中国光学 Chinese Optics 核心期刊

针对光栅图像的快速盲去噪方法

张申华 杨延西 秦峤孟

A fast blind denoising method for grating image

ZHANG Shen-hua, YANG Yan-xi, QIN Qiao-meng

引用本文:
张申华, 杨延西, 秦峤孟. 针对光栅图像的快速盲去噪方法[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 596–604. doi: 10.37188/CO.2020–0166
ZHANG Shen-hua, YANG Yan-xi, QIN Qiao-meng. A fast blind denoising method for grating image[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 596-604. doi: 10.37188/CO.2020-0166

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020–0166

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于激光诱导击穿光谱和拉曼光谱对四唑类化合物的快速识别和分类实验研究

Fast recognition and classification of tetrazole compounds based on laser–induced breakdown spectroscopy and raman spectroscopy

中国光学. 2019, 12(4): 888 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0888

跟踪微分器在陀螺信号去噪方面的应用

Application of tracking differentiator to gyro signal denoising

中国光学. 2017, 10(3): 355 https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0355

多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法

A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi–scale window

中国光学. 2019, 12(6): 1311 https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1311

激光诱导击穿光谱技术对烟草快速分类研究

Fast classification of tobacco based on laser–induced breakdown spectroscopy

中国光学. 2019, 12(5): 1139 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1139

基于结构字典学习的图像复原方法

Image restoration approach based on structure dictionary learning

中国光学. 2017, 10(2): 207 https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0207

眼科光学相干层析成像的图像处理方法

Image processing method for ophthalmic optical coherence tomography

中国光学. 2019, 12(4): 731 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0731

文章编号 2095-1531(2021)03-0596-09

针对光栅图像的快速盲去噪方法

张申华[1,2], 杨延西[1,3], 秦峤孟[1]
(1. 西安理工大学 自动化学院, 陕西 西安 710048;
2. 安康学院 电子与信息工程学院, 陕西 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, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于正弦光栅条纹投影的三维测量技术是当前研究的热点问题。然而, 受噪声的影响, 采集到的光栅条纹图像质量降低, 导致提取的相位发生扰动, 而相位的提取结果直接决定着测量结果的准确性。实际测量中噪声未知, 针对这一问题, 本文提出了一种盲去噪方法。首先, 根据残差模型, 完成光栅条纹图像的真值图像与噪声图像的分离, 然后, 引入主成分分析技术估计出噪声图像的方差值。最后, 根据噪声方差的估计值, 利用基于相图的高斯滤波方法, 将针对多帧光栅图像的噪声滤波转换到提取的相位图上完成。由实验结果可知, 和对比方法相比, 本文方法的均方根相位误差最高下降了 88.5%, 所提方法处理后的相位更加接近测量体的真值相位。本文方法可在最短的执行时间内实现对噪声导致的相位扰动进行抑制。所提方法能够快速处理光栅图像噪声引起的相位误差, 在光栅投影测量中具有较强的实用性。

关 键 词: 光栅图像; 盲去噪; 主成分分析; 相位图滤波
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2020-0166

A fast blind denoising method for grating image

ZHANG Shen-hua[1,2], YANG Yan-xi[1,3], QIN Qiao-meng[1]
(1. *College of Automation*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *China*;
2. *College 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: The three-dimensional measurement technology based on the projection of sine grating fringe image is a hot-topic. However, due to the influence of noise, the quality of the captured grating image is worse, resulting in the disturbance of the extracted phase, which directly determines the accuracy of the measurement. Since the noise is unknown in actual measurement, a blind denoising method is proposed in this paper. Firstly, according to the residual model, the grating fringe image is separated into the true value and the noise, then the Principal Component Analysis (PCA) technology is introduced to estimate the variance of the noise. Finally, according to the estimated value of the variance, the filtering on multi-frame fringe images is

收稿日期: 2020-09-11; **修订日期:** 2020-10-21
基金项目: 国家重点研发计划专项(No. 2018YFB1703000); 陕西省重点研发计划项目(No. 2020ZDLGR07-06); 陕西省现代装备绿色制造协同创新中心项目(No. 304-210891702)
Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB1703000); Key R&D Program of Shaanxi Province (No. 2020ZDLGR07-06); Collaborative Innovation Center of Shaanxi Province for Green Manufacturing of Modern Equipment (No. 304-210891702)

replaced by employing Gaussian filtering on the phase map. In contrast to other methods, the results of the proposed method showed that the Root Mean Square Error (RMSE) decreased by 88.5% (up to most), which indicated that the phase values of the proposed method were closer to the ground-truth of the measured object. By employing the proposed method, the phase disturbance caused by noise were significantly suppressed in the shortest execution time. The proposed method can quickly deal with the phase error caused by the noise of the grating image and has strong practicability in the grating image projection measurement.
Key words: grating image; blind denoising; PCA; phase map filtering

1　引　言

由于具有非接触、高精度和快速的优点, 基于正弦光栅条纹投影的相位轮廓术目前被广泛研究。正弦光栅被数字光处理 (Digital Light Procession, DLP) 投影仪投影至被测物体的轮廓上, 经物体外形调制后发生形变, 并被工业相机采集[1-8]。计算出捕获条纹的相位, 借助标定出的参数, 最终可以计算出物体的三维外形轮廓尺寸。然而在测量过程中, 受到环境及工业相机自身的影响, 采集到的光栅图像存在噪声。噪声的存在降低了图像的质量, 影响后续相位的高精度提取, 并最终导致三维测量准确度降低。因此, 有必要对噪声进行处理。在实际应用中, 由于采集到的光栅图像噪声未知, 从而给噪声处理带来了困难。

虽然在数字图像处理领域很多研究人员对去噪问题进行了大量研究[5-7], 对于条纹图像噪声的处理, 主要采用中值滤波的方法[8] 和偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 方法[9-11]。中值滤波方法实现简单, 但是对噪声的抑制效果有限。基于偏微分方程的滤波方法是利用偏微分方程进行数值运算, 逐个像素修改灰度值, 以达到滤除噪声的目的。为了滤除噪声, Wang 提出了一种方向性的相干增强扩散滤波方法[9], 该方法沿条纹水平方向及垂直方向滤波。文献 [10] 提出了一种基于二阶偏微分方程模型的方向性滤波方法, 根据电子散斑干涉条纹的方向滤波。Zhou 对文献 [10] 中的模型进行了改进, 提出了一种自适应的方向性偏微分方程模型[11]。总的来说, 基于 PDE 扩散的滤波方法存在以下不足: (1)该类方法基于扩散的思想, 逐点处理每个像素点, 而相位轮廓术一般需要处理多帧光栅图像, 噪声处理过程耗时; (2)数值计算中的迭代次数、时间步长等参数通常需要反复实验才能确定。

基于噪声水平估计的方法, 是盲噪声处理的重要研究方向[12-18]。该方法一般利用高斯分布模型对未知噪声进行建模, 并获取噪声的方差值。Donoho 利用离散小波变换对信号进行三层分解, 并取对角线系数的中值作为噪声方差的估计值[12]。基于主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 的方法[13-14] 利用单幅图像生成样本块库, 并通过样本块库估算出噪声方差。这种方法在高光谱图像去噪[15]、视频噪声估计[16]、中子图像去噪[17] 及特征提取[19] 等方面得到了应用。但是基于 PCA 的方法估计出来的噪声水平常常偏低[20], 导致利用估计值进行去噪的效果不够理想。

在现有的研究中, 对于图像中的未知噪声, 一般是进行高斯建模[20-22], 基于此, 本文借鉴现有文献的处理方法, 对光栅图像中的噪声进行高斯建模, 并引入 PCA 方法对噪声水平进行估计, 并依据估计结果完成噪声处理。首先, 针对 PCA 估计出的方差水平偏低的问题, 利用残差模型, 提出一种真值图像和噪声图像分离方法, 从含噪光栅图像中分离出噪声图像, 然后对噪声图像进行 PCA 估计。其次, 提出了一种基于相图的噪声滤除方法。该方法利用估计出的噪声方差值, 在展开的相位图上进行高斯滤波, 避免了对多帧光栅条纹分别进行滤波处理, 降低了处理的数据量, 提高了噪声处理的时效性。

2　基于 PCA 的噪声估计方法

在光栅投影测量系统中, DLP 投影仪投影到被测物体上的光栅条纹被工业相机采集, 用符号 $\boldsymbol{f}$ 表示。根据残差模型, $\boldsymbol{f}$ 中包含噪声 $\boldsymbol{n}$ 和未被污染真值条纹图像 $\boldsymbol{r}$, 用公式表示为

$$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{n}+\boldsymbol{r} \quad , \tag{1}$$

式(1)中的噪声$\boldsymbol{n}$为均值为零、方差为$\hat{\sigma}_n$的高斯白噪声。

为了滤除条纹中的噪声，需要首先估算出$\hat{\sigma}_n$。根据 Liu 的分析[14]，在某一向量$\boldsymbol{U}$的方向上有

$$\lambda_{\min}(\boldsymbol{C}_f)=\lambda_{\min}(\boldsymbol{C}_r)+\hat{\sigma}_n^2 \quad , \tag{2}$$

其中$\boldsymbol{C}_f$表示$\boldsymbol{f}$的协方差矩阵，$\boldsymbol{C}_r$表示$\boldsymbol{r}$的协方差矩阵，$\lambda_{\min}$表示求取协方差矩阵的最小特征值。

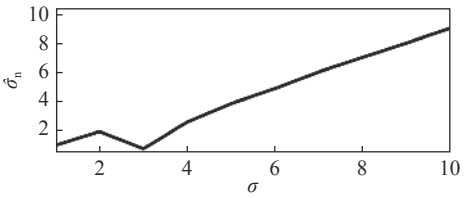
在式(2)中，对于细节信息不丰富的图像，在信息冗余特性的假设下，$\boldsymbol{r}$的数据主要分布在有限主成分分量上。在此前提下，

$$\lambda_{\min}(\boldsymbol{C}_r)=0 \quad . \tag{3}$$

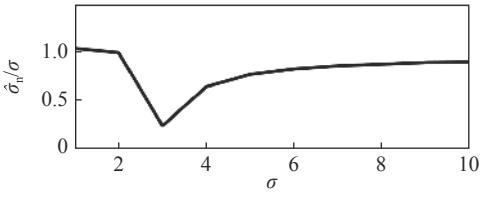
由此，可以估算出噪声的方差值

$$\hat{\sigma}_{\mathbf{n}}^2=\lambda_{\min}(\boldsymbol{C}_f) \quad . \tag{4}$$

研究组成员利用 PCA 方法对仿真光栅条纹进行了噪声方差估计，结果如图 1 所示。由图 1(b) 中的比值曲线可以看出，PCA 方法估计出的方差普遍偏小 (图 1 中σ表示噪声方差的真值，$\hat{\sigma}_{\mathbf{n}}$表示估计值)。



(a) 模拟方差值的估计结果
(a) Estimated results of simulated variance



(b) 估计值与模拟值的比值
(b) The ratio of estimated values and simulated values

图 1 PCA 方法对仿真噪声的估计

Fig. 1 The estimation of simulation noise by PCA method

若选择数据的协方差矩阵大小为 9×9，其各主成分占比如图 2 所示，由图中占比可以看出，后 7 个主成分占比小且极为接近，若仅选择占比最小的主成分对应的特征值作为噪声方差，实际上人为降低了噪声的成分，这是 PCA 方法估计结果偏小的原因。

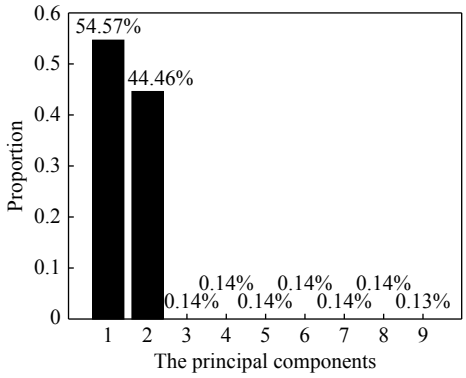


图 2 主成分分量占比

Fig. 2 Proportion of principal component

3 基于残差模型的噪声估计

针对 PCA 估计方法的不足，本文对噪声估计方法进行改进。对式 (1) 中的$\boldsymbol{f}$进行特征值分解，可以得到

$$\boldsymbol{f}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \quad , \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{U}$表示特征值矩阵$\boldsymbol{\Lambda}$对应的特征向量。符号 T 表示转置操作。$\boldsymbol{\Lambda}$为对角矩阵，表示为

$$\boldsymbol{\Lambda}=\begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_M \end{bmatrix} \quad , \tag{6}$$

其中$\lambda_1,\cdots,\lambda_M$表示特征值且以降序排列，其大小代表了各主成分的能量贡献度，M表示$\boldsymbol{f}$的秩。

令各主成分的能量贡献率表示为

$$\tau_i=\lambda_i\Big/\sum_{i=1}^{M}\lambda_i, i=1,\cdots,M \quad , \tag{7}$$

其中$\sum_{i=1}^{M}\lambda_i$表示所有主成分的贡献值。

若令前P项特征值($P<M$)对应的向量为$\boldsymbol{R}_P$,则真值光栅图像可表示为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{R}_P\boldsymbol{R}_P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f} \quad . \tag{8}$$

根据式(1)，噪声图像可以用残差模型表示为

$$\boldsymbol{n}=\boldsymbol{f}-\boldsymbol{R}_P\boldsymbol{R}_P^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f} \quad . \tag{9}$$

根据文献 [12] 的证明，$\boldsymbol{n}$的协方差矩阵最大特征值收敛于$\hat{\sigma}_{\mathbf{n}}^2$，也就是最终的噪声方差估计公式为：

$$\hat{\sigma}_{\mathbf{n}}^2=\lambda_{\max}(\boldsymbol{C}_f) \quad . \tag{10}$$

为了实现式(9)中真值光栅图像与噪声图像

的分离, 需要合理确定P值。假设工业相机的信噪比为d dB, 也就是信号的功率 W_o与噪声功率W_{n}的比例关系为

$$\frac{W_o}{W_{\mathrm{n}}}=10^{\frac{d}{10}} \quad . \tag{11}$$

根据式 (11) 所表示的比例关系, 且所有主成分的能量贡献值为$\sum_{i=1}^{M}\lambda_i$, 又知真值图像的能量贡献与噪声图像的能量贡献比值与W_o/W_{n}相等。由此, 噪声部分的能量贡献值$\sum_{i=P+1}^{M}\lambda_i$可以表示为

$$\sum_{i=P+1}^{M}\lambda_i=\frac{\sum_{i=1}^{M}\lambda_i}{10^{d/10}+1} \quad . \tag{12}$$

若某一成分的特征值λ_i满足

$$\lambda_i>\frac{\sum_{i=1}^{M}\lambda_i}{10^{d/10}+1}, i=1,\cdots,M \quad , \tag{13}$$

则可以将该主成分分量划归到真实光栅图像$\boldsymbol{r}$, 否则, 该主成分分量划归到噪声图像$\boldsymbol{n}$。

根据式(13)将满足条件的最大i值, 设定为P值, 即可实现式(9)中噪声图像与真值图像的分离。

4　基于相位图的高斯去噪

为了降低数据处理量, 减少处理时间, 本文提出了基于相位图的高斯去噪方法。在相移法测量中, 通常需要投影和采集多幅光栅图像。以 4 步相移法为例, 投影的 4 幅光栅条纹为

$$\begin{cases} f_0=A+B\cos(\phi) \\ f_1=A+B\cos(\phi+\pi/2) \\ f_2=A+B\cos(\phi+\pi) \\ f_3=A+B\cos(\phi+3\pi/2) \end{cases} , \tag{14}$$

其中A表示平均分量, B表示调制度, ϕ表示相位。

若工业相机采集到多帧光栅图像后, 再对每一幅图像进行去噪, 无疑会大大增加要处理的数据量和时间。为此, 本文将光栅图像上的噪声处理转换到相图上进行。

本文采用三频外差法[23] 展开包裹相位, 需要投影的光栅条纹的光栅频率分别为$F_1=\sqrt{s}+s+1$, $F_2=s, F_3=s-\sqrt{s}$, 其包裹相位分别用ψ_1,ψ_2,ψ_3表示。通常, 取$s=64$, 首先由ψ_1和 ψ_2做外差, 得到频率为$\sqrt{s}+1$的包裹相位ψ_{12}, 再由ψ_2和ψ_3做外差, 得到频率为$\sqrt{s}$的包裹相位ψ_{23}, 然后由ψ_{12}和 ψ_{23}做外差, 得到频率为 1 的相位ψ_{123}, 最后, 利用式 (15) 和式 (16), 通过中间展开相位$\varphi_{\sqrt{s}+1}$即可得到ψ_1的最终展开相位ϕ。

$$\varphi_{\sqrt{s}+1}=\psi_{12}+2\pi\cdot floor\left(\frac{\left(\sqrt{s}+1\right)\psi_{123}-\psi_{12}}{2\pi}\right) \quad , \tag{15}$$

$$\phi=\psi_1+2\pi\cdot floor\left(\frac{\left(\sqrt{s}+s+1\right)/(\sqrt{s}+1)\varphi_{\sqrt{s}+1}-\psi_1}{2\pi}\right) . \tag{16}$$

在式 (15) 和式 (16) 中, 相位$\psi_1,\psi_{12},\psi_{123}$取值在$(-\pi,\pi)$之间, 而$\varphi_{\sqrt{s}+1}$和 ϕ的取值范围一般远大于该取值, 因此, 可以对式 (15) 和式 (16) 做如下近似:

$$\varphi_{\sqrt{s}+1}=\left(\sqrt{s}+1\right)\psi_{123} \quad , \tag{17}$$

$$\phi\approx\left(\sqrt{s}+s+1\right)/(\sqrt{s}+1)\varphi_{\sqrt{s}+1} \quad . \tag{18}$$

在仅考虑零均值的高斯噪声影响下, 时域上光栅条纹的噪声方差σ_{n}和展开相位图ϕ的方差σ_1及相移步长N、调制度B之间关系为[24]

$$\sigma_1=\sqrt{\frac{2}{N}}\frac{\sigma_n}{B} \quad . \tag{19}$$

根据方差的性质, 依据式 (17) 和式 (18) 所表示的比例关系, 相位$\varphi_{\sqrt{s}+1}$和 ψ_{123}的方差分别为

$$\sigma_2=\left(\sqrt{s}+s+1\right)/(\sqrt{s}+1)\sigma_1 \quad , \tag{20}$$

$$\sigma_3=\sigma_1/\left(\sqrt{s}+s+1\right) \quad . \tag{21}$$

利用式 (19)~式 (21), 分别对相位图ψ_{123}, $\varphi_{\sqrt{s}+1}$和 ϕ等 3 帧相位图进行高斯滤波, 即可达到滤除噪声的目的。若直接对每帧光栅进行滤波, 则至少需要处理 9 帧图像。由此可以看出, 所提基于相位图的去噪方法, 处理的数据量大为减少。

5　实验测试

图 3 为本文搭建的光栅投影测量平台结构图, 其主要由投影仪、工业相机及便携式计算机组成, 主要参数如表 1 所示。实验首先投影 12 帧

正弦光栅条纹图像，并由同步信号触发控制工业相机完成光栅图像的采集。利用采集的光栅条纹图像，对本文所提方法和对比方法进行了测试。

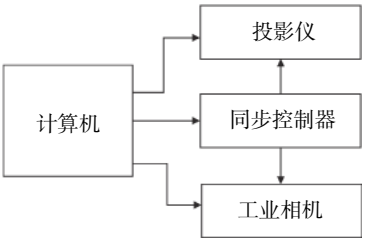


图 3 测量系统结构图

Fig. 3 Framework of measuring system

表 1 仪器设备型号和参数

Tab. 1 The instrument types and parameters

仪器设备	型号	主要性能及参数
投影仪	DLP4500	分辨率912 pixel×1 140 pixel
工业相机	MV-UB130M	分辨率1 024 pixel×1 280 pixel 曝光时间: 200 ms 帧率: 30 frame/s 信噪比: 45 dB
电脑	Intel Core (TM) i5-8250U CPU	主频: 1.6 GHz

在测量平台上采集到的 12 帧光栅图像中选取一帧，如图 4(彩图见期刊电子版)所示。利用本文提出的方法和对比方法进行噪声方差估计后，分别进行噪声处理。各种对比方法的噪声估计值如表 2 所示。

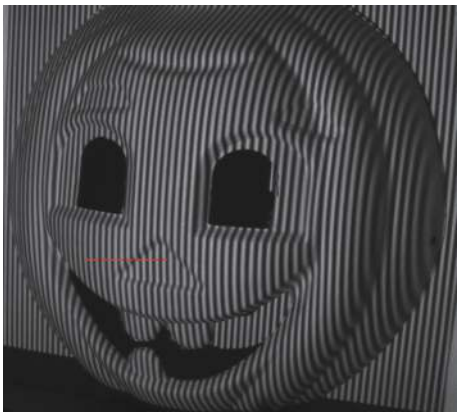


图 4 采集的光栅图像

Fig. 4 Captured grating image

表 2 各种方法的噪声方差估计值

Tab. 2 The estimated noise variances of different methods

方法	文献[5]方法	文献[7]方法	文献[8]方法	本文方法
估计值	–	3.373 7	1.602 5	2.782 3

为了验证本文方法的估计效果，利用表 2 的估计值对图 4 的光栅图像进行噪声滤除，效果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。对 12 帧光栅图像采用文献 [10] 的方法分别进行方向性 PDE 滤波后，提取出的相位图如图 5(a)所示。实验中时间步长设置为$\Delta t = 0.1$ s，迭代次数$N = 75$(实验参数非最优设置)。对光栅图像采用中值滤波后，利用相移法得到的相位图如图 5(b) 所示，实验中滤波模板大小设置为 3×3。首先采用文献 [12] 提出的方法估计出噪声方差，然后，利用估计值对光栅图像进行高斯滤波处理，处理后的相位图如图 5(c) 所示，实验中先采用 db2 小波对光栅图像进行三层分解，然后求取第三层分量的对角系数，计算出其中间值与 0.674 5 的比值，最后将计算出的比值作为噪声方差的估计值。采用文献 [13] 中提出的 PCA 方法对单帧光栅图像估计出噪声方差后，再利用估计值对采集到的每帧光栅图像进行高斯滤波，结果如图 5(d) 所示。利用本文方法先估计出单张条纹图像的方差值，再进行相图滤波后提取的相位结果如图 5(e) 所示。图 5(f) 是投影相移步长为 20 的正弦条纹，然后利用相移法和三频外差法获得的相位图。

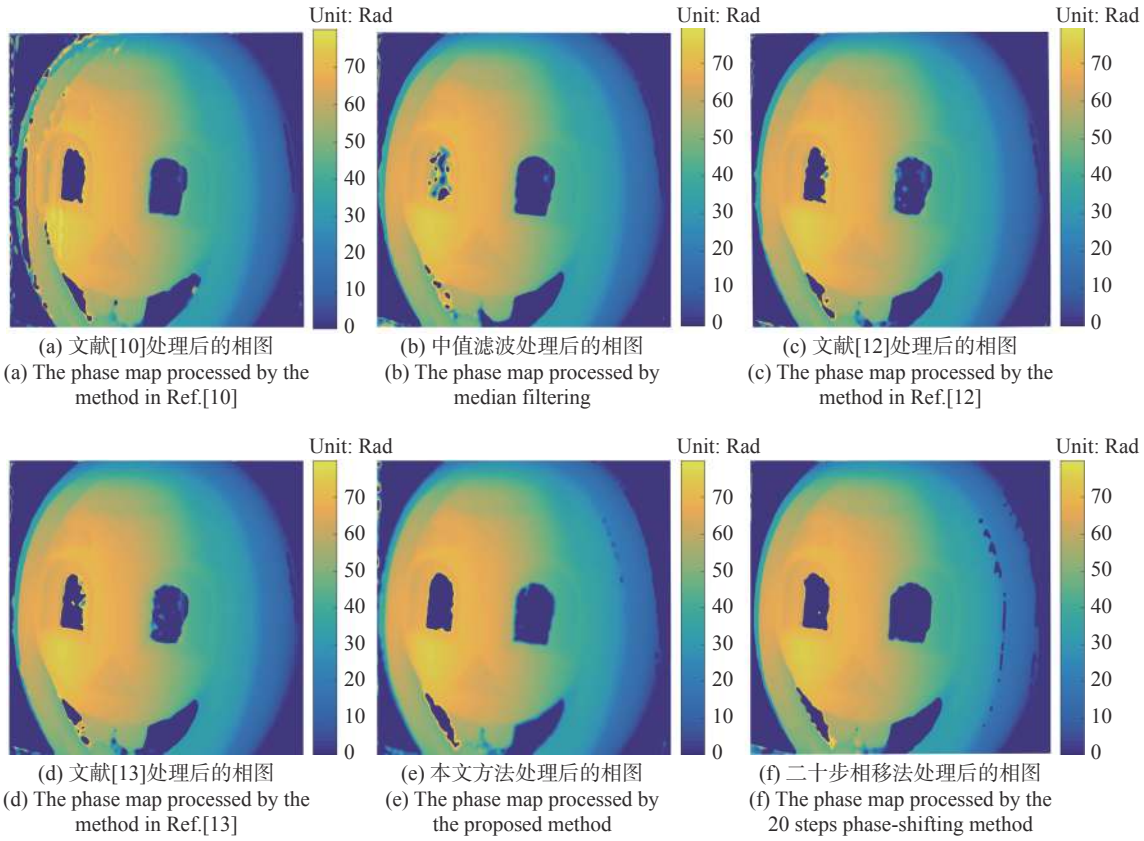
对于图 4 中红色虚线标定的一行区域，以二十步相移法获取的相位为基准，采用其他方法计算出的相位与基准相位取差值，相位差值曲线如图 6(彩图见期刊电子版)所示。由相位差曲线可知，和其他对比方法相比，本文方法处理后的相位更加逼近真实相位。本文将二十步相移法获取的相位作为测量体的真值相位并将其作为基准相位。这样设置的依据如下：根据式 (19)，增大相移步数N能够有效降低相位差的方差值，并且在现有的文献研究中，一般采用二十步相移法[25-26]或四十八步相移法[27]作为测量体的真值，因此，本文采用同样的处理方法获取测量真值。

为了定量评估本文所提方法的性能，定义最大相位误差 (Maximum Phase Error, MPE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 作为评价指标，其中MPE表征相位值偏离真值的最大幅度，RMSE表示相位和真值相位的逼近程度，定义分别为：

$$MPE = \max\left(\left|\phi' - \phi_0'\right|\right) \quad , \tag{22}$$

$$RMSE = \frac{1}{L}\sqrt{\sum(\phi' - \phi'_0)^2} \quad , \qquad (23)$$

式中ϕ'表示采用各种方法处理后的相位，ϕ'_0表示被测体的真值相位，L表示相位点个数。



(a) 文献[10]处理后的相图
(a) The phase map processed by the method in Ref.[10]

(b) 中值滤波处理后的相图
(b) The phase map processed by median filtering

(c) 文献[12]处理后的相图
(c) The phase map processed by the method in Ref.[12]

(d) 文献[13]处理后的相图
(d) The phase map processed by the method in Ref.[13]

(e) 本文方法处理后的相图
(e) The phase map processed by the proposed method

(f) 二十步相移法处理后的相图
(f) The phase map processed by the 20 steps phase-shifting method

图 5　几种不同方法的滤波效果

Fig. 5　Filtering effect obtained by different methods

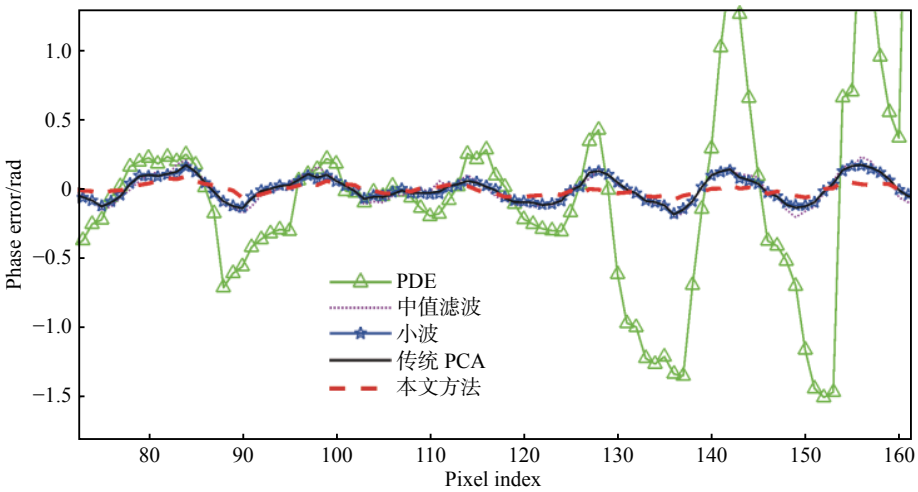


图 6　各种方法的相位差

Fig. 6　Phase errors obtained by different methods

任意选取测量体的第 150 行相位，计算出各种方法的MPE、RMSE及执行时间，结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 和表 4 的数据可以看出，在最短的运行时间内，本文方法的RMSE值较中值滤波、PDE、小波和传统 PCA 相比，分别下降了 38.6%、88.5%、42.6% 和 43.1%。表明本文方法

的相位更加接近测量体的真值相位，对噪声抑制效果最好。需要说明的是，受采集角度和光源等因素影响，光栅图像存在阴影区域，导致区域内的相位信息丢失。对阴影区域采用 PDE扩散滤波后，错误的像素信息会经过扩散传导至正常的光栅区域，导致测量结果发生错误。如表 3 所示，PDE 方法的相位最大偏离幅度达9.2343 rad，因此，当测量体轮廓不连续时，PDE方法噪声处理效果不好，同时，耗时也最久。对于最大相位误差值，中值滤波方法的MPE值为0.3856 rad，小于本文方法的 0.7003 rad。这是由于测量过程中光栅图像存在孤立噪声点，而中值滤波在处理这类噪声时的性能要优于本文方法，但是中值滤波的相位平均运算会导致在物体轮廓不连续区域产生明显的错误相位（如图 5(b) 中面具左眼区域）。

表 3 几种算法的量化指标对比

Tab. 3 Comparison of quantitative indicators for different methods

	中值滤波方法	Ref.[10]方法	Ref.[12]方法	Ref.[13]方法	本文方法
MPE	0.3856	9.2343	1.8268	1.7301	0.7003
RMSE	0.0961	0.5122	0.1029	0.1038	0.0591

表 4 几种算法的执行时间对比

Tab. 4 Comparison of computing time for different methods (s)

对比方法	中值滤波方法	Ref.[10]方法	Ref.[12]方法	Ref.[13]方法	本文方法
执行时间	16.12	758.36	7.18	11.67	6.74

由相移法提取相位，一般通过求反正切函数计算出包裹相位，且至少需要 3 帧光栅图像才能计算出包裹相位。本文方法在估计噪声方差时，为了提高时效性，任意选取其中的一帧光栅图像估计方差值。这是由于在测量平台上，光栅图像在数秒内甚至更短的时间内完成投影和采集，噪声方差这一统计值在较短的时间内能够维持稳定。

6 结 论

光栅条纹投影测量过程中，由于采集到的光栅条纹图像存在噪声，且噪声未知，从而导致提取的相位精度降低，甚至出现错误。针对这一情况，本文提出了一种快速盲去噪方法。首先，利用残差模型和相机参数，提出了一种光栅图像的噪声和真值图像分离方法，并引入 PCA 对噪声图像进行噪声水平估计，克服了传统 PCA 方法估计结果偏低的问题。为了减少噪声处理的数据量，提出了基于相位图的高斯去噪方法，利用式 (19)~式 (21) 所描述的时域噪声方差与相位图方差间的关系，将在时域上的光栅图像去噪转换至在相位图上进行。转换后，需要处理的光栅图像帧数减少到 3 帧，处理数据量大为减少，处理时间变短。测试实验结果表明，和对比方法相比，本文方法可在最短的执行时间内，使光栅图像相位的 RMSE 值最高下降 88.5%，所提方法对噪声的抑制最为明显，处理后的相位图更加接近真值相位。

需要指出的是，本文方法将随机选取的一帧光栅条纹图像的噪声方差估计值作为所有采集图片的噪声方差值。这样处理的前提条件是：在光栅条纹图像投影测量过程中，采集到的每帧光栅图像的噪声方差值应基本保持稳定，这也是本文方法有效的条件。

参考文献：

[1] 王建华, 杨延西. 基于彩色编码光栅投影的双N步相移轮廓术[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 616-627.
WANG J H, YANG Y X. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 616-627. (in Chinese)

[2] 张申华, 杨延西. 一种针对投影仪gamma效应的相位误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 1-8.
ZHANG SH H, YANG Y X. A phase error compensation method for the gamma effect of projector[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(11): 1-8. (in Chinese)

[3] 邓吉, 李健, 封皓, 等. 不连续相位跳变点的三维深度分割[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(11): 2459-2466.
DENG J, LI J, FENG H, *et al*.. Three-dimensional depth segmentation technique utilizing discontinuities of wrapped phase sequence[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2459-2466. (in Chinese)

[4] 丁超, 唐力伟, 曹立军, 等. 深孔内表面结构光图像几何畸变校正[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(10): 2555-2564.

DING CH, TANG L W, CAO L J, *et al*.. Geometric distortion correction for structured-light image of deep-hole inner-surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2555-2564. (in Chinese)

[5] 韩玉兰, 赵永平, 王启松, 等. 稀疏表示下的噪声图像超分辨率重构[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(6): 1619-1626.
HAN Y L, ZHAO Y P, WANG Q S, *et al*.. Reconstruction of super resolution for noise image under the sparse representation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1619-1626. (in Chinese)

[6] 谢斌, 黄安, 黄辉. 本征图像分解的稀疏表示彩色图像去噪算法[J]. 液晶与显示, 2019, 34(11): 1104-1114.
XIE B, HUANG A, HUANG H. Color image denoising algorithm based on intrinsic image decomposition and sparse representation[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(11): 1104-1114. (in Chinese)

[7] 马逸东, 周顺勇. 基于连通性检测的图像椒盐噪声滤波算法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(2): 167-172.
MA Y D, ZHOU SH Y. Salt and pepper noise filtering algorithm based on connectivity detection[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(2): 167-172. (in Chinese)

[8] WANG J H, YANG Y X. An efficient phase error self-compensation algorithm for nonsinusoidal gating fringes in phase-shifting profilometry[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2018, 89(6): 063115.

[9] WANG H X, QIAN K M, GAO W J, *et al*.. Fringe pattern denoising using coherence-enhancing diffusion[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1141-1143.

[10] TANG CH, HAN L, REN H W, *et al*.. Second-order oriented partial-differential equations for denoising in electronic-speckle-pattern interferometry fringes[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(19): 2179-2181.

[11] ZHOU Q L, TANG CH, LI B Y, *et al*.. Adaptive oriented PDEs filtering methods based on new controlling speed function for discontinuous optical fringe patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 111-117.

[12] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, 81(3): 425-455.

[13] PYATYKH S, HESSER J, ZHENG L. Image noise level estimation by principal component analysis[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(2): 687-699.

[14] LIU X H, TANAKA M, OKUTOMI M. Single-image noise level estimation for blind denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 5226-5237.

[15] 汪浩然, 夏克文, 任苗苗, 等. 结合PCA及字典学习的高光谱图像自适应去噪方法[J]. 计算机应用, 2016, 36(12): 3411-3417, 3422.
WANG H R, XIA K W, REN M M, *et al*.. Adaptive denoising method of hyperspectral remote sensing image based on PCA and dictionary learning[J]. *Journal of Computer Applications*, 2016, 36(12): 3411-3417, 3422. (in Chinese)

[16] 肖进胜, 朱力, 赵博强, 等. 基于主成分分析的分块视频噪声估计[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1618-1625.
XIAO J SH, ZHU L, ZHAO B Q, *et al*.. Block-based video noise estimation algorithm via principal component analysis[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(9): 1618-1625. (in Chinese)

[17] 乔双, 吴晓阳, 赵辰一, 等. 基于PCA和BM3D的噪声估计方法及其在中子图像去噪中的应用[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 729-736.
QIAO SH, WU X Y, ZHAO CH Y, *et al*.. Noise level estimation method based on PCA and BM3D for neutron image denoising[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(4): 729-736. (in Chinese)

[18] 杨华. 基于稀疏主成分分析的图像噪声估计方法[J]. 液晶与显示, 2019, 34(9): 913-920.
YANG H. Image noise estimation method based on sparse principal component analysis[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(9): 913-920. (in Chinese)

[19] 叶杨, 徐志伟, 陈仁文, 等. 基于KPCA和SVM的直升机旋翼桨叶损伤源定位[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 118-123.
YE Y, XU ZH W, CHEN R W, *et al*.. Damage source location of helicopter rotor blade based on KPCA and SVM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(4): 118-123. (in Chinese)

[20] 吴疆, 尤飞, 蒋平. 基于回归分析和主成分分析的噪声方差估计方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5): 1195-1201.
WU J, YOU F, JIANG P. Noise variance estimation method based on regression analysis and principal component analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(5): 1195-1201. (in Chinese)

[21] ZUO CH, HUANG L, ZHANG M L, *et al*.. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.

[22] JIANG P, WANG Q, WU J. Efficient noise-level estimation based on principal image texture[J]. *IEEE Transactions on*

Circuits and Systems for Video Technology, 2020, 30(7): 1987-1999.

[23] TOWERS C E, TOWERS D P, JONES J D C. Absolute fringe order calculation using optimised multi-frequency selection in full-field profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(7): 788-800.

[24] ZUO CH, FENG SH J, HUANG L, *et al*.. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.

[25] MAO C L, LU R S, LIU Z J. A multi-frequency inverse-phase error compensation method for projector nonlinear in 3D shape measurement[J]. *Optics Communications*, 2018, 419: 75-85.

[26] ZHANG CH 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(3): 035201.

[27] GAI SH Y, DA F P, LIU CH. Multiple-gamma-value based phase error compensation method for phase measuring profilometry[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10290-10299.

作者简介：

张申华(1982—)，河南信阳人，2010 年于西北大学获得硕士学位，现为西安理工大学博士研究生，主要研究方向为光学测量。E-mail: zhang_shenhua@126.com

杨延西(1975—)，山东郓城人，博士，教授，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