

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905507

一种针对投影仪 gamma 效应的相位误差补偿方法*

张申华^{1,2,3}, 杨延西^{1,2}

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

摘要:结构光的相移轮廓法具有非接触和效率高的测量优点,但是,由于投影仪的 gamma 效应影响,工业相机捕获的条纹像素值发生了畸变,导致计算出的相位值产生误差,降低了测量的准确度。针对这一问题,首先分析了相位误差的数学模型,对模型进行了进一步的研究;然后,利用得到的模型,设计了条纹图像的投射方案,将原条纹移相 $\pi/2$,计算出原条纹和移相条纹的相位均值作为最终的相位,达到相差补偿的目的。最后,对条纹投射数量进行了优化。实验结果表明,所提方法无需计算畸变的 γ 值。相位补偿后,均方根相位误差降低了 45.7%。

关键词: 相位误差补偿; gamma 效应; 误差模型; 移相

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A phase error compensation method for the gamma effect of projector

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

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

Abstract: Due to the advantages of non-contact and high efficiency, the phase shift profile (PSP) method based on structured light has been widely applied. However, the pixel value of the fringe captured by the industrial camera is distorted due to the gamma effect. It may result in the error of the calculated phase value and reduce the accuracy of measurement. To solve this problem, the mathematical model of phase error is analyzed and studied further. Then, based on the improved model, the projection scheme of the fringe image is designed. The value of shifted phase of the original fringe is $\pi/2$, and the mean phase of the original fringe and the phase-shifted fringe is utilized as the final phase. In this way, the purpose of phase compensation can be achieved. Finally, the number of fringe projections is improved. Experimental results show that the proposed method does not need to calculate the distortion value γ . After compensation, the root mean square (RMS) phase error is decreased by 45.7%.

Keywords: phase error compensation; gamma effect; error model; phase shifting

0 引言

基于结构光的相移轮廓法具有非接触、测量效率高以及精度高的优点,被广泛应用于工业现场测量、智能制造、医学影像,是当前的热点研究问题^[1-6]。由计算机生成的正弦条纹图像序列,经过 DLP 高速投影仪投射到物

体表面,受物体轮廓的影响,条纹发生变形,并由工业相机同步捕获,并被保存至计算机。对捕获的条纹图像进行相位计算后,可以重建物体的三维轮廓。然而,由于投影仪和相机的 gamma 效应^[7-8],相机采集到的正弦条纹像素值已经发生了改变,文献[9]的研究表明,主要是投影仪的 gamma 效应,导致获取的条纹图像相位产生误差,这将使得测量结果的准确度降低。因此,为了提高相

收稿日期:2019-08-22 Received Date:2019-08-22

* 基金项目:国家重点研发计划网络协同制造和智能工厂重点专项(2018YFB1703000)、陕西省现代装备绿色制造协同创新中心项目(304-210891702)资助

位的计算精度,必须补偿校正投影仪的 γ 效应引起的相位误差。

目前,相位误差补偿是众多学者研究的热点问题,对误差补偿的方法^[10-13]展开了深入的研究,这些方法可以划分为两类,1)主动式处理方法,也就是测量之前先计算出 γ 效应引起的畸变值 γ ,然后根据 γ 进行相位误差补偿,如文献[10]通过用投影仪预先投射一系列不同光强的均匀白光,估算测量视场内不同区域的畸变值 γ ,然后根据 γ 值分区补偿相位,对于平滑物体的测量,该方法取得了较好的效果,但是预先估算 γ 值的过程繁琐,并且测量物体或环境发生变化时,又需要重新进行估算。2)被动式补偿方法。如文献[11]对相差模型进行了分析,并引入希尔伯特变换,在空域和希尔伯特域分别计算出相位,再求出两者的均值,达到相位补偿的目的,但是非整数周期条纹或不连续轮廓导致的边界效应^[14],使希尔伯特变换后相差增大,失去补偿效果^[12]。文献[15-17]预先将投射的正弦条纹替换为指数条纹,通过分析数学模型分析指出,指数条纹投影计算出的相位和畸变值 γ 无关。这类方法通过对相位误差建模,依据模型来设计条纹的投射方案,不需要关注具体的 γ 值,因而具有更大的灵活性。

本文在分析了投影仪 γ 效应引起的相位误差模型后,对误差模型进行了进一步分析,在此基础上,提出了将原投影条纹移相 $\pi/2$ 的投射方案,然后对两套条纹的相位进行融合,求出最终的相位作为补偿结果,降低相位误差。为了提高测量效率,本文对投射的两套条纹数量进行了优化,降低了投影图像的帧数。对本文方法进行了实验测试,结果表明,本文方法无需计算 γ ,并能够有效降低相位误差。

1 相位误差模型

在相移轮廓法中,一套正弦或余弦条纹被投射到物体上,其表达式为:

$$f_n^p(x_p, y_p) = A(x_p, y_p) + B(x_p, y_p) \cos(\phi(x_p, y_p) + \delta_n) \quad (1)$$

式中: n 表示相移的步数; (x_p, y_p) 表示投影平面的坐标; f 表示投影条纹的强度; A 是条纹图像的背景; B 表示条纹图像强度的调制度; δ 表示理想的相移量。

投射的条纹经物体调制后,被相机捕获,其表达式为:

$$f_n^c(x_c, y_c) = A(x_c, y_c) + B(x_c, y_c) \cos(\phi(x_c, y_c) + \delta_n) \quad (2)$$

式中: (x_c, y_c) 表示相机平面的坐标; $\phi(x_c, y_c)$ 是所要求取的相位信息。为了方便书写,本文统一省略坐标。

由于投影仪 γ 效应的影响,获取的条纹图像包

含高次谐波的相位信息,根据文献[11],其表达式可以表示为:

$$f_n^c = \alpha (f_n^p)^\gamma = A + \sum_{k=1}^{\infty} [B_k \cos k(\phi + \delta_n)] \quad (3)$$

式中: α 表示比例系数,可以调节图像的强度。 B_k 表示傅里叶级数展开后各阶谐波分量的系数,文献[8]的研究表明,对于捕获的条纹图像,一般 $k = 5$ 。

根据最小二乘法原则,由相机捕获的图像,可以计算出包裹相位信息,用公式表示为:

$$\Psi = -\arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N f_i^c \sin \delta_i}{\sum_{i=1}^N f_i^c \cos \delta_i} \right) \quad (4)$$

观察(4)式可知,由于投影线的非线性特性,条纹像素强度产生了非线性误差,由此导致产生了相位差 $\Delta\phi$,也就是:

$$\Psi = \phi + \Delta\phi \quad (5)$$

其中 ϕ 表示理想的相位; $\Delta\phi$ 表示相位误差。由文献[11]的证明可知:

$$\Delta\phi = \arctan \left\{ \frac{\sum_{k=1}^{\infty} (G_{mN+1} - G_{mN-1}) \sin(mN\phi)}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} (G_{mN+1} + G_{mN-1}) \cos(mN\phi)} \right\} \quad (6)$$

式中:系数 G 是一个与畸变值 γ 有关的数值,文献[18]推导出了它们之间关系可以表示为:

$$G_s = \frac{B_s}{B_1} = \prod_{i=2}^s \frac{\gamma - i + 1}{\gamma + i} \quad (7)$$

一般来说, γ 的取值范围是(1,3),取 $m = 1$,如图1所示,当 $N = 3$ 时, $1 > G_{N-1} > G_{N+1}$,且 G_{N+1} 趋向于0,当 $N = 4$ 时,具有同样的结论,同时 G_{N-1} 的值进一步下降。基于此,可以将式(6)可以简化为:

$$\Delta\phi \approx \arctan \left\{ \frac{-G_{N-1} \sin(N\phi)}{1 + G_{N-1} \cos(N\phi)} \right\} \quad (8)$$

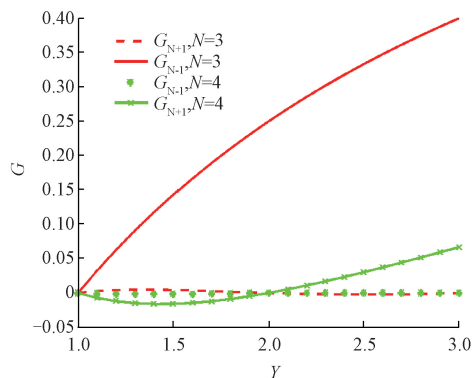


图1 γ 值与系数 G 关系曲线

Fig.1 Relation curve between values γ and G

观察图 1, 因为 $G_{N-1} < 0.4$, 所以 $\left| \frac{-G_{N-1}\sin(N\phi)}{1 + G_{N-1}\cos(N\phi)} \right| < 1$,

对式(8) 进行泰勒级数展开, 并忽略高次幂项, 可以得到:

$$\Delta\phi = \frac{-G_{N-1}\sin(N\phi)}{1 + G_{N-1}\cos(N\phi)} \quad (9)$$

当相移步数 $N \geq 4$ 时, 绝对值 $|G_{N-1}| < 0.0667$, $G_{N-1}\cos(N\phi) < 1$, 所以(9)式可以进一步改写为:

$$\Delta\phi = -G_{N-1}\sin(N\phi) \quad (10)$$

式(10)表明, 相位误差与相移步数 N 、 γ 以及相位 ϕ 有关, 其分布呈现正弦分布。

为了使 $\Delta\phi$ 尽可能的降低, 可以考虑投射额外的条纹, 使其相位误差呈现相同的正弦分布, 变化方向相反, 然后将两套条纹计算出的相位求均值, 理论上, 就抵消了相位误差。

对式(1)表示的正弦条纹图像, 如果将其相位进行移相 $\pi/2$, 并用符号 f'_n 表示。投射到测量物体上, 相机捕获的条纹图像为:

$$f'_n = \alpha (f'_n)^\gamma = A - \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin[k(\phi + \delta_n)] = A - \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(k\phi_n) \quad (11)$$

相似地, 根据前述的分析方法, 移相条纹的相差可以表示为:

$$\Delta\phi = \frac{G_{N-1}\sin(N\phi)}{1 + G_{N-1}\cos(N\phi)} \quad (12)$$

对比式(10)、(12)可知, 对条纹移相 $\pi/2$ 后, 相位误差和原条纹相差幅度近似相等, 并呈现相反方向的分布。将二者相位求均值, 可以削弱相位的误差。

为了实现 $\pi/2$ 移相, 本文首先由计算机程序生成 $\pi/2$ 移相的正弦条纹, 将其通过投影仪投射到物体表面, 被相机同步捕获成像, 其过程如图 2 所示。根据极线几何关系, 投影平面上的点 P_s 与相机成像平面上的点 P_c 与被测物表面的点 P 具有相同的相位, 若投射条纹上的 P_s 点移相 $\pi/2$, 则对应的 P_c 点也移相 $\pi/2$ 。

2 投影条纹序列优化

根据前文的分析, 当 $N > 4$ 时, 系数 G_{N-1} 下降明显, 但是过大的相移步数 N 也意味着额外的条纹图像需要投射和计算, 这给测量效率带来了困扰。传统的四步相移法, 其条纹可表示为:

$$\begin{aligned} f_1 &= A + B\cos(\phi) \\ f_2 &= A + B\cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ f_3 &= A + B\cos(\phi + \pi) \\ f_4 &= A + B\cos\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

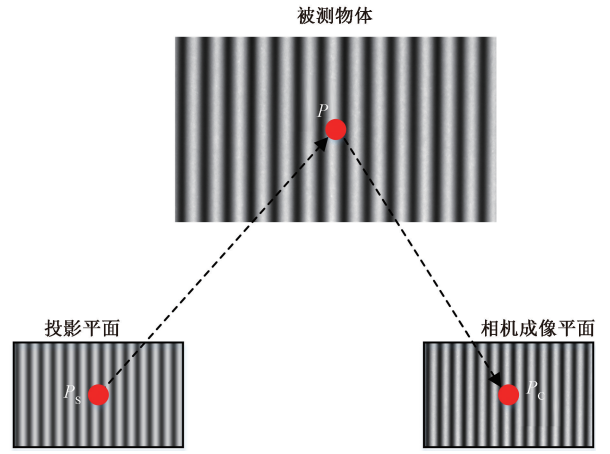


图 2 投影成像
Fig.2 Projection imaging

采用传统的四步移相法和三频外差法^[19] 计算相位, 需要投射 12 帧条纹图像, 考虑到获取移相 $\pi/2$ 后的条纹相位误差, 还需要投射另外 12 帧条纹图像, 这样就需要投射 24 帧条纹图像降低相位差, 所以, 需要压缩投射图像的数目。采用三频外差法, 展开相位的表示为:

$$\Phi = \phi_H + 2\pi \cdot \text{round}\left(\frac{T_H}{T_L}\phi_L - \phi_H\right) \quad (14)$$

本文采用的投射条纹频率分别为, 这就需要先分别求出它们的包裹相位, 经过两次外差, 消除相位跳跃点, 得到连续相位, 并借助式(14)计算出绝对相位。

考虑到对同一个物体测量过程中, 其背景分量 A 可以认为不变。观察式(13)可以看出, 背景分量为:

$$A = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}{4} \quad (15)$$

其包裹相位可以表示为:

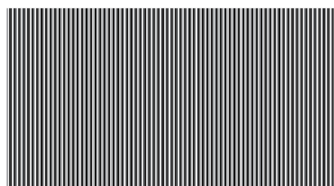
$$\Psi^i = \arctan\left(\frac{f_4 - A}{f_1 - A}\right) \quad (16)$$

根据式(16), 采用四步相移和三频外差法计算相位, 可以将 12 帧原投影条纹压缩为 8 帧, 这样就减少了投影条纹的数量。

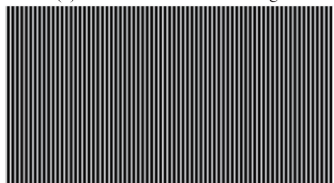
3 仿真实验

为了验证相差模型, 利用计算机模拟 $\gamma = 1.3$, $N = 4$ 的条件下, 条纹图像如图 3(a)、(b)所示, 计算出的相位的相差分布如图 3(c)所示。红色的实线表示图 3(b)的相位与图 3(a)的相位差值, 即式(10)中的 $\Delta\phi$, 绿色虚线表示将图 3(b)中的条纹移相 $\pi/2$ 后的相位与图 3(a)的相位差值, 即式(12)中的 $\Delta\phi'$ 。如第 230 个像素位置, 移相前相差为 -0.0599 rad, 移相后的相差为 0.0561 rad,

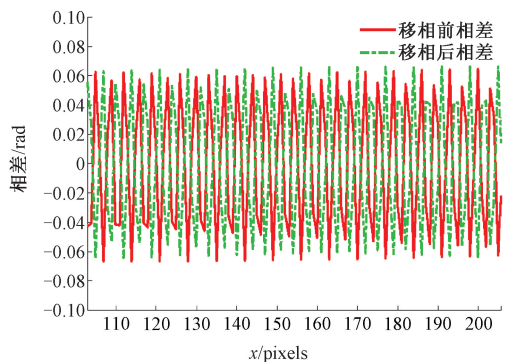
将移相前后相位求平均,则相差能够相互抵消,抵消之后在第 230 个像素位置的相差减小为 $(\Delta\phi + \Delta\phi')/2 = -0.0019 \text{ rad}$ 。



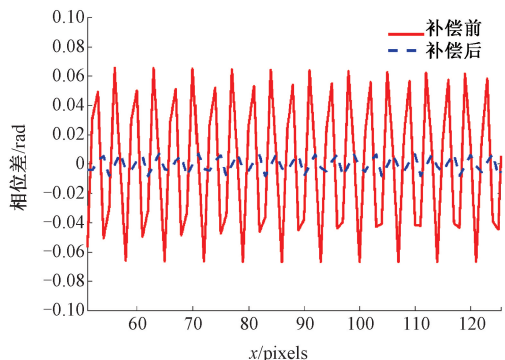
(a) 模拟标准正弦条纹
(a) Simulated sinusoidal fringe



(b) 模拟畸变条纹
(b) Simulated distortion fringe



(c) 移相前后相差的分布图
(c) Distribution of phase error before and after phase shifting



(d) 补偿前后相差的分布图
(d) Distribution of phase error before and after phase compensation

图3 相差补偿模型的仿真

Fig.3 Simulation of phase error model

由图 3(c) 可以看出,移相前后相差近似呈正弦分布,变化趋势相反,且幅度相近,将两者取平均后,相差分布如图 3(d) 所示,相位误差幅度明显得到减小,达到相位补偿的目的。仿真结果证明了所用相位误差模型的可行性。

4 实验与分析

为了验证本文方法的有效性,搭建如图 4 所示的实验平台,对本文方法进行了测试。实验所用投影仪为 TI DLP4500,分辨率为,CCD 工业相机型号为 MA-AA1300-90GM,分辨率为 1024×1280 。

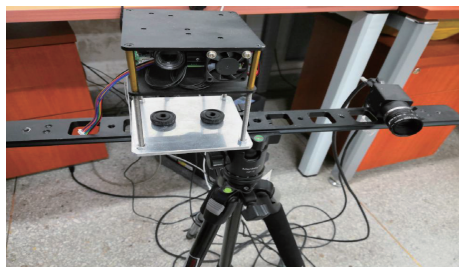
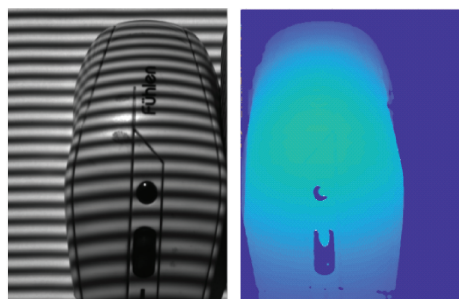


图4 实验测试仪器平台

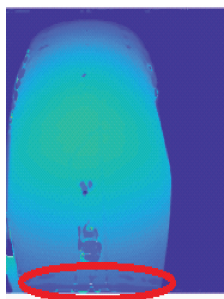
Fig.4 Experimental instrument platform

本文首先对一个鼠标进行了相位测量重建实验,重建效果如图 5 所示。

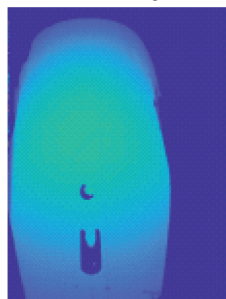


(a) 相机捕获的图像
(a) Captured fringe

(b) 传统方法相位图
(b) Computed by Conventional algorithm



(c) 希尔伯特方法相位图
(c) Computed by Hilbert algorithm



(d) 本文方法相位图
(d) Computed by proposed algorithm

图5 相位测量对比效果

Fig.5 Comparison of phase computation

由图 5 的效果可以看出,希尔伯特方法^[11]在边界区域(如图 5(c)中的红色椭圆内),相位明显发生了丢失或错误,其原因如图 6 所示。

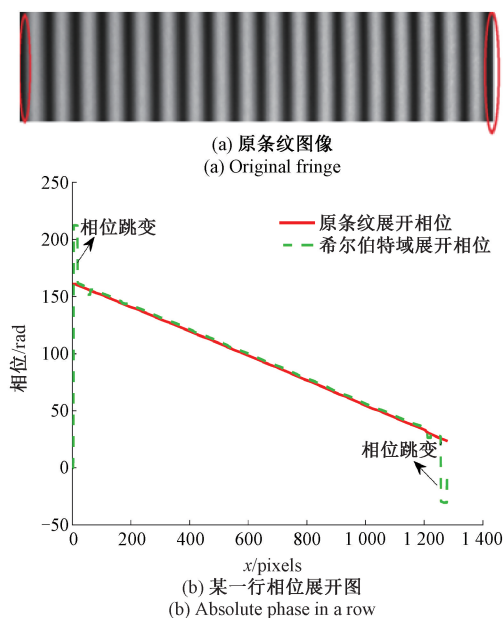


图 6 希尔伯特方法的边界效应

Fig.6 Boundary effect of Hilbert transform

在图 6(a) 两端的红色椭圆线标记的区域, 条纹为小数周期, 对其做希尔伯特变换后, 小数周期区域灰度值发生错误, 应区域的相位计算也不正确, 如图 6(b) 所示, 相位发生了明显的跳变。而本文方法避免了这一问题。

图 7 所示为本文方法获得的鼠标相位图第 600 行相位, 五角星标注的红实线表示原始条纹计算出的相位, 绿虚线表示移相后的相位, 菱形标注的蓝虚线表示补偿后的相位。可以看出, 本文方法计算的相位轮廓的起伏更小。

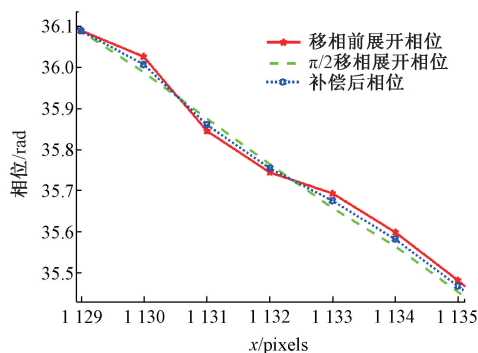
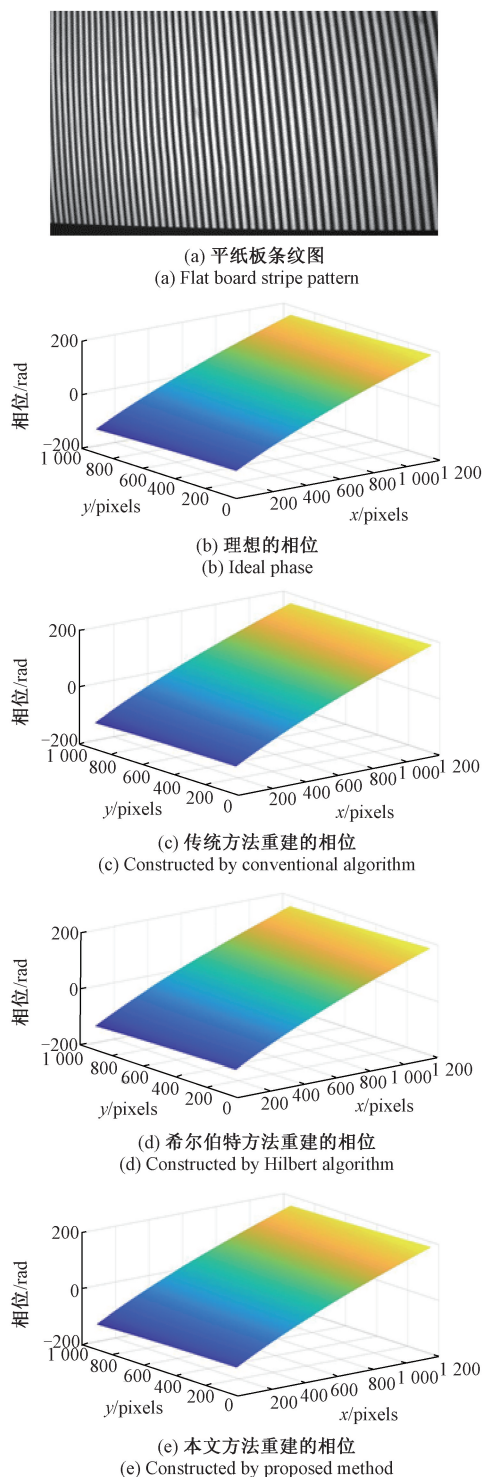


图 7 鼠标测量的第 600 行相位

Fig.7 Absolute phase of line 600

在 MATLAB 2017a 的环境中, 采用三频外差的方法对采集到的平纸板进行了相位重建实验, 效果如图 8 所示。为避免边界的影响, 对图 8(a) 的平纸板条纹图, 选取图像的部分区域来进行数据对比 (选取的像素范围是 $x \in [50, 950], y \in [50, 1200]$), 并以 20 步移相法计算

出的结果作为理想的参考相位^[20-21], 如图 8(b) 所示。图 8(c)~(e) 所示为采用传统的四步相移和三频外差法、希尔伯特变换方法和本文方法计算出的相位图。分别将 3 种方法重建出的相位图, 与理想相位图求差, 得到 3 种方法的相位差, 相对应的结果分别如图 8(f)~(h) 所示。对比可以得出, 本文方法误差幅度最小。



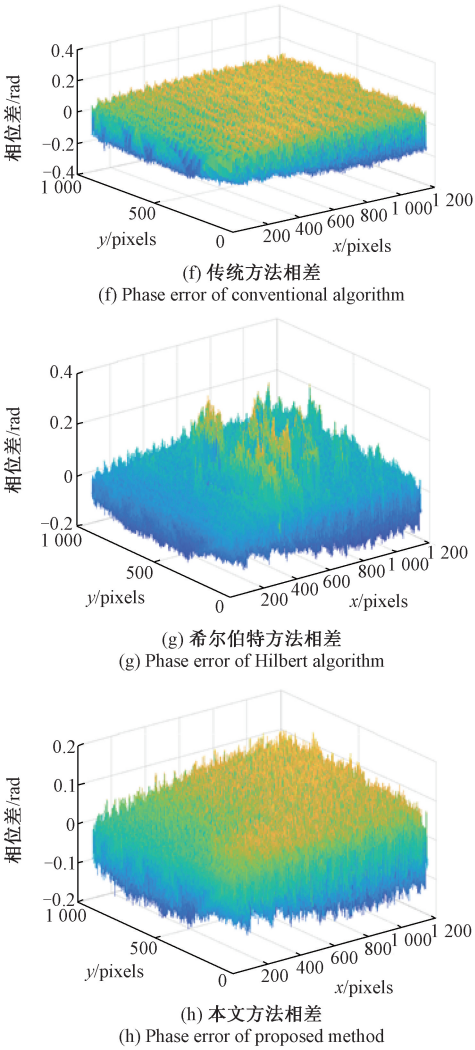


图 8 平纸板相位测试

Fig.8 Phase computation of the flat board

为了对相差进行量化对比,任意同时选取图 8(f) ~ (h) 的第某一行上的相位误差进行对比(实验选取的是第 200 行),如图 9 所示。本文计算出了 3 种方法的均方根相位差 (root mean square, RMS) 和最大相位误差 (MAX),如表 1 所示。

表 1 MAX 和 RMS 相差

Table 1 The MAX and RMS phase error (rad)			
评价指标	传统方法	希尔伯特方法	本文方法
RMS	0.064 6	0.042 6	0.035 1
MAX	0.181 3	0.299 6	0.145 1

由表 1 可以看出,和传统方法相比,本文方法在没有增大最大相位误差的同时,均方根相位误差 RMS 下降了 45.7%。和希尔伯特变换方法相比,本文的 RMS

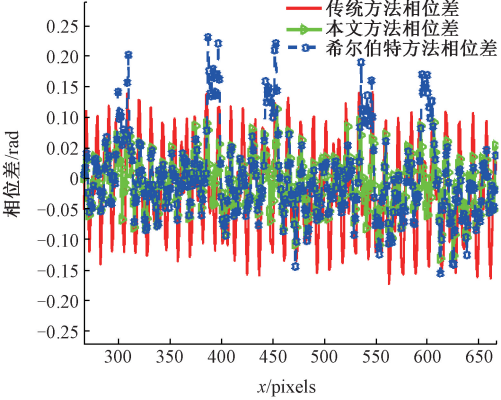


图 9 第 200 行相差

Fig.9 Phase error of line 200

相差和 MAX 相差也更小。实验结果也更进一步的验证了本文提出的相位补偿方法,在提高相位计算精度上的有效性。

5 结 论

本文对投影仪 gamma 效应影响导致的相位误差模型进行了进一步的分析,在此模型基础上,提出了改善相位误差的条纹投射方案,将原条纹移相 $\pi/2$ 后,求两套相位的均值,作为补偿后的相位,为了提高测量效率,对投射条纹数量进行了优化。本文方法无需计算畸变的 γ 值,实验结果表明,和比对方法相比,采用本文方法补偿相位后,均方根相差下降了 45.7%,并且避免了边界效应的影响。

本文是通过增加投影条纹数量,来获取更高的相位计算精度。在保证计算精度的前提下,进一步降低投影条纹数量,降低计算量,提高测量效率,是后续的研究目标。

参考文献

[1] ZHANG M L, CHEN Q, TAO T Y, et al. Robust and efficient multi-frequency temporal phase unwrapping: Optimal fringe frequency and pattern sequence selection [J]. Optics Express, 2017, 25 (17): 20381-20400.

[2] HAN L Y, LI Z W, ZHONG K, et al. Vibration detection and motion compensation for multi-frequency phase shifting based 3D sensors [J]. Sensors, 2019(19): 1368.

- [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] 刘金越,刘佳斌,郭志红,等.一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J].电子测量与仪器学报,2016,30(12):1884-1891.
- LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A three dimensional tool measurement system based on surface structured light[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1884-1891.
- [5] 占栋,于龙,肖建,等.多摄像机结构光大视场测量中全局标定方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(4):904-910.
- ZHAN D, YU L, XIAO J, et al. Study on multi-cameras and structured-light vision system calibration approach in large field view Measurement [J]. Chines Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 901-910.
- [6] 史艳侠,娄小平,李伟仙.线结构光点云粗拼接方法研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(6):12-16.
- SHI Y X, LOU X P, LI W X. Coarse stitching of point structured cloud of line structured light research on unconstrained method of surface measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(6): 12-16.
- [7] ZHANG C W, ZHAO H, ZHANG L, et al. Full-field phase error detection and compensation method for digital phase-shifting fringe projection profilometry [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26, 035201.
- [8] PAN B, QIAN K M, LEI H, et al. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. Optics Letters, 2009, 34(4): 416-418.
- [9] ZHANG S. Comparative study on passive and active projector nonlinear γ calibration [J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 3834-3841.
- [10] GAI S Y, DA F P, LIU C. Multiple- γ -value based phase error compensation method for phase measuring profilometry [J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10290-10299.
- [11] CAI Z W, LIU X L, JIANG H, et al. Flexible phase error compensation based on Hilbert transform in phase shifting profilometry [J]. Optics Express, 2015, 23(19): 25171-25181.
- [12] CHEN H L, YIN Y K, CAI Z W, et al. Suppression of the nonlinear phase error in phase shifting profilometry: considering nonsmooth reflectivity and fractional period [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13489-13505.
- [13] 崔艳军,张文峰,李建欣,等.条纹投影三维测量的 γ 畸变校正方法[J].光学学报,2015,35(1):0112002.
- CUI Y J, ZHANG W F, LI J X, et al. A method of γ correction in fringe projection measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112002.
- [14] 李方溪,陈桂明,刘希亮,等.希尔伯特-黄变换端点效应的自适应端点相位正弦延拓方法[J].上海交通大学学报,2013,47(4):594-601.
- LI F X, CHEN G M, LIU X L, et al. Processing method for Hilbert-Huang transform end effects self-adaptive endpoint-phase sinusoidal extension [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(4): 594-601.
- [15] ALI B, MOHAMMAD S, JONATHAN K. Exponential fringe pattern projection approach to γ -independent phase computation without calibration for γ nonlinearity in 3D optical metrology [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 24927-24938.
- [16] CHEN C, GAO N, WANG X J, et al. Exponential fringe projection for alleviating phase error caused by γ distortion based on principal component analysis [J]. Optical Engineering, 2018, 57(6): 064105.
- [17] CHEN C, GAO N, WANG X J, et al. Generic exponential fringe model for alleviating phase error in phase measuring profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 179-185.
- [18] LIU K, WANG Y CH, LAU Daniel L, et al. γ model and its analysis for phase measuring profilometry[J]. Optics Express, 2010, 27(3): 553-562.
- [19] TOWERS C, TOWERS D, JONES J. Absolute fringe order

calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(7): 788-

- [20] WANG J H, Yang Y X. An efficient phase error self-compensation algorithm for nonsinusoidal grating fringes in phase-shifting profilometry [J]. Review of Scientific Instrument, 2018, 89(6): 063115.
- [21] 毛翠丽, 卢荣胜. 提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0412005.
- MAO C L, LU R SH. Inverse error compensation method for improvement of phase recovery accuracy of multi-frequency fringe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412005.

作者简介



张申华, 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 received his M. Sc. degree

from Northwestern University in 2010. He is currently a lecture at Ankang University and a Ph. D. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interests include 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 from Xi'an University of Technology in 2003. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Xi'an University of Technology. His main research interests include complex system control, machine vision and intelligent robot.