

基于改进模糊 c 均值聚类算法的条纹投影背景去除

赵琦¹, 唐晨^{1*}, 徐敏¹, 雷振坤²¹天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;²大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 背景去除是从单幅条纹投影图中恢复相位的重要问题之一, 提出了一种改进的模糊 c 均值(FCM)聚类算法来移除单幅条纹投影图中的背景。该方法使用改进的 FCM 算法将条纹分为黑、白条纹, 并通过改进的 FCM 目标函数得到背景, 从而从条纹投影图中去除背景。将该方法应用在两张模拟图和一张实验图上, 并与傅里叶变换方法、基于形态学操作的二维经验模态分解方法、变分分解 TV-Hilbert-L² 模型进行了比较。实验结果表明, 该方法提高了背景去除的能力和相位提取的精度。

关键词 成像系统; 图像处理; 条纹投影图; 模糊 c 均值聚类; 傅里叶变换

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.2411002

Background Removal of Fringe Projection Patterns Based on Modified Fuzzy c-Means Clustering Algorithm

Zhao Qi¹, Tang Chen^{1*}, Xu Min¹, Lei Zhenkun²¹School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China

Abstract Background removal remains one of the most challenging issues in the phase retrieval from a single frame fringe projection pattern. This study proposes a modified fuzzy c-means (FCM) clustering algorithm to remove background from a single fringe projection pattern. To remove the background part from the fringe projection patterns, a modified FCM algorithm was used to divide the fringes into black and white fringes and optimize the modified FCM objective function to get the background part. The performance of this algorithm was evaluated by applying it to two simulated and one experimental fringe projection pattern. Furthermore, it was compared with the Fourier transform method, morphological operation-based bidimensional empirical mode decomposition method, and variational decomposition TV-Hilbert-L² model. The experimental results indicate that the proposed algorithm improves the ability of background removal and accuracy of phase extraction.

Key words imaging systems; image processing; fringe projection pattern; fuzzy c-means clustering; Fourier transform

1 引言

条纹投影轮廓术(FPP)是一种非接触、快速、准确的三维形状测量方法, 应用广泛^[1-4]。该方法的原理如下: 将光栅条纹投射到被测量物体的表面上, 由于被测量物体的高度调制, 条纹发生了形变, 形变的条纹包含了物体的高度信息, 通过分析变形的条纹, 可以测量出物体的形状。

基于单幅图的 FPP 相位提取一次只采集一幅图像, 受环境干扰的影响较小, 因此特别适合于动态过程的三维测量和显示。从单幅条纹投影图中提取相位: 首先需要去除单幅条纹投影图的背景, 从而获得条纹部分, 然后从条纹中获得包裹相位图; 其次通过解包裹获得连续的相位信息。显然, 去除背景的误差会影响相位恢复的精度。因此, 背景的去除是一个非常关键的步骤。Takeda 等^[5]提出了一种基于傅里叶变换

收稿日期: 2021-09-03; 修回日期: 2021-10-02; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(11772081, 11972106)

通信作者: *tangchen@tju.edu.cn

(FT)的相位提取方法。随后,为了提高精度,一些学者提出了一些改进的傅里叶方法,如窗口傅里叶变换^[5-6]、连续小波变换^[7]等。由于傅里叶的全局性,傅里叶方法的精度是有限的^[7]。

在傅里叶变换中,条纹部分的提取是非常重要的。于是,人们开始研究如何提取条纹部分。经验模态分解(EMD)^[8]是一种常用的方法,但该方法容易出现模式混合的问题^[9]。为了克服这一问题,Zhou等^[9]提出了一种基于形态学操作的二维经验模态分解(MOBEMD)方法。为了减少由包络表面估计引起的误差,Wielgus等^[10]提出了一种基于中点的二维经验模态(MBEMD)分解算法。Goćłowski等^[11]提出了一种自动、快速、可用于处理低质量条纹图的算法。

变分图像分解(VID)也是一种提取条纹的方法。变分图像分解将图像分解为两个或两个以上部分,每个部分表示不同的信息并且每一部分由适当的函数空间描述,然后结合相应函数空间的范数构造能量函数,通过最小化能量函数来求解每一部分。Zhu等^[12]用变分图像分解TV-Hilbert-L²模型来去除条纹投影图中的背景。在TV-Hilbert-L²模型中,背景用TV空间描述,条纹用Hilbert空间描述,噪声用L²范数空间描述。每个部分都通过最小化由这3个分量组成的能量函数来求解。

随着机器学习的发展,各种算法已被应用于图像处理的领域,其中模糊c均值(FCM)算法是一种基于划分的聚类算法。FCM算法使分成同一集群的数据的相似性最高,不同集群之间的相似性最小,从而实现了数据的分类。本文将机器学习的方法引入FPP技术中,提出了一种改进的FCM聚类算法来去除条纹投影图的背景,然后采用三维块匹配(BM3D)算法去除条纹图中残余的噪声。分别在两张模拟图和一张实验图上测试了该方法,并与傅里叶变换方法、MOBEMD方法,变分分解TV-Hilbert-L²模型进行了定性和定量对比。实验结果表明,所提方法可以获得较为干净的条纹,提高了相位提取的精度。

2 基本原理

所提基于改进的FCM聚类的背景去除算法的基本原理如下。首先,条纹投影图的强度分布为

$$\mathbf{I}(x, y) = \mathbf{q}(x, y) + \mathbf{p}(x, y) \cos[\phi(x, y)] + \mathbf{N}_{\text{noise}}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{q}(x, y)$ 是背景; $\mathbf{p}(x, y) \cos[\phi(x, y)]$ 是条纹, $\phi(x, y)$ 是光学相位, $\mathbf{p}(x, y)$ 是调制强度; $\mathbf{N}_{\text{noise}}$ 表示条纹投影图中的噪声。令 $\mathbf{u} = \mathbf{q}(x, y)$ 、 $\mathbf{v} = \mathbf{p}(x, y) \times \cos[\phi(x, y)]$ 、 $\mathbf{w} = \mathbf{N}_{\text{noise}}$ 、 $\mathbf{f} = \mathbf{u} + \mathbf{v} + \mathbf{w}$ 。

因为条纹投影图主要包括背景和条纹,条纹($\mathbf{v} = \mathbf{f} - \mathbf{u}$)根据灰度值可分为两类,所以使用聚类方法将条纹分为黑、白条纹,并考虑周围邻域像素的影响,修

改后的FCM算法的目标函数可描述为

$$J(\mathbf{u}_{ij}, \mathbf{a}_i) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N b_{ij}^m \|\mathbf{f}_j - \mathbf{u}_j - \mathbf{a}_i\|^2 + \frac{\alpha}{N_R} \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N b_{ij}^m \left(\sum_{\mathbf{f}_r \in \mathbf{N}_j} \|\mathbf{f}_r - \mathbf{u}_r - \mathbf{a}_i\|^2 \right), \quad (2)$$

式中: N 是图像的像素个数;集群的数量 $c = 2$; b_{ij} 表示像素 j 在第 i 个集群中隶属度; \mathbf{a}_i 是聚类中心;集群的模糊度 $m \in [1, \infty]$; \mathbf{N}_j 代表以 $(\mathbf{f}_j - \mathbf{u}_j)$ 为中心的窗口内像素点的集合; N_R 是集合 \mathbf{N}_j 的势;邻域项的影响由参数 α 控制,且 α 为实数。可以最小化目标函数 J ^[13]来求解式(2):

$$\min_{\mathbf{B}, \{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^c, \{\mathbf{u}_j\}_{j=1}^N} J, \text{ subject to } \mathbf{B} \in \mathbf{b}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{B} 是 $c \times N$ 维的隶属度矩阵。目标函数 J 的最小化类似于标准的FCM算法。

式(3)中的约束优化可以用拉格朗日乘子来求解:

$$F = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N \left[b_{ij}^m D_{ij} + \frac{\alpha}{N_R} b_{ij}^m \gamma_i + \lambda \left(1 - \sum_{i=1}^c b_{ij} \right) \right], \quad (4)$$

式中: $D_{ij} = \|\mathbf{f}_j - \mathbf{u}_j - \mathbf{a}_i\|^2$; $\gamma_i = \sum_{\mathbf{f}_r \in \mathbf{N}_j} \|\mathbf{f}_r - \mathbf{u}_r - \mathbf{a}_i\|^2$ 。取 F 关于 b_{ij} 的导数,并将结果设为零,有

$$\left(m b_{ij}^{m-1} D_{ij} + m \frac{\alpha}{N_R} b_{ij}^{m-1} \gamma_i - \lambda \right)_{b_{ij} = b_{ij}^*} = 0, \quad (5)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{\left(\sum_{k=1}^c \left(\frac{D_{ij} + \frac{\alpha}{N_R} \gamma_i}{D_{kj} + \frac{\alpha}{N_R} \gamma_i} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right)^{m-1}}. \quad (6)$$

取 F 关于 \mathbf{a}_i 的一阶导数,并将结果设为零, \mathbf{a}_i 的表达式为

$$\mathbf{a}_i = \frac{\sum_j b_{ij}^m (\mathbf{f}_j - \mathbf{u}_j) + \frac{\alpha}{N_R} \sum_{\mathbf{f}_r \in \mathbf{N}_j} (\mathbf{f}_r - \mathbf{u}_r)}{(1 + \alpha) \sum_{j=1}^N b_{ij}^m}. \quad (7)$$

取 F 关于 \mathbf{u}_j 的一阶导数,并将结果设为零, \mathbf{u}_j 的表达式为

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{f}_j - \frac{\sum_{i=1}^c b_{ij}^m \mathbf{a}_i}{\sum_{i=1}^c b_{ij}^m}. \quad (8)$$

最终,条纹部分的表达式为

$$\mathbf{v}_j = \mathbf{f}_j - \mathbf{u}_j. \quad (9)$$

由于提取的条纹有少量的噪声,用该方法获得的条纹需要进一步去噪。在本研究中,采用BM3D对条纹图进行去噪。其他方法,如总方向变化(TDV)等方法也适用。

3 实验结果与分析

在 3 幅条纹投影图上进行了定性和定量的测试,包括 2 幅模拟的条纹投影图和 1 幅实验的条纹投影图,选择了 FT 方法、MOBEMD 方法、变分分解 TV-Hilbert- L^2 方法对提取的条纹和相应的展开相位进行了对比实验。此外,文献[9]提到,MOBEMD 方法需要对条纹投影图进行去噪处理,选择了功能强大的 BM3D 去噪算法进行对比实验。同时,用傅里叶方法得到包裹相位^[5],利用质量引导的相位解包裹算法来解包裹相位^[14],并使用 Zernike 拟合方法来去除载频^[15]。所有算法都是在一台具有 3.0 Hz CPU 和 4 GB 内存的计算机上运行的。

两幅图像大小为 512×512 的模拟条纹投影图由下式生成:

$$I(x, y) = d \cos[2\pi f_0 x + e\phi(x, y)] + g\phi(x, y) + 0.2 \times N_{\text{Gauss}}, \quad (10)$$

式中: (x, y) 是条纹投影图的空间坐标; $2\pi f_0 x$ 是载波项, f_0 是载波频率; d 是物体表面的折射率; e 是调整相位大小的参数; g 是背景亮度; N_{Gauss} 是高斯随机噪声; $\phi(x, y)$ 是测量的相位信息。实验设置 $d=1$ 、 $f_0=1/16$ 、 $e=2$ 、 $g=2$ 。

图 1(a) 是第 1 台计算机模拟的条纹投影图。该相位 $\phi(x, y)$ 的表达式为

$$\phi(x, y) = \text{real} \left[2 \times \sqrt{1 - \frac{(x-8)^2 + (y-8)^2}{200^2}} \right] + P(x, y), \quad (11)$$

式中: $\text{real}(\cdot)$ 表示取复数的实数部分; $P(x, y)$ 为 matlab 中的 PEAKS 函数。

图 1(b)~(d) 是图 1(a) 对应的理论背景、条纹和相位图,其中图 1(b1)~(d1)、图 1(b2)~(d2)、图 1(b3)~(d3) 和图 1(b4)~(d4) 分别是 FT、MOBEMD、TV-Hilbert- L^2 和所提方法在背景、条纹和相位上的相应结果,图 1(e)~(e4) 是图 1(d)~(d4) 的放大细节图。所提方法中, $[a_1, a_2] = [0.1, 7]$, $\alpha = 1$ 。

图 2(a) 是另一幅由计算机模拟的条纹投影图,该相位 $\phi(x, y)$ 的表达式为

$$\phi(x, y) = 3x^2 \times \exp[-x^2 + (y+1)^2] - 10(x/5 - y^3 - y^5) \times \exp(-x^2 - y^2). \quad (12)$$

图 2(a) 与图 1(a) 的类似结果在图 2(b)~(d)、图 2(b1)~(d1)、图 2(b2)~(d2)、图 2(b3)~(d3)、图 2(b4)~(d4) 和图 2(e)~(e4) 中给出。在这些条纹投影图中,所提方法的 $[a_1, a_2] = [0.1, 7]$, $\alpha = 1$ 。

图 3(a) 展示了实验得到的一张人脸的条纹投影图。图 3(b) 为通过相移法检索到的相位,将它作为理论相位,以便进行后续的数值计算。图 3(c1)~(e1)、

图 3(c2)~(e2)、3(c3)~(e3) 和图 3(c4)~(e4) 分别是 FT、MOBEMD、TV-Hilbert- L^2 和所提方法在背景、条纹和相位上的相应结果。在这些条纹投影图中,所提方法的 $[a_1, a_2] = [0.5, 5]$, $\alpha = 1$ 。

对于定量评价,使用两个指标来量化所提方法的性能,包括获得的条纹部分的信噪比(SNR_F)和相位的均方误差(MSE_ϕ):

$$R_{\text{SNR}_F} = 20 \log_{10} \left\{ \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F_{\text{true}}(i, j)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F_m(i, j) - F_{\text{true}}(i, j)]^2}} \right\}, \quad (13)$$

$$E_{\text{MSE}_\phi} = \frac{1}{M \times N} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\phi(i, j) - \phi_{\text{true}}(i, j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\phi_{\text{true}}(i, j)]^2}, \quad (14)$$

式中: F_{true} 和 F_m 分别为理论条纹和实验获得的条纹部分; ϕ_{true} 和 ϕ 是从理论和实验获得的条纹部分所提取的相位; $M \times N$ 为图像的大小。

对于这些指标, SNR_F 值越高,背景去除越好; MSE_ϕ 值越低,得到的展开相位就越接近理论相位,即得到了较好的条纹。两幅计算机模拟的条纹投影图的数值结果如表 1 所示,实验条纹投影图的数值结果如表 2 所示,最佳结果用粗体标记。相移方法直接得到相位,无法获得条纹部分,因此无法计算出实验条纹图的 SNR_F 。

从图 1(d1)、图 1(e1)、图 2(d1)、图 2(e1) 可以看出,利用傅里叶变换方法获得的相位会出现部分相位丢失的情况,尤其是在相位变化快速的尖峰部分,得到的相位存在噪声。与傅里叶方法相比,MOBEMD 方法获得的相位信息缺失较少,但仍然存在部分噪声。从图 1(d3)~(e3)、图 2(d3)~(e3)、图 1(d4)~(e4)、图 2(d4)~(e4) 可以看到,用 TV-Hilbert- L^2 方法和所提方法获得的相位较为完整。但所提方法恢复的相位可以尽可能多地保持尖峰处的信息,使得噪声较少,相位更接近理论相位。从图 1(c1)~(c4)、图 2(c1)~(c4) 也可以看出,所提方法获得的条纹图较为干净,存在较少的噪声。同时从表 1 也可以看出,所提方法优于其他 3 种方法,这与视觉效果结论相同。

从图 3 可以看出,在实验图中,所提方法取得了与模拟图相似的相位恢复性能。从图 3(e3)~(e4) 可以看出,所提方法可以更好地恢复细节。同时,也可以看到,所提方法可以减少面部轮廓处的信息损失,表 2 的定量分析也与视觉效果一致,这进一步验证了该方法的有效性。

另外,对一张模拟图分别添加 0.2~1.2 的高斯随机噪声,测试不同强度噪声对所提方法效果的影响。实验结果如图 4 所示,其中图 4(a) 为原始的条纹投影图,图 4(b) 为理论的条纹,图 4(c)~(g) 分别为添加

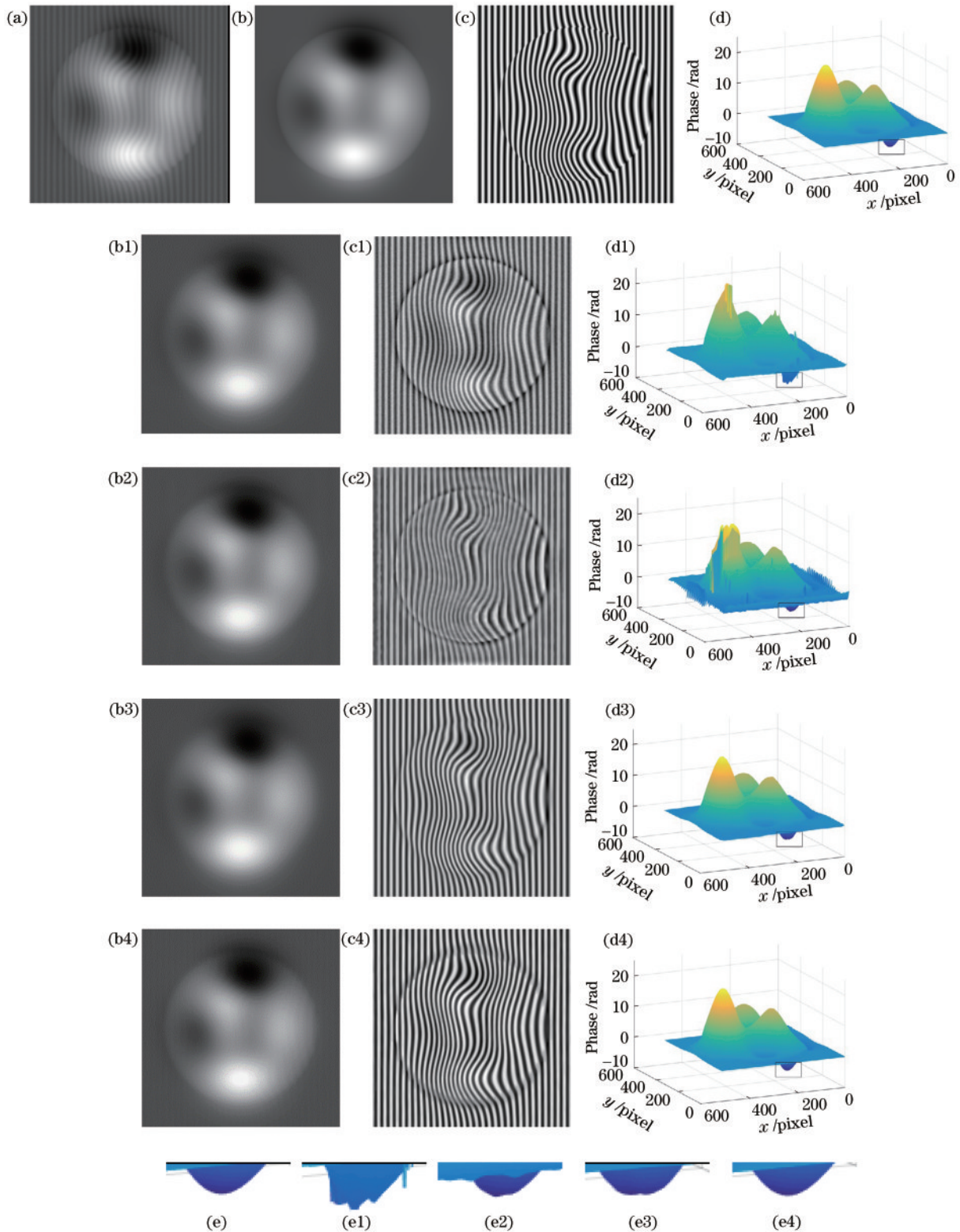


图 1 第 1 个模拟条纹投影图的结果比较。(a)原始条纹投影图;(b)~(d)图 1(a)相应的理论背景、条纹、相位;(b1)~(d1)FT 方法得到的背景、条纹和相位;(b2)~(d2)MOBEMD 方法得到的背景、条纹和相位;(b3)~(d3)TV-Hilbert- L^2 方法得到的背景、条纹和相位;(b4)~(d4)所提方法得到的背景、条纹和相位;(e)~(e4)对应图 1(d)~(d4)的放大细节

Fig. 1 Results comparison of first simulated fringe projection pattern. (a) Original fringe projection pattern; (b)~(d) Fig. 1(a) corresponding theoretical background, fringe, and unwrapped phase; (b1)~(d1) corresponding results of FT on background, fringe, and unwrapped phase; (b2)~(d2) corresponding results of MOBEMD on background, fringe, and unwrapped phase; (b3)~(d3) corresponding results of TV-Hilbert- L^2 on background, fringe, and unwrapped phase; (b4)~(d4) corresponding results of proposed method on background, fringe, and unwrapped phase; (e)~(e4) enlarged details corresponding to Fig. 1(d)~(d4)

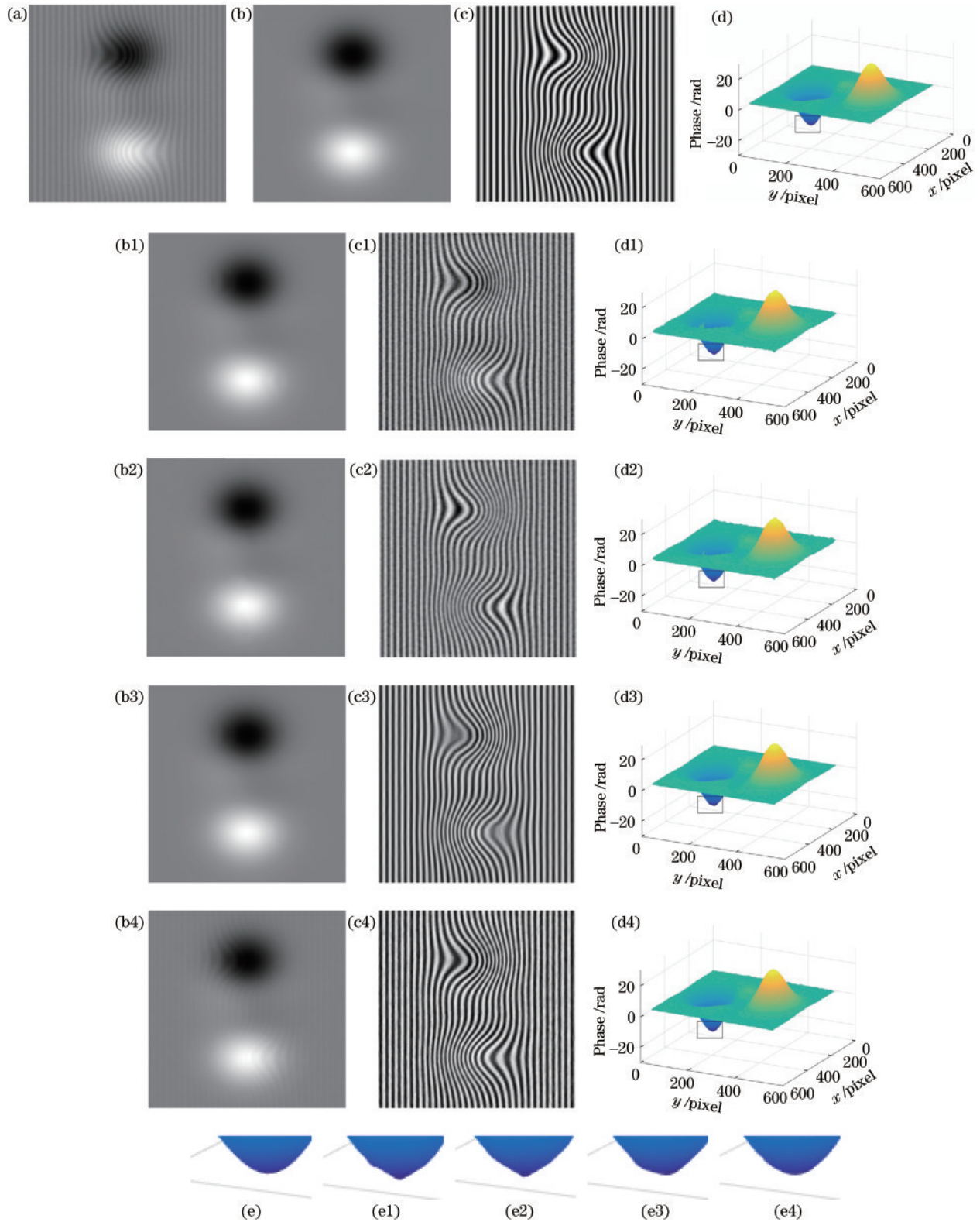


图2 第2个模拟条纹投影图的结果比较。(a)原始条纹投影图;(b)~(d)图2(a)相应的理论背景、条纹、相位;(b1)~(d1) FT方法得到的背景、条纹和相位;(b2)~(d2)MOBEMD方法得到的背景、条纹和相位;(b3)~(d3) TV-Hilbert- L^2 方法得到的背景、条纹和相位;(b4)~(d4)所提方法得到的背景、条纹和相位;(e)~(e4)对应图2(d)~(d4)的放大细节

Fig. 2 Results comparison of second simulated fringe projection pattern. (a) Original fringe projection pattern; (b)~(d) Fig. 2(a) corresponding theoretical background, fringe, and unwrapped phase; (b1)~(d1) corresponding results of FT on background, fringe, and unwrapped phase; (b2)~(d2) corresponding results of MOBEMD on background, fringe, and unwrapped phase; (b3)~(d3) corresponding results of TV-Hilbert- L^2 on background, fringe, and unwrapped phase; (b4)~(d4) corresponding results of proposed method on background, fringe, and unwrapped phase; (e)~(e4) enlarged details corresponding to Fig. 2(d)~(d4)

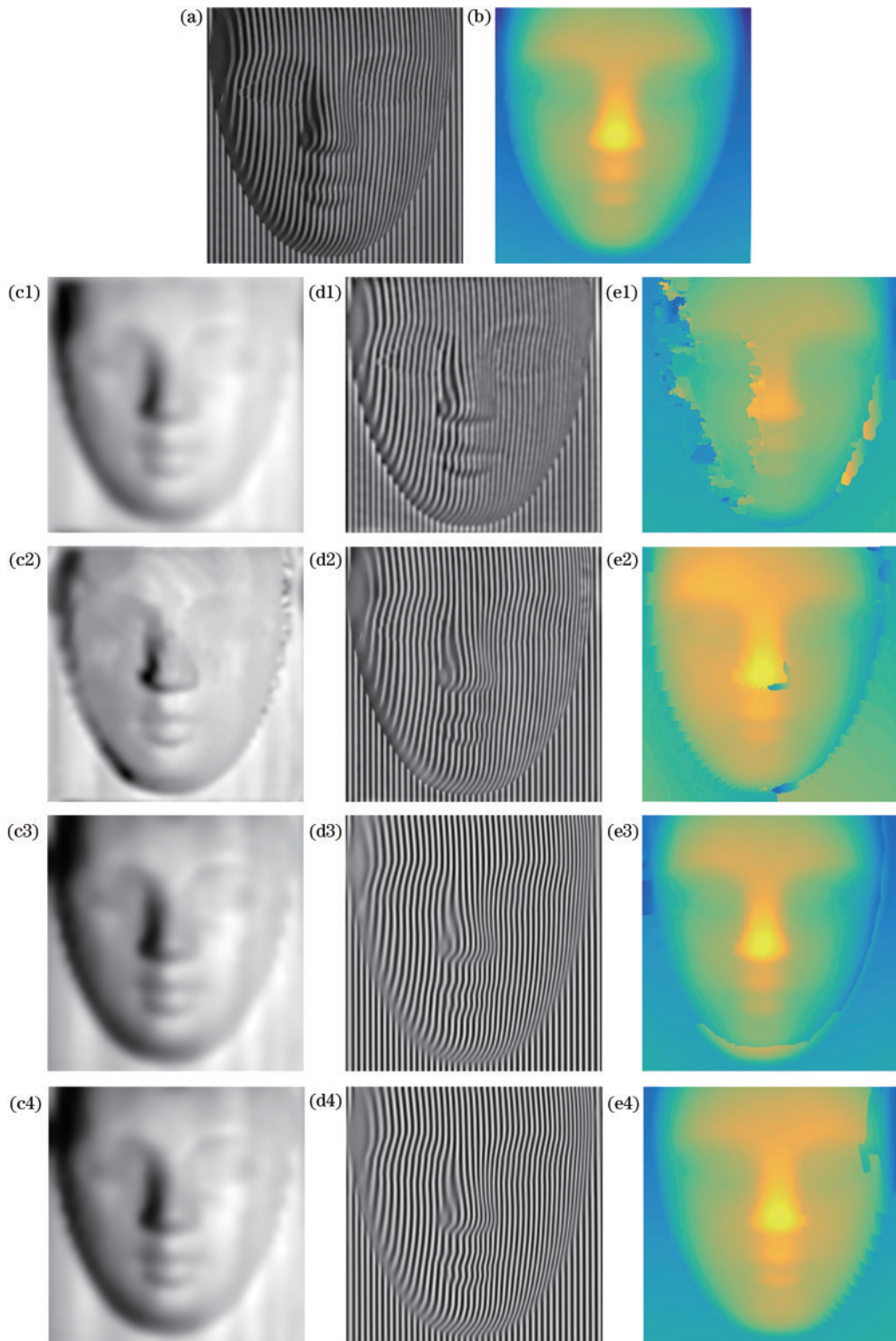


图3 实验图的结果比较。(a)原始条纹投影图;(b)理论相位;(c1)~(e1)FT方法得到的背景、条纹和相位;(c2)~(e2)MOBEMD方法得到的背景、条纹和相位;(c3)~(e3)TV-Hilbert- L^2 方法得到的背景、条纹和相位;(c4)~(e4)所提方法得到的背景、条纹和相位

Fig. 3 Results comparison of experimental fringe projection pattern. (a) Original fringe projection pattern; (b) corresponding theoretical unwrapped phase; (c1)~(e1) corresponding results of FT on background, fringe, and unwrapped phase; (c2)~(e2) corresponding results of MOBEMD on background, fringe, and unwrapped phase; (c3)~(e3) corresponding results of TV-Hilbert- L^2 on background, fringe, and unwrapped phase; (c4)~(e4) corresponding results of proposed method on background, fringe, and unwrapped phase

表 1 模拟条纹投影图的评价指标

Table 1 Evaluation metrics on results for simulated fringe projection patterns

| Fringe projection pattern | Method | SNR _F /dB | MSE _p |
|---------------------------|---------------------------|----------------------|---|
| Fig. 1 | FT | 6.93 | 2.36×10^{-7} |
| | MOBEMD | 9.51 | 1.39×10^{-7} |
| | TV-Hilbert-L ² | 14.93 | 3.68×10^{-9} |
| | Proposed method | 16.53 | 2.63×10^{-9} |
| Fig. 2 | FT | 10.52 | 8.63×10^{-7} |
| | MOBEMD | 11.14 | 1.17×10^{-8} |
| | TV-Hilbert-L ² | 16.49 | 3.10×10^{-9} |
| | Proposed method | 16.82 | 2.66×10^{-9} |

表 2 实验条纹投影图的评价指标

Table 2 Evaluation metrics on results for experimental fringe projection pattern

| Fringe projection pattern | Method | MSE _p |
|---------------------------|---------------------------|---|
| Fig. 3 | FT | 1.63×10^{-6} |
| | MOBEMD | 4.25×10^{-7} |
| | TV-Hilbert-L ² | 3.02×10^{-7} |
| | Proposed method | 2.11×10^{-7} |

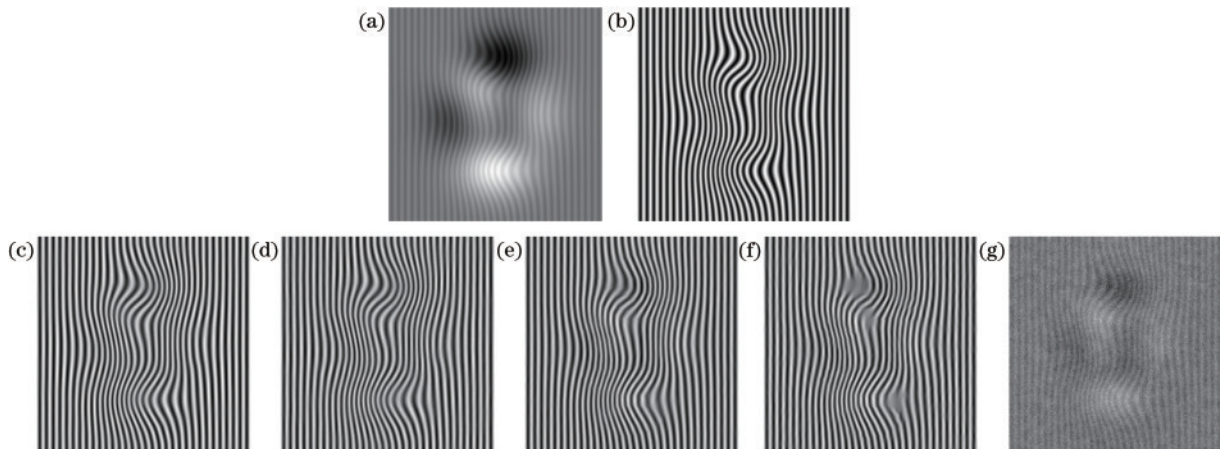


图 4 噪声性能测试结果比较。(a)原始条纹投影图;(b)理论条纹;(c)~(g)分别添加 0.2、0.4、0.8、1、1.2 高斯随机噪声后所提方法得到的条纹图

Fig. 4 Results comparison of noise performance test. (a) Original fringe projection pattern; (b) corresponding theoretical fringe; (c)~(g) fringe patterns obtained by proposed method after adding 0.2, 0.4, 0.8, 1, 1.2 Gaussian random noise respectively

0.2、0.4、0.8、1、1.2 高斯随机噪声后,由所提方法得到的条纹图。且图 4(c)~(g)的信噪比分别为 17.8 dB、17.3 dB、14.4 dB、11.6 dB、5.2 dB。

从图 4 可以看出:当噪声强度增加时,所提方法获得的条纹图越来越不清晰,信噪比也变大;当噪声达到 1.2 高斯随机噪声强度时,该方法得到的条纹图质量变差了。即所提方法在 0~1 高斯随机噪声强度时能达到较好的结果。

4 结 论

将机器学习算法引入到 FPP 技术中,提出了一种改进的 FCM 算法用于条纹投影的背景去除。将条纹分成黑、白两类,并且考虑邻域像素的影响,对传统的

FCM 算法进行改进,并通过改进后的 FCM 算法得到条纹和背景分量。与 FT、MOBEMD、TV-Hilbert-L² 方法进行了对比实验,实验结果表明,所提方法能较为完整恢复出三维物体的相位信息,特别是在细节部分,效果好于较为先进的变分分解方法。

参 考 文 献

- [1] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] 张嘉玲, 郭文博, 吴周杰, 等. 利用散斑嵌入条纹和查找表进行三维面形测量 [J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512003.
Zhang J L, Guo W B, Wu Z J, et al. 3D Shape

- Measurement Using Speckle-Embedded Fringes and Lookup Table[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0512003.
- [3] 王飞, 蔡家旭, 潘艳娟, 等. 二值条纹投影伪装物体检测技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1612005.
Wang F, Cai J X, Pan Y J, et al. Camouflage object detection technology with binary fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1612005..
- [4] 王飞, 蔡家旭, 潘艳娟, 等. 二值条纹投影伪装物体检测技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1612005.
Wang F, Cai J X, Pan Y J, et al. Camouflage object detection technology with binary fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1612005.
- [5] 冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0512003.
Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0512003.
- [6] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [7] Qian K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [8] Qian K M. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(2): 304-317.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] Zhou X, Podoleanu A G, Yang Z Q, et al. Morphological operation-based bi-dimensional empirical mode decomposition for automatic background removal of fringe patterns[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24247-24262.
- [11] Wielgus M, Patorski K. Denoising and extracting background from fringe patterns using midpoint-based bidimensional empirical mode decomposition[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): B215-B222.
- [12] Gocłowski P, Trusiak M, Ahmad A, et al. Automatic fringe pattern enhancement using truly adaptive period-guided bidimensional empirical mode decomposition[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6277-6293.
- [13] Zhu X J, Chen Z Q, Tang C. Variational image decomposition for automatic background and noise removal of fringe patterns[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 275-277.
- [14] Chen M M, Tang C, Xu M, et al. Binarization of optical fringe patterns with intensity inhomogeneities based on modified FCM algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 123(7): 14-19.
- [15] Qian K M, Gao W J, Wang H X. Windowed Fourier-filtered and quality-guided phase-unwrapping algorithm[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5420-5428.
- [16] Zhang Q C, Wu Z Y. A carrier removal method in Fourier transform profilometry with Zernike polynomials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 253-260.