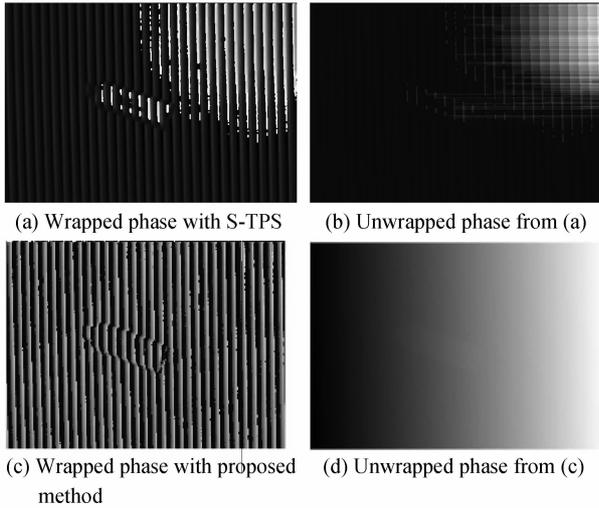


图3 解相位结果

Fig. 3 Results of unwrapping

实验采用文献[16]中相位差的优化方法获取相位差,代入高度-相位差公式,得到高度信息,再根据标定得到的信息,转换得到世界坐标信息,对获取的无线网卡的三维点云进行简单的表面重构,其视图如图4.

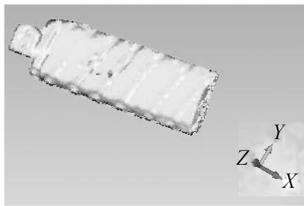


图4 无线网卡的三维重构视图

Fig. 4 Diagram of restructured WLAN card

3.2 结果分析

对比图3(a)和图3(c), S-TPS算法对物体的反射率处理能力较弱,并且在光强分布不均匀时,得到的折叠相位结果很差.图5(a)是S-TPS对一行($i=250$)条纹图像数据处理后的灰度分布图,图5(b)是本文方法对同一行数据处理后的灰度分布图.可见,图5(b)处

理后的灰度值分布成标准反正切函数分布,由于受物体表面反射率不同和光强分布不均的影响,图5(a)中出现明显凸点.

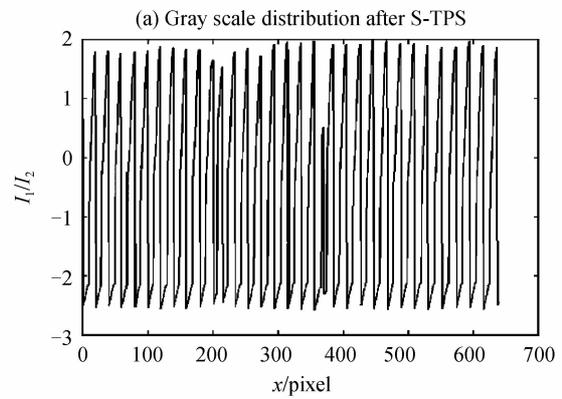
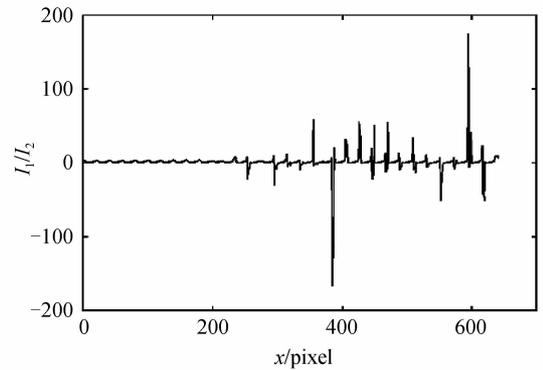


图5 经过处理后的灰度分布图($i=250$)

Fig. 5 Comparison of gray scale distribution in a row after fringe processing ($i=250$)

为了验证本文方法的有效性,放入其他物体进行测量,并对测量结果进行对比分析.图6(a)所示的测量物体为一本书,其表面反射率较低且相对均匀,由于摄像机的位置关系,实验所采集图像均包含光强分布不均的情况.

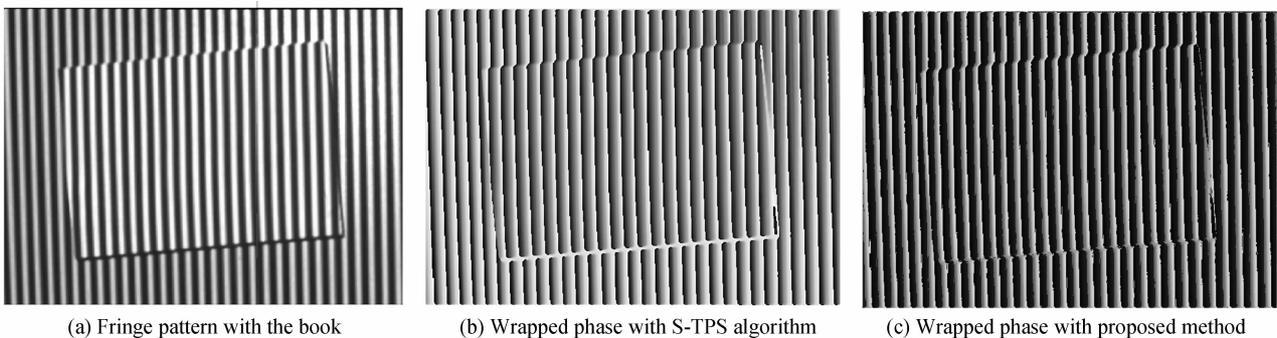


图6 书本的条纹图及折叠相位

Fig. 6 Fringe pattern and wrapping phase of book

由S-TPS算法解出的书本的折叠相位图如图6(b),由于书本的反射率比无线网卡低,所以在物体摆放区域,S-TPS算法的处理效果明显提高,但是当光强

分布区间较小时,即图像的右上角区域,相位的求解结果分布不均,按式(14)的相位展开方法,存在得不到真实相位的情况.由本文方法解出的书本的折叠相

位图如图 6(c),其值分布均匀,并且在阴影部分的处理结果明显优于 S-TPS 的结果,S-TPS 在阴影部分处理后的效果如图 6(b)所示的白色区域,在相位展开时,会产生严重的拉线现象。

表 1 是任意选取被测物体(书本)上的几组实验点云数据,分别给出了目前应用最广泛的四步相移法

(Four Step Phase Shift, FPS)、S-TPS 和本文的两步相移法的结果,参考点是选取的像素点的位置,实际高度是参考的游标卡尺的测量值,测量值是各算法得到的高度值。数据表明本文方法的结果接近于公认测量误差最小的 FPS 的结果,误差范围为 ± 0.2 mm,优于 S-TPS 的结果。

表 1 FPS、S-TP 和本文方法的实验测量值及其误差
Table 1 The measured data and errors of FPS, S-TPS and proposed method

Reference points(x, y)	Actual height (h_{ref}/mm)	Measured height(h/mm)			Error/(mm)		
		FPS	S-TPS	Proposed method	FPS	S-TPS	Proposed method
(176,209)	11	11.194 6	11.856 7	11.130 4	0.194 6	0.856 7	0.130 4
(193,214)	11	10.955 5	13.614 7	11.094 6	-0.044 5	3.614 7	0.094 6
(214,189)	9	9.126 6	10.201 2	9.126 6	0.126 6	1.201 2	0.126 6
(263,269)	11	10.852 6	10.663 3	10.852 6	-0.147 4	-0.336 7	-0.147 4
(338,234)	11	10.850 6	12.637 3	11.186 7	-0.149 6	-1.637 3	0.186 7

为了更直观地显示本文方法的精确度,采用理论与测量值的均方根(Root Mean Square, RMS)误差^[17-18]来评判。RMS 的定义为

$$\delta = \sqrt{\frac{(h_{\text{ref}}(x, y) - h(x, y))^2}{m}} \quad (16)$$

式中 $h_{\text{ref}}(x, y)$ 是实际物体高度, $h(x, y)$ 是测量值, m 是点云数量。

采集第 250 行经过提取目标物后的点云数据,并分析其 RMS 值,结果如表 2,无线网卡的 RMS 明显比其他两种方法的 RMS 值大,是因为在对图 5 所示的折叠相位展开时得不到真实条纹阶次,从而得不到真实的相位差,计算高度时出现大量错误数据。从数据可以看出,本文所提两步相移法的 RMS 值接近于四步相移法,具有一定的适用性。

表 2 FPS、TPS 和本文方法的 RMS
Table 2 RMS of FPS, TPS and proposed method

Object	RMS (δ/mm)		
	FPS	S-TPS	Proposed method
WLAN card	0.183 6	10.867 3	0.195 8
Book	0.129 3	0.528 6	0.124 7

4 结论

讨论了光栅投影法三维测量中解相位的 Saul 两步相移法,针对其算法不能很好地解决光强分布不均和物体不同反射率对求解相位的影响的问题,研究了光栅相移为 90° 的情况,采用能直观地反映物体表面反射率的光强公式,实现了对相位提取的计算方法,有效地计算出点云数据。实验结果表明,本文方法可以有效地消除反射率对测量结果的影响,且没有因为归一化的量化所引起的误差,结果更为精确,并且与四步移相法相比,在达到近似的准确度的同时还能减少采集步数和减少时间,减少了硬件的负担和时间消耗。

参考文献

- [1] CHEN Feng, SU Xian-yu. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of 3D object[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, **123**(24): 2272-2275.
- [2] BIAN Xin-tian, JI Bao-wei, CHENG Ju, et al. Phase measuring profilometry based on elliptic pattern grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1094-1097.
- [3] CHEN Feng, BROWN G M, SONG Mu-min. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(1): 10-22.
- [4] LIU Da-hai, LIN Bin. Fourier transform profilometry using zero frequency elimination based on gray modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11):1697-1701.
- [5] 刘大海,林斌.利用强度调制消除零频的傅里叶变换轮廓测量[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11):1697-1701.
- [6] JIAN Xian-zhong, ZHOU Hai, YANG Xin, et al. A method for spectrum extraction of 3D object with object points[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0509001.
- [7] 简献忠,周海,杨鑫,等.三维点云物体频谱获取方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0509001.
- [8] DAI Mei-ling, YANG Fu-jun, GENG Min, et al. Single color fringe projection for measuring three-dimensional shapes with discontinuities[J]. *Acta Optic Sinica*, 2012, **32**(4): 0412005.
- [9] 戴美玲,杨福俊,耿敏,等.单幅彩色条纹投影的不连续物体表面三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0412005.
- [10] KANG Xin, HE Xiao-yuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optic Sinica*, 2003, **23**(1): 75-79.
- [11] 康新,何小元.两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):75-79.
- [12] 达飞鹏,盖绍彦.光栅投影三维精密测量[M].北京:科学出版社,2011.
- [13] HU Er-yi, HE Yu-ming, CHEN Yan-ming. Study on error with periodic wave behavior and a new algorithm in projected grating phase-shifting profilometry [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, **23**(4): 345-352.
- [14] 胡而已,何玉明,陈炎明.投影栅相移法中的相位波动误差及修正算法研究[J]. *实验力学*, 2008, **23**(4): 345-352.
- [15] QUAN C, TAY C J, KANG X, et al. Shape measurement by use of liquid-crystal display fringe projection with two-step

- phase shifting[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(13): 2329-2335.
- [11] ZHU Y, LIU L, LUAN Z, *et al.* Discussions about FFT-based two-step phase-shifting algorithm [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2008, **119**(9): 424-428.
- [12] ALMAZÁN-CUÉLLAR S, MALACARA-HERNÁNDEZ D, SERVIÍN M. Two steps phase shifting algorithm using analytic wavelets[J]. *Optics Communications*, 2002, **212**(1): 71-84.
- [13] MURAYSKY L I, OSTASH O P, KMET A B, *et al.* Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **49**(3): 305-312.
- [14] ALMAZÁN-CUÉLLAR S, MALACARA-HERNÁNDEZ D. Two step phase shifting algorithm[J]. *Optical Engineering Bellingham International Society for Optical Engineering*, 2003, **42**(12): 3524-3531.
- [15] DENNIS C, GHIGLIA, MARK D P. Two-dimensional phase unwrapping; theory, algorithms, and software [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998.
- [16] CAI Chang-qing, HE Ling-feng. Phase difference extraction based on four-step phase shifting[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **39**(9): 93-96.
蔡长青, 贺玲凤. 基于四步相移的相位差提取方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, **39**(9): 93-96.
- [17] KATO T, TAGUCHI R, UMEZAKI T, *et al.* Correcting phase distortion of phase shifting method [C]. Consumer Electronics (GCCE), 2012 IEEE 1st Global Conference on. IEEE, 2012; 288-292.
- [18] DENG Jian, WANG Han-kun, ZHANG Feng-jie, *et al.* Two-step phase demodulation algorithm based on the extreme value of interference [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(22): 4669-4671.