

# 基于多尺度 Retinex 算法的光干涉条纹图像增强

胡一冰, 唐晨\*, 陶珊

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 提出了一种基于多尺度 Retinex 算法的光干涉条纹图像增强算法, 论述了该算法的原理以及实现过程。选取了大、中、小三种不同尺度, 结合各个尺度的优点, 针对光学干涉条纹图的特点, 对不同的尺度取不同的权重。与两种常用的光学图像增强方法进行对比实验, 并通过主观和客观的评价进一步说明本方法的有效性。实验结果表明, 对于对比度低且光照不均匀的光干涉条纹图像, 所提算法可以显著提高图像的可视性, 改善光照不均匀的问题, 克服照度不均匀给条纹图后续处理带来的困难。

**关键词** 图像处理; 图像增强; 光干涉条纹图; 照度不均匀; 多尺度 Retinex

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.241006

## Enhancement of Optical Interferometry Fringe Patterns Based on Multiscale Retinex Algorithm

Hu Yibing, Tang Chen\*, Tao Shan

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** An algorithm is proposed to enhance the optical interferometry fringe patterns based on the multiscale Retinex algorithm, and its principle and implementation are described. Three different scales, i. e., large, medium, and small, are selected, and the advantages of each scale are combined. Further, different weights are considered for different scales according to the characteristics of the optical interferometry fringe patterns. Subsequently, the proposed method is compared with two commonly used optical interferometry fringe pattern enhancement methods by the experiment, and the effectiveness of the proposed method is demonstrated through subjective and objective evaluations. The experimental results denote that the algorithm proposed in this study can significantly improve the visibility of the fringe patterns exhibiting low contrast and overcome the difficulty associated with the subsequent processing of fringe patterns owing to uneven illumination.

**Key words** image processing; image enhancement; optical interferometry fringe patterns; uneven illumination; multi-scale Retinex

**OCIS codes** 100.2980; 110.6150; 260.3160; 280.4788

## 1 引言

近年来,随着激光技术和计算机技术的发展,产生了以全息干涉法、电子散斑干涉法和数字处理技术为主要研究和应用内容的现代光测技术。现代光测技术具有无损、非接触、全场观测、高灵敏度等优点,广泛应用于科研及振动测量、位移测量等工程应用中<sup>[1-2]</sup>。从条纹图中准确地提取出相位是获取物体形变位移信息的关键<sup>[3]</sup>,然而在实际实验中,受实

验环境和实验设备的限制,有时会获得照度不均匀的条纹图像,而且在电子散斑干涉实验中获得的电子散斑干涉条纹图(ESPI)的对比度很低。对比度低和照度不均匀会影响条纹图后续的滤波、二值化和提取骨架线的结果,影响相位的准确提取。因此,要从条纹图中准确提取相位就必须提高条纹的对比度。

目前,不少国内外专家对光干涉条纹图像的滤波进行了大量的研究,但单纯的关于光干涉条纹图

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-06-09; 录用日期: 2019-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(11772081)

\* E-mail: tangchen@tju.edu.cn

像对比度增强方面的研究相对较少。直方图均衡化方法(HE)是常用的传统的图像增强方法,它通过调整灰度值的分布来提高图像的对比度。文献[4]和[5]中将直方图均衡化方法引入到光学条纹的图像中,分别对杨氏干涉条纹和全息干涉振动条纹进行增强,提高了条纹的对比度。小波变换在空间域和频域都具有表征信号局部特征的能力和分辨率分析的特点,在图像处理领域中得到了广泛应用。文献[6]中提出了一种用于条纹图像增强的二维双树复小波变换方法,该方法的实质是对条纹图像的噪声进行滤波来达到增强的目的,而非单纯的对比度增强。常微分方程方法<sup>[7]</sup>(DE)是一种灵活的条纹增强方法,具有降低噪声、提高条纹对比度的优点,在条纹增强中得到了广泛的应用。虽然上述常用的图像增强方法可以在一定程度上提高条纹图像对比度,但它们都仅仅考虑对比度低的情况。然而实验得到的光干涉条纹图像有时会出现照度不均匀的问题。

近年来,基于人眼视觉系统的 Retinex 图像增强方法备受关注,它可以减弱入射光对图像的影响,被广泛应用于低照度图像增强<sup>[8]</sup>、夜间图像增强<sup>[9-10]</sup>、雾天图像增强<sup>[11]</sup>、医学图像增强<sup>[12]</sup>和红外图像增强<sup>[13-14]</sup>等各种自然图像增强中。

针对光干涉条纹图像出现照度不均匀的问题,将 Retinex 算法引入到光学图像领域,提出一种基于多尺度 Retinex 算法的光干涉条纹图像增强方法。选择大、中、小三种不同尺度参数对图像进行亮度估计,得到不同亮度图像,结合光干涉条纹图像的特点,在求得反射图像时对不同尺度加以不同权重。实验结果表明,所提方法不仅能够提高光干涉条纹图像的对比度,还能减小照度不均匀的程度,且实验结果从定量定性两方面均可以明显看出所提方法的优越性。

## 2 基本原理

### 2.1 Retinex 理论基础模型

Retinex 是 retina(视网膜)和 cortex(大脑皮层)的组词,其理论最早由 Land 等<sup>[15]</sup>提出,它以人类视觉感知系统的色彩一致性为理论基础。Retinex 的基本思想是将原始图像分解成入射光图像和反射图像两部分,其中入射光图像决定了图像的动态范围,反射图像代表图像本质特征。该理论的核心在于去除或降低入射光图像的影响,得到反射图像,即增强图像。Land<sup>[16]</sup>提出一种中心/环绕

Retinex 算法,是目前较常用的方法,从它发展而来的方法包括单尺度 Retinex 算法<sup>[17]</sup>、多尺度 Retinex 算法<sup>[18-19]</sup>和多尺度彩色恢复 Retinex 算法<sup>[20]</sup>等。

Retinex 理论模型是在假设全局光照缓慢变化的情况下,把观察到的图像定义为亮度图像和反射图像的乘积,即

$$S(m, n) = R(m, n) \times L(m, n), \quad (1)$$

式中: $(m, n)$ 为图像的像素点; $S(m, n)$ 为观察者或相机接收到的视觉图像; $R(m, n)$ 为包含物体本质特征的反射图像; $L(m, n)$ 为亮度图像,它决定了一幅图像的动态范围。Retinex 理论的模型示意图如图 1 所示。

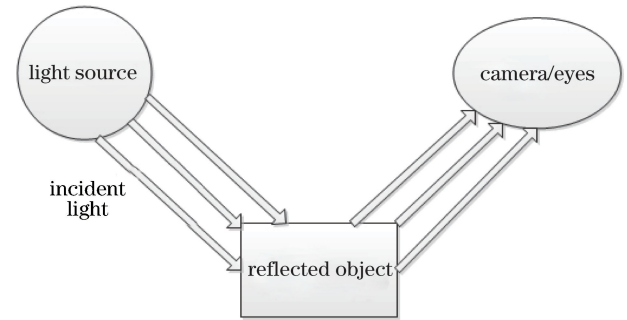


图 1 Retinex 模型示意图

Fig. 1 Retinex model diagram

为了简化模型,通常在对数域中进行计算,在对数域中可以把复杂的乘法运算转换成简单的加减运算;同时,对数形式可以更接近人类视觉系统对亮度的感知能力。将(1)式两边分别取对数,即

$$s(m, n) = r(m, n) + l(m, n), \quad (2)$$

式中: $s(m, n) = \ln[S(m, n)]$ ;  $r(m, n) = \ln[R(m, n)]$ ;  $l(m, n) = \ln[L(m, n)]$ 。

由(2)式通过简单的减法运算,便可以得到反射图像:

$$r(m, n) = s(m, n) - l(m, n). \quad (3)$$

从数学角度来讲,由于亮度图像和反射图像都是未知量,因此不能直接求取其中任何一个量。要求出反射图像,就需首先解决如何得到亮度图像的问题。

### 2.2 基于多尺度 Retinex 的光干涉条纹图像增强模型

中心/环绕 Retinex 方法的核心思想是通过选取合适的环绕函数来确定邻域像素的权重,然后利用当前像素领域内像素值加权替代当前的像素值。多尺度 Retinex 算法是从该方法发展而来的一种常用方法,许多学者对该方法进行了研究。文献[21]中提出了一种快速多尺度 Retinex 算法,简化了参

数选择,提高了运行效率;方帅等<sup>[22]</sup>基于小波变换与图像融合策略提出了改进的多尺度 Retinex 算法,用于平衡颜色保真和图像细节增强的关系;王科俊等<sup>[23]</sup>提出基于窗口无关均值滤波的多尺度 Retinex 算法,引入数组储存窗口数字,解决了多尺度 Retinex 算法中多次使用高斯卷积造成的运算速度低的问题。

多尺度 Retinex 算法是通过多种尺度进行加权求和,但是当尺度小于 3 时,增强效果不理想;当尺度大于 3 时,增强效果没有显著提高,且算法效率降低,所以一般采用大、中、小 3 种尺度。多尺度 Retinex 对灰度图像的处理效果很好,不仅可以很好地增强细节,而且可以更好地实现图像动态范围压缩。本文方法选择大、中、小 3 种尺度,采用高斯模板作用在原始图像上来模拟光照图像,能够结合不同尺度的优点,提高光干涉条纹图像的对比度,增强暗区细节。

提出的基于多尺度 Retinex 的光干涉条纹图像增强的计算表达式为

$$r_{MSR}(m, n) = \sum_{i=1}^3 \omega_i \{s(m, n) - \ln[S(m, n) * M_i(m, n)]\}, \quad (4)$$

式中: $r_{MSR}(m, n)$ 为要得到的反射图像; $\omega_i$ 为对第  $i$  个尺度的权重因子,且  $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ 。权重因子可以调节图像的亮度,针对不同的光干涉条纹图像采取不同的权重因子以得到更好的增强效果,具体参数在实验部分给出。 $M_i(m, n)$ 是高斯滤波函数,表达式为

$$M_i(m, n) = K_i \exp\left[-\frac{(m^2 + n^2)}{\sigma_i^2}\right], \quad (5)$$

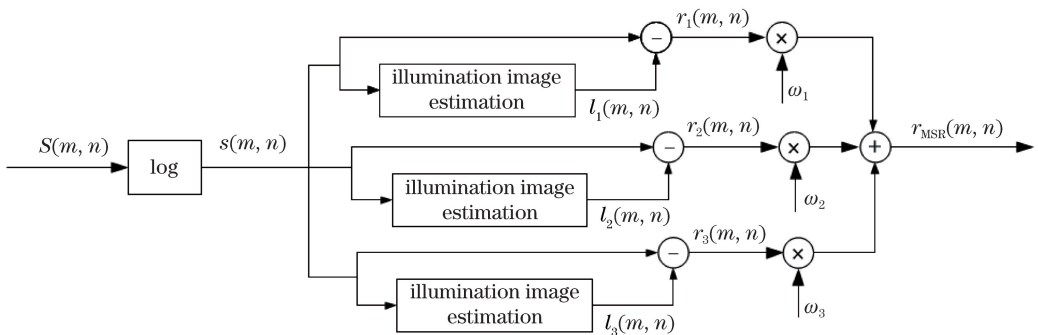


图 2 本文算法流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

### 3 实验结果与分析

选择 4 幅具有不同程度照度不均匀性的光学干

式中: $K_i$ 为常数,它需要满足  $\iint M_i(m, n) dm dn = 1$ ;  $\sigma_i$ 为尺度参数,尺度参数的选择直接影响了增强效果。 $\sigma$ 的值越小,当前像素受到周围像素的影响越大,图像的动态范围越大,可以更好地体现图像亮度较暗处的细节; $\sigma$ 的值越大,周围像素的影响就会减小,图像动态压缩能力减弱,对图像的局部细节会有所影响。

基于多尺度 Retinex 算法的光干涉条纹图像的实验步骤如图 2 所示。

1) 将输入光干涉条纹图像归一化。归一化的主要目的是减少传感器噪声等造成的图像缺陷,它是一个像素级的操作过程,不会影响图像的条纹的清晰度。采用的归一化公式为

$$G(m, n) = \begin{cases} M_s + \sqrt{\frac{N_s \times (I(m, n) - M)^2}{N}}, & \text{if } I(m, n) > M \\ M_s - \sqrt{\frac{N_s \times (I(m, n) - M)^2}{N}}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $G(m, n)$ 为在  $(m, n)$  处的归一化后的灰度值; $I(m, n)$ 为条纹图像在像素  $(m, n)$  处的灰度值; $M$ 和  $N$ 分别为输入条纹图像的均值和方差; $M_s$ 和  $N_s$ 为期望的平均值和方差。

2) 设定大、中、小 3 个不同尺度  $\sigma$  值,从而确定(5)式的高斯函数,利用确定的高斯函数对原始图像作卷积,得到滤波后的 3 幅图像。

3) 对步骤 2) 得到的 3 幅图像,选择不同的权重因子进行求和,将结果图像放在对数域中处理。

4) 将原始图像与步骤 3) 所得的图像在对数域中相减,得到最终结果图像  $r_{MSR}(m, n)$ 。

涉条纹图,如图 3 所示。图 3(a)、(b)是 2 幅电子散斑干涉条纹图,描述了在不同加载条件下核级石墨三点弯曲的平面内位移导数;图 3(c)、(d)分别是迈



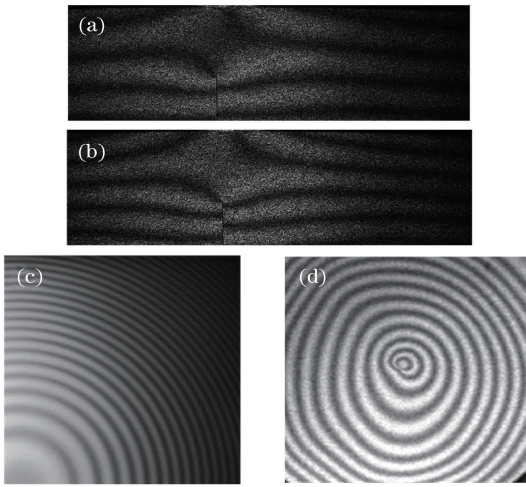


图3 照度不均匀光干涉图像

Fig. 3 Optical interferometry fringe patterns with uneven illumination

克耳孙干涉条纹图和全息干涉图。选择文献[5]和文献[7]中对应的直方图均衡化方法以及常微分方程增强方法进行对比实验,仿真在 MATLAB R2016b 平台上实现(处理器为 Inter CORE 四核,主频为3.4 GHz,内存为4 GB),分为主观评价和客

观评价。此外,将增强结果进行二值化,得到的结果进一步体现了本文方法的优越性。

### 3.1 主观视觉对比

由于电子散斑干涉实验得到的条纹图对比度低且暗处的条纹几乎不可见,因此调整了权重参数,使得暗区条纹在增强之后得到更好的显现,对于迈克耳孙干涉条纹图和全息干涉图照度不均匀程度较小的采用加权平均的方式计算。

图 4(a)和图 5(a)是原始图像,它们的右半部分亮度过暗,几乎看不到条纹。图 4(b)和图 5(b)是用 HE 方法得到的增强图像,整个图像的亮度有了很大的提高,位于暗处的条纹也可以显现出来,但整个图像变得过亮,且图像右端的亮度仍略低于其他位置的亮度。图 4(c)和图 5(c)是用 DE 方法得到的增强图像,条纹的对比度和可视性都得到了提高,但是增强之后暗区的条纹有部分缺失。图 4(d)和图 5(d)是本文方法获得的,可以看到增强后图像对比度提高,且暗处的条纹完整且清晰。对比发现,本文方法在提高对比度的同时,几乎消除了照度不均匀的现象,条纹也更清晰。

在图 6(a)中,环中心黑斑的亮度比远处条纹的

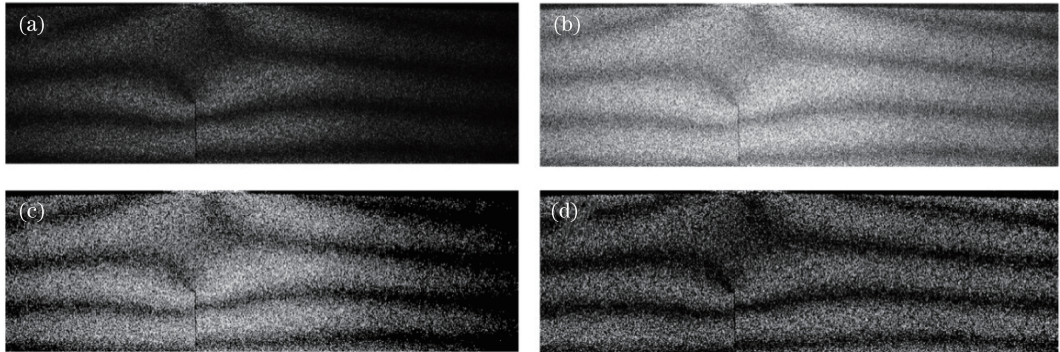


图4 第1幅光干涉条纹图增强结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 4 Enhanced results of the first optical interferometry fringe pattern. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

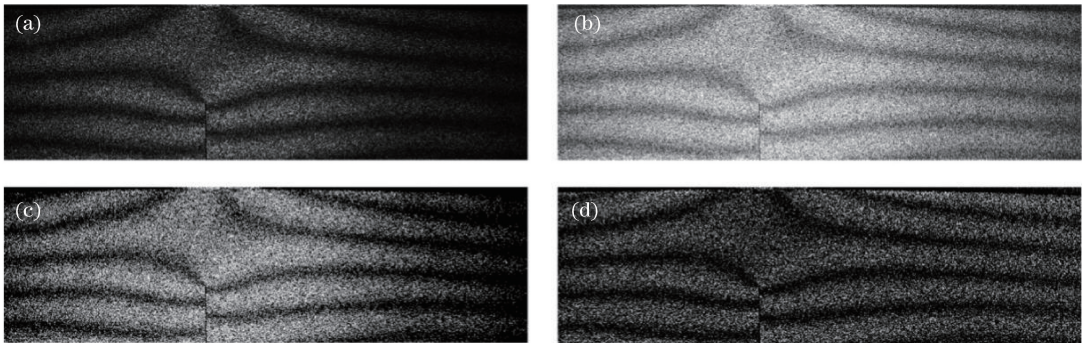


图5 第2幅光干涉条纹图增强结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 5 Enhanced results of the second optical interferometry fringe pattern. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method



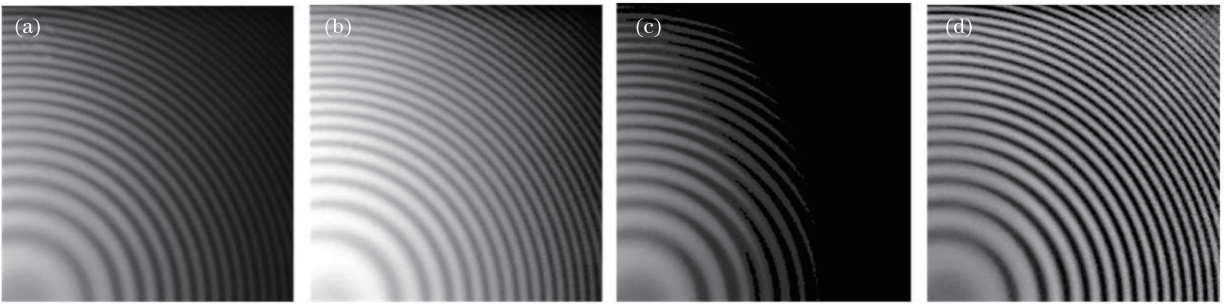


图 6 第三幅光干涉条纹图增强结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 6 Enhanced results of the third optical interferometry fringe pattern. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

亮度要高,使得明暗条纹难以区分。经过几种方法增强之后;HE 方法在一定程度上减缓了照度不均匀性,提高了右上暗处一部分条纹的对比度,但同时也增加了中心暗斑的亮度;DE 方法只是增强了原始条纹图案中相对明亮的部分,而较暗的部分被过度拉伸,条纹几乎不可见,照度不均匀程度加大;本文方法得到的结果可以明显地看出原始图像中暗区的条纹几乎全被复原出来,条纹对比度提高了很多,

照度不均匀性也几乎被消除。

图 7(a)为原始图像,照度不均匀的程度较低,但是人眼还是可以分辨出图像的右下部分要比其他部分亮。用同样的增强方法进行增强之后,HE 方法和 DE 方法虽然提高了对比度,但同时也增大了图像照度的不均匀程度,这不是理想的结果。而经过本文方法增强后的全息干涉图显示,用人眼几乎观察不到照度不均匀的现象。

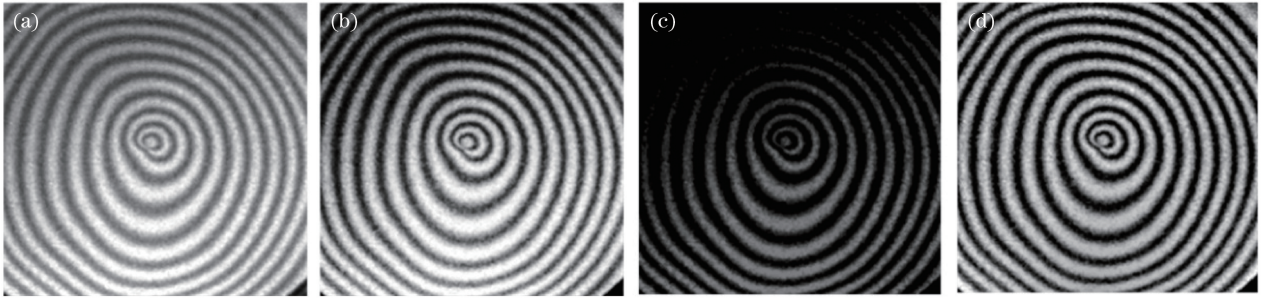


图 7 第四幅光干涉条纹图增强结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 7 Enhanced results of the fourth optical interferometry fringe pattern. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

表 1 本文方法尺度和对应的权重参数

Table 1 Scales and weight parameters for proposed method

Parameter	Fig.4	Fig.5	Fig.6	Fig.7
$\sigma_i$	10, 40, 120	10, 40, 120	10, 54, 167	10, 54, 167
$\omega_i$	$\frac{1}{5}, \frac{2}{5},$	$\frac{1}{5}, \frac{2}{5},$	$\frac{1}{3}, \frac{1}{3},$	$\frac{1}{3}, \frac{1}{3},$
	$\frac{2}{5}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

采用的尺度参数和权重因子如表 1 所示。增强实验结果表明:本文方法可以提高光干涉条纹图的对比度,几乎消除了原始图像照度不均匀的现象;可以提供更好的视觉效果,且增强效果优于光干涉条纹图像中常用的 2 种增强方法。为了进一步从主观上证明本文方法的优越性,对增强之后的图像进行了二值

化处理。由于电子散斑干涉条纹图散斑噪声严重,因此对图 3(a)、(b)中 2 幅电子散斑干涉条纹图先进行滤波后再二值化,对图 3(c)、(d)直接进行二值化。这里直接展示二值化的结果,如图 8~11 所示。

由二值化的结果可以更直观地看出,经过本文方法的增强之后,条纹的完整性更好。同时也说明了照度不均匀对条纹图像的影响,如果不进行增强,直接进行滤波、二值化后提取骨架线,得到的骨架线是不完整的,无法得到完整的相位信息。二值化的结果进一步说明了增强对于改善光干涉条纹图像的照度不均匀的必要性。

### 3.2 客观评价

采用平均梯度来定量评价不同算法增强效果的差异。平均梯度的大小可以说明图像中灰度变化的剧烈程度和图像清晰度。对于实验中的光干涉条纹

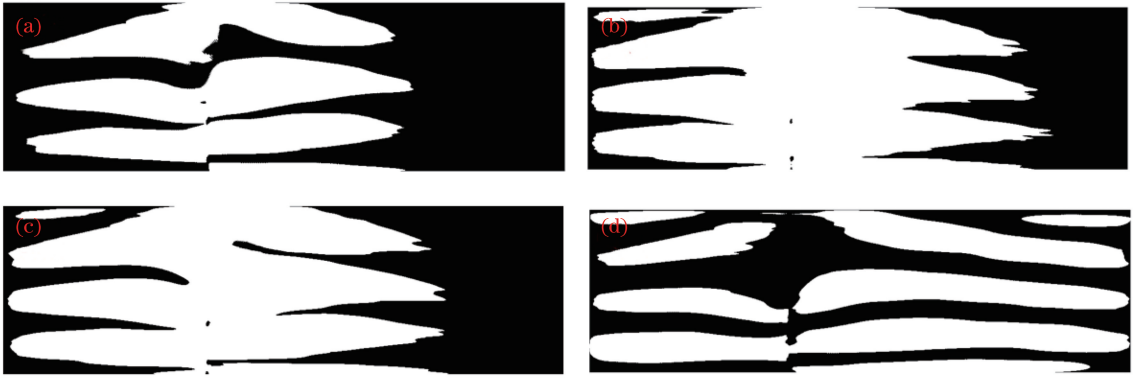


图 8 图 4 的二值化结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 8 Binarization results in Fig. 4. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

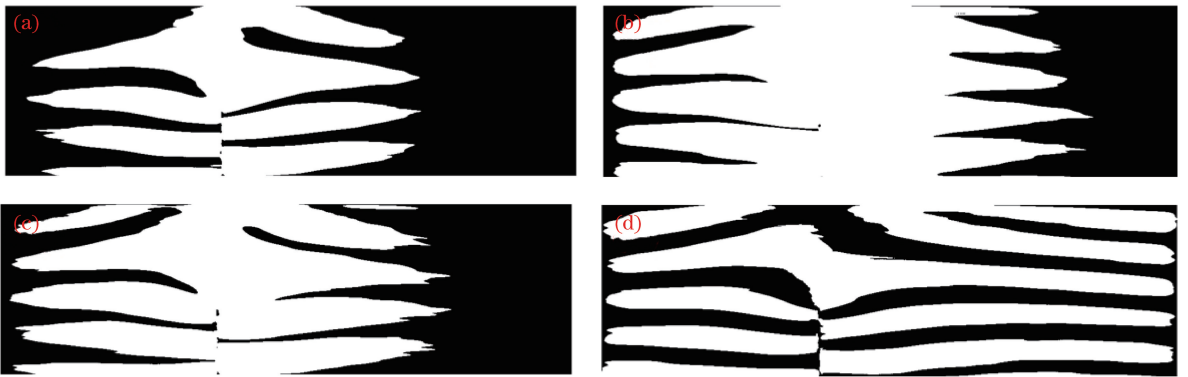


图 9 图 5 的二值化结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 9 Binarization results in Fig. 5. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

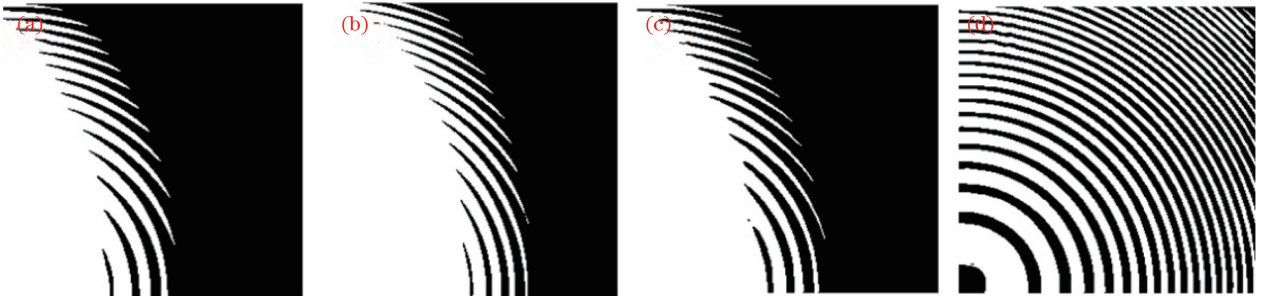


图 10 图 6 的二值化结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 10 Binarization results in Fig. 6. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

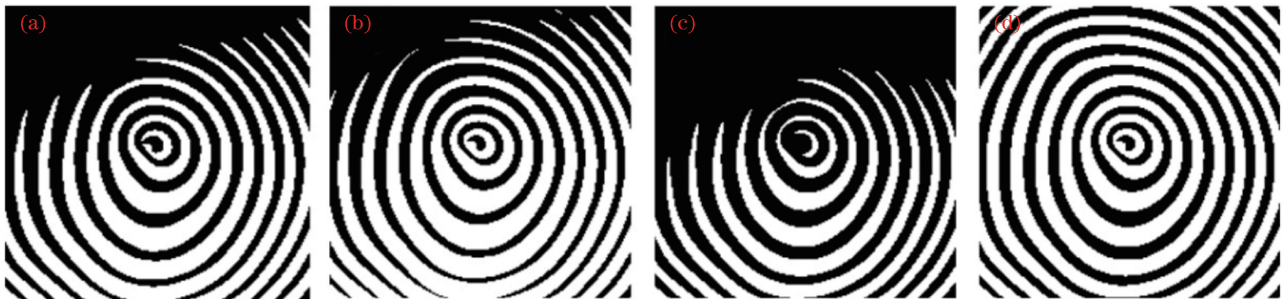


图 11 图 7 的二值化结果。(a)原始图像;(b) HE 方法;(c) DE 方法;(d)本文方法

Fig. 11 Binarization results in Fig. 7. (a) Original image; (b) HE method; (c) DE method; (d) proposed method

图像,梯度值越大越好。表 2 给出了各种方法的梯度评价指标。对于两幅电子散斑干涉条纹图来说,增强之后条纹变化最明显的是图像的右半部分,在利用梯度指标评价时,选择两幅图像的右半部分进行评价,结果更精确。

表 2 图像梯度指标对比

Table 2 Comparison of image gradient indexes

Method	Fig.4	Fig.5	Fig.6	Fig.7
Original method	20.06	23.03	4.44	14.11
HE method	64.10	64.77	6.78	20.42
DE method	63.50	63.96	3.81	9.21
Our method	79.56	70.21	20.52	25.00

由表 2 可以看出,在 3 种方法中,DE 方法对增强图像的指标较低,且图 6 和图 7 的指标不及原图。这是因为 DE 方法更适于对比度很低的光干涉条纹图像,对于对比度较高且照度不均匀的图像,增强结果不是很理想。对于 4 幅具有不同对比度、不同程度照度不均匀的光干涉条纹图像,本文方法在指标上优于其他方法,可以有效地提高暗区对比度,改善照度不均匀问题。

## 4 结 论

将多尺度 Retinex 算法引入到光学领域,提出一种基于 Retinex 的光干涉条纹图像增强算法,对不同尺度取不同权重,解决了光干涉条纹图像中照度不均匀问题。与 HE 方法和 DE 方法进行对比实验,并将增强结果进行二值化,进一步证明所提方法的增强效果。实验结果表明,所提方法能够有效提高光干涉条纹图像的对比度,而且能很好地改善照度不均匀的问题,为光干涉条纹的后续过程提供了很好的预处理效果。

## 参 考 文 献

- [1] Dyrseth A A, Skatter S. Vibration analysis of logs with electronic speckle pattern interferometry [J]. Applied Optics, 1997, 36(16): 3649-3656.
- [2] Fricke-Begemann T, Burke J. Speckle interferometry: three-dimensional deformation field measurement with a single interferogram[J]. Applied Optics, 2001, 40(28): 5011-5022.
- [3] Wang G, Li Y J, Zhou H C. Application of the radial basis function interpolation to phase extraction from a single electronic speckle pattern interferometric fringe [J]. Applied Optics, 2011, 50(19): 3110-3117.
- [4] Singh T, Vikram C S. Histogram equalization of Young's fringes in speckle photography [J].

Proceedings of SPIE, 2002, 4777: 27-30.

- [5] Singh T, Vikram C S. Histogram equalization of vibration fringes in holography[J]. Optik, 2002, 113(11): 499-503.
- [6] Hsung T C, Lun D P K, Ng W W L. Efficient fringe image enhancement based on dual-tree complex wavelet transform [J]. Applied Optics, 2011, 50(21): 3973-3986.
- [7] Tang C, Zhang F, Chen Z Q. Contrast enhancement for electronic speckle pattern interferometry fringes by the differential equation enhancement method[J]. Applied Optics, 2006, 45(10): 2287-2294.
- [8] Park S, Yu S, Moon B, *et al.* Low-light image enhancement using variational optimization-based retinex model [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017, 63(2): 178-184.
- [9] Lin H N, Shi Z W. Multi-scale retinex improvement for nighttime image enhancement [J]. Optik, 2014, 125(24): 7143-7148.
- [10] Yang A P, Bai H H. Nighttime image defogging based on the theory of retinex and dark channel prior [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041002.  
杨爱萍, 白煌煌. 基于 Retinex 理论和暗通道先验的夜间图像去雾算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041002.
- [11] Yu P, Hao C C. Foggy image enhancement by combined fractional differential and multi-scale retinex [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011012.  
余萍, 郝成成. 基于分数阶微分和多尺度 Retinex 联合的雾霭图像增强算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011012.
- [12] Chen Y Z, Guo J H. Retinex medical image enhancement algorithm based on weighted guided filtering by Canny operator [J]. Computer and Digital Engineering, 2019, 47(2): 407-411, 480.  
陈韵竹, 郭剑辉. 基于 Canny 算子加权引导滤波的 Retinex 医学图像增强算法 [J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(2): 407-411, 480.
- [13] Zhan B C, Wu Y Q, Ji S X. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2788-2793.  
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2788-2793.
- [14] Wen H B, Bi D Y, Ma S P, *et al.* Variational retinex



- algorithm for infrared image enhancement with staircase effect suppression and detail enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911005.
- 温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除阶梯效应与增强细节的变分 Retinex 红外图像增强算法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911005.
- [15] Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [16] Land E H. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1986, 83(10): 3078-3080.
- [17] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [18] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C] // *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*, September 19-19, 1996, Lausanne, Switzerland. New York: IEEE, 1996: 1003-1006.
- [19] Petro A B, Sbert C, Morel J M. Multiscale retinex [J]. *Image Processing on Line*, 2014, 4: 71-88.
- [20] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1997, 6(7): 965-976.
- [21] Jang C Y, Lim J H, Kim Y H. A fast multi-scale retinex algorithm using dominant SSR in weights selection [C] // *2012 International SoC Design Conference (ISOC)*, November 4-7, 2012, Jeju Island, Korea. New York: IEEE, 2012: 37-40.
- [22] Fang S, Yang J R, Cao Y, *et al.* Local multi-scale retinex algorithm based on guided image filtering [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(7): 748-755.
- 方帅, 杨静荣, 曹洋, 等. 图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(7): 748-755.
- [23] Wang K J, Xiong X Y, Ren Z, *et al.* MSR image enhancement based on window irrelevant mean filter [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(9): 1467-1471.
- 王科俊, 熊新炎, 任桢, 等. 基于窗口无关均值滤波的 MSR 图像增强 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(9): 1467-1471.