

基于传像光纤成像的蜂窝效应伪影修复算法

李小川^{1,2}, 刘桂华^{1,2*}, 曹令^{1,2}, 邓磊^{1,2}

¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

²特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010

摘要 针对光纤传像束成像系统采集图像中存在的蜂窝效应伪影,通过分析蜂窝效应伪影产生机理及其相关特性,提出一种能够有效修复蜂窝效应伪影的方法。根据蜂窝效应伪影在图像中的分布特点,使用拆分法将原图拆分成多个子图,减小蜂窝效应伪影在图像中的宽度。然后使用一定大小的滑动窗口修复蜂窝效应伪影,在滑动窗口内,根据设计的自适应阈值机制,筛选出位于蜂窝效应伪影区域的像元,并计算该像元与窗口内像素值最大像元的像素值差值及欧氏距离,进而得到自适应补偿系数修复该像元,以滑动窗口遍历子图完成对子图的全局修复。最后利用修复后的各子图完成重构,恢复成原始图像的尺寸。实验结果表明,与多种蜂窝效应伪影修复算法相比,所提方法在客观评价指标上有更好的表现,能更好地修复图像中的蜂窝效应伪影。

关键词 光纤传像束; 蜂窝效应伪影; 图像拆分; 自适应阈值; 自适应补偿系数

中图分类号 TP751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221212

Restoration Algorithm for Honeycomb Artifacts Based on Optical Fiber Imaging

Li Xiaochuan^{1,2}, Liu Guihua^{1,2*}, Cao Ling^{1,2}, Deng Lei^{1,2}

¹School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

²Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, Sichuan, China

Abstract This study proposes an effective method for repairing honeycomb artifacts by analyzing generational mechanisms and the related characteristics of these honeycomb artifacts based on the honeycomb artifacts in images collected using a fiber bundle imaging system. According to the distribution characteristics of honeycomb artifacts in the image, the original image was first divided into several sub-images by a splitting method to reduce the honeycomb artifact's image width. Then, a sliding window with a certain size was used to repair the honeycomb artifacts. Subsequently, the pixels located in the area of honeycomb artifacts were screened out of the sliding window according to the designed adaptive threshold mechanism, after which we calculated the pixel value difference and Euclidean distance between the pixel and another with the largest pixel value in the window to obtain the adaptive compensation coefficient for pixel repair, leading to a transverse of the sliding window and repair of the whole sub-image. Hence, an original image was finally formed with restored sub-images and vice versa. Based on the test results, the proposed method has a better performance, as shown by the objective evaluation index, indicating that it will repair the honeycomb artifacts in images better than the previously established honeycomb artifact restoration algorithms.

Key words imaging optical fiber bundle; honeycomb artifact; image splitting; adaptive threshold; adaptive compensation factor

1 引言

光纤传像束是一种能多角度弯折的传输图像的

无源器件^[1],且凭借无源、耐辐射、耐高温等特点^[2],能够用于一些极端环境如核辐射环境中采集图像数据。光纤传像束由多根单丝光纤组成,单丝光纤由

收稿日期: 2022-04-04; 修回日期: 2022-05-18; 录用日期: 2022-06-16; 网络首发日期: 2022-06-26

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2021YFG0380)、四川省卫生和计划生育科研课题(17PJ207)

通信作者: *liughua_swit@163.com

透光率高的纤芯和透光率低的包层组成,这种物理结构使得基于光纤传像束的成像系统所采集到的图像含有蜂窝效应伪影,同时由于光纤传像束的物理结构及排列方式,蜂窝效应伪影将图像划分成一个个类圆区域^[3]。蜂窝效应伪影不仅使得图像细节变模糊,而且妨碍对图像中目标的分析,对后续的高级图像处理造成干扰,如图像拼接、目标检测等^[4]。因此,蜂窝效应伪影的修复算法具有重要研究意义和应用价值。

应用光纤传像束成像的早期,就有学者尝试解决图像中存在的蜂窝效应伪影问题。Göbel等^[5]使用高斯滤波器来处理图像中的蜂窝效应伪影,该方法可以修复部分的蜂窝效应伪影,但会使得图像细节失真。Suter等^[6]通过实验分析,在频域使用低通滤波器修复图像中的蜂窝效应伪影。Elter等^[7]提出了一个包含校准和重建两个步骤的预处理方法,该方法取得了不错的结果,但是需要提前对光纤传像束进行校准,并且针对不同的光纤传像束需要重新校准,算法泛化性低。针对该问题,Rupp等^[8]提出了一种解决办法,先修复图像中的蜂窝效应伪影,再对修复后图像中存在的模糊进行增强。Han等^[9]借鉴了Rupp等的想法,先利用直方图均衡化增强图像,再使用高斯平滑滤波修复增强后的图像中的蜂窝效应伪影,最后对图像中的模糊进行增强,这种串行结构方法能在一定程度上保护图像细节。Han等^[10]采用贝叶斯近似算法对蜂窝效应伪影进行解耦,从而消除图像中存在的蜂窝效应伪影,但该方法计算量大,不满足工业应用需求。Lee等^[11]通过对4幅图像进行叠加完成对图像中蜂窝效应伪影的修复,但此方法需要拍摄不同角度的图像,在复杂环境

中局限性高。此外Lee等^[12]还提出了一种通过在频域设置陷波滤波器修复图像中蜂窝效应伪影的方法。Cheon等^[13]提出了一种基于随机横向运动的空间复合新型光纤传像束成像方法,该方法有效地修复了图像存在的蜂窝效应伪影,但不适用于复杂环境。Liu等^[14]基于自然图像在小波域趋于稀疏的经验观察,采用小波域L1范数最小化方法修复图像中的蜂窝效应伪影。Zheng等^[15]提出了一种分割光纤包层和光纤纤芯的方法,并采用改进的非局部均值修复蜂窝效应伪影。

综上所述,现有的蜂窝效应伪影修复算法在修复效果和边缘保护上仍有较大改进空间,为此本文提出了一种通过拆分、修复再重构的方法去除图像中蜂窝效应伪影的干扰。首先利用拆分法将原始图像分解成多幅子图像,然后利用设定的自适应阈值机制筛选出位于蜂窝效应伪影区域的像元,接着通过自适应补偿系数对其进行恢复,最后通过重构将处理后的各子图像组合,恢复为原始图像尺寸,保证处理前后图像分辨率一致,最终得到修复了蜂窝效应伪影的干净图像。

2 蜂窝效应伪影产生机理及特性分析

2.1 产生机理

光纤传像束是由多根单丝光纤按照一定排列方式组合而成,用于传输图像的光学器件,基本结构如图1(a)所示。根据光纤传像束传输信号的方式,可分为阶跃型和梯度型两类,本文研究的对象为阶跃型光纤传像束,组成传像束的单丝光纤由不同材料的纤芯和包层组成,单丝光纤结构如图1(b)所示。

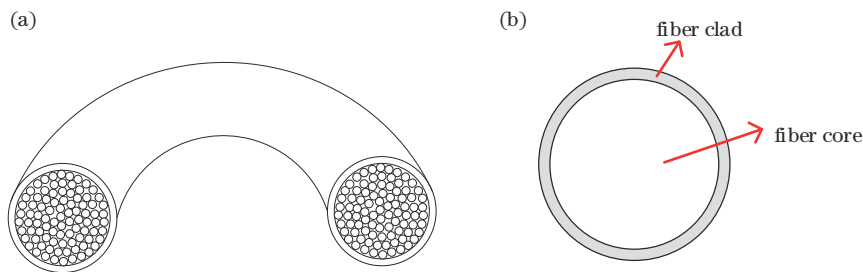


图1 光纤传像束。(a)整体结构示意图;(b)单丝光纤结构示意图

Fig.1 Imaging optical fiber bundle. (a) Schematic of the overall structure; (b) schematic of monofilament optical fiber structure

为保证光线在阶跃型光纤传像束的单丝光纤中直线传播的方式进行传输,单丝光纤的纤芯部分与包层部分的透光率应不同,透光率与到纤芯中心的距离的关系为

$$R(r) = \begin{cases} k_1, & 0 \leq r \leq a_1 \\ k_2, & a_1 \leq r \leq a_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: r 表示离纤芯中心的距离; a_1 表示纤芯层的半径; a_2 表示单丝光纤的半径; $k_1 > k_2$,即纤芯部分的透光率高,包层部分透光率低,这种物理结构使得光纤传像束

采集的图像存在蜂窝效应伪影。

2.2 特性分析

图2(a)展示了光纤传像束成像系统所采集图像中存在的蜂窝效应伪影,图2(b)展示了采集到的图像中的一行像素值分布情况。

图2(a)中较亮的区域为单丝光纤纤芯的区域,较暗区域则为包层和缝隙共同组成的伪影区域,这种特性是单丝光纤的物理结构和光纤传像束内部的单丝光纤排列方式造成的。图2(b)中已将属于纤芯

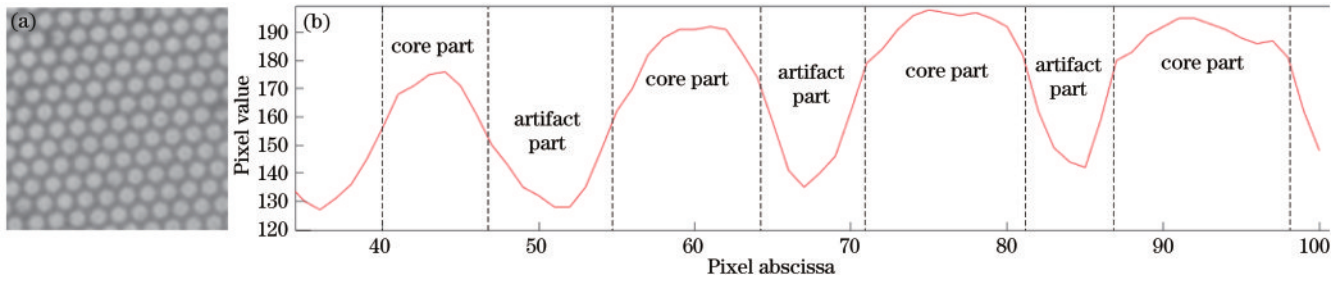


图 2 光纤传像束成像。(a)成像图像;(b)像素分布

Fig. 2 Optical fiber image beam imaging. (a) Imaging image; (b) pixel distribution

部分和伪影部分的像元分别标注出来,可以明显看到,伪影区域在图像的某一行中横跨多个像元,此外可以通过图 2(b)发现纤芯区域的像元像素值最高,伪影区域的像元像素值偏低,且距离纤芯越远的伪影区域中像元像素值越低,即纤芯和伪影区域的像元像素值近似服从正态分布。通过对蜂窝效应伪影特性的分析,可将蜂窝效应伪影的特性归结为两点:由缝隙区域和包层部分共同组成的伪影区域在成像靶面上占据多个像元;缝隙区域和包层部分共同组成的伪影区域的像元像素值相较于纤芯部分的正常像元像素值偏低,图像的像素值分布近似服从正态分布。

3 蜂窝效应伪影修复算法

根据传像光纤束图像中蜂窝效应伪影的特性,提出了一种蜂窝效应伪影修复算法,算法结构如图 3 所示。该算法分为两个部分。1)图像拆分,对光纤传像束图像采集系统采集到的图像进行拆分处理,得到各子图,缩减蜂窝效应伪影在图像中所占区域的宽度,减少位于蜂窝效应伪影区域的像元数量。2)蜂窝效应伪影修复及图像重构,结合蜂窝效应伪影的固有特性,根据设计的自适应阈值机制,得到需要进行处理的像元集合,再通过对该集合的像元进行自适应补偿,消除蜂窝效应伪影干扰。最后利用修复后的各子图完成重构,恢复成原始图像的尺寸。

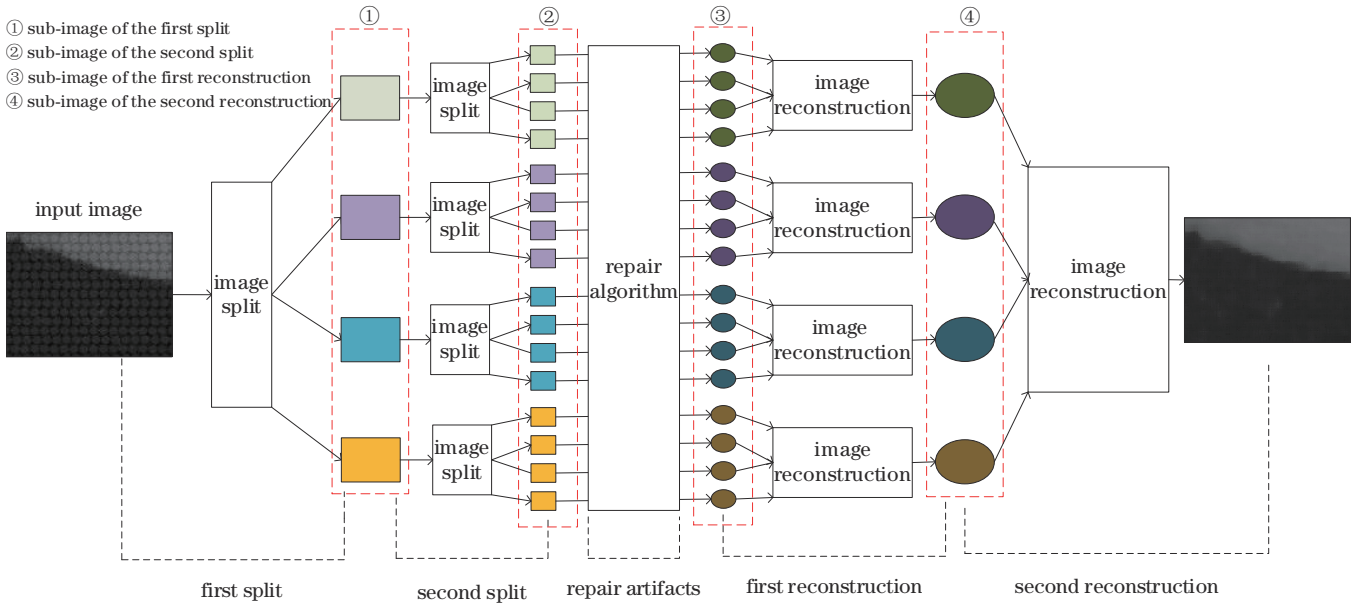


图 3 所提算法结构示意图

Fig. 3 Schematic of proposed algorithm structure

3.1 图像拆分

由分析可知,蜂窝效应伪影在图像中占据多个像元,对光纤传像束采集系统采集到的图像进行拆分,可减少蜂窝效应伪影在图像中所占的像元数量,使得设计的自适应阈值机制更好地筛选出位于伪影区域的像元。对带有蜂窝效应伪影的原始图像进行拆分的公式为

$$S_i = \prod_{i=1}^4 (I * w_i), \quad (2)$$

式中: S_i 表示经过拆分得到的子图集合; I 表示未拆分的图像; $*$ 表示卷积操作。 w_i 表示进行卷积操作的卷积核,有 4 个不同的模板参数,为

$$w_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, w_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, w_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, w_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

所选择的卷积模板参数可以在减少伪影区域的像元数量同时保持图像的整体结构不发生变化。其核心思想是将图像划分成多个 $n \times n$ 的方格,取每个方格相同位置的像元组成新的图像,将整幅图拆分为 $n \times n$ 幅子图像, n 由蜂窝效应伪影在图像中所占据的像元数量决定。为了在最大程度上保证结构的完整性, n 值可设置为 2 或 4,但为减少卷积带来的计算量,本文将 n 取值为 2,且重复进行 2 次卷积以达到与 n 设置为 4 结果相同的效果。

使用式(3)的卷积模板对图像进行卷积时,卷积步长设置为 2。卷积过程如图 4 所示,首先从图像的左上角开始进行,计算当前窗口内 4 个像元像素值与卷积核的各权重的乘积和,因为所设计的卷积模板的权重只有一个被置为 1,其余权重置为 0,因此卷积得到的结果即为卷积模板中权重为 1 所对应的像元像素值;计算完当前窗口后,按照从左至右、从上至下的方式遍历整幅图像;使用 4 个卷积模板对图像进行一次卷积,可以得到 4 幅子图像,每幅子图像的尺寸只有原始图像的 1/4;再使用 4 个卷积模板对第一次卷积得到的 4 幅子图像分别进行一次卷积,可得到 16 幅子图像,每幅子图像的尺寸为原始图像的 1/16。

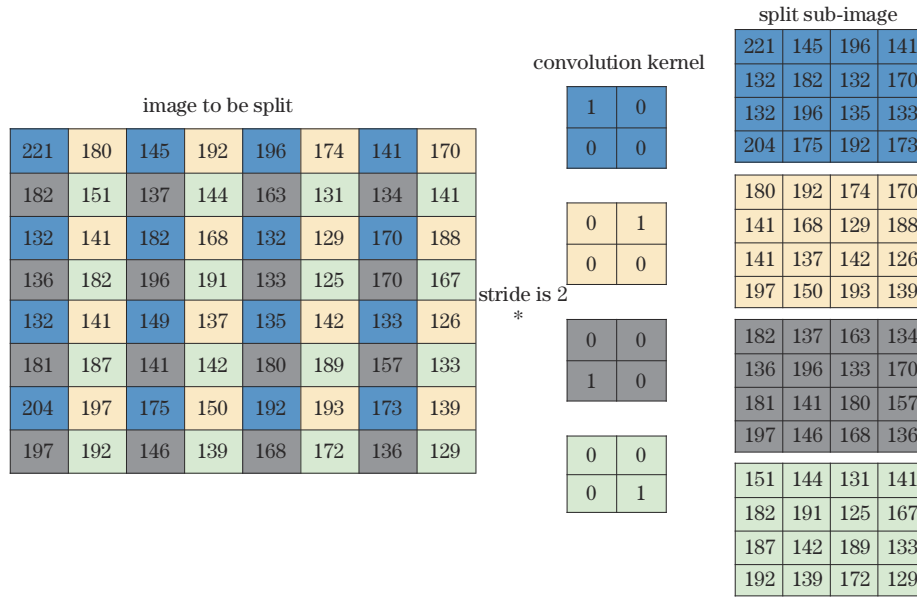


图 4 图像拆分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of image split

图 5 展示了图像拆分前后的像素值分布情况。从图 5 可发现,拆分前和拆分后图像都近似服从正态分布,

表明拆分后的图像并未改变其原本的结构。此外,可发现伪影区域占据的像元数量在拆分后得到了明显减少。

3.2 蜂窝效应伪影修复及图像重构

通过对蜂窝效应伪影特性的分析,可知位于伪影区域的像元像素值低于纤芯区域的像元像素值,且距离纤芯越远,像素值越低,近似服从正态分布,纤芯区域的像元未受干扰,因此可通过纤芯区域的像元恢复伪影区域的像元。根据以上特性,本文提出了一种自适应恢复位于蜂窝效应伪影区域像元的方法。该方法利用 3×3 的滑动窗口遍历整张图像,首先对当前窗口内的像元进行筛选,筛选公式为

$$I(i, j) < \frac{1}{9} \sum_{i, j=0, 1, 2} I(i, j), \quad (4)$$

式中: $I(i, j)$ 表示滑动窗口内坐标为 (i, j) 的像元像素值。当滑动窗口内的像元满足式(4)时,该像元被认定为位于伪影区域。式(4)来源于一个先验知识:对于经过拆分得到的子图像,在使用滑动窗口进行滑动遍历

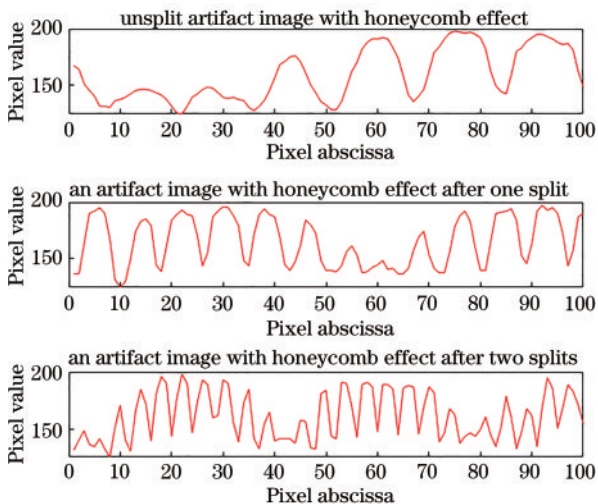


图 5 拆分前后的像素值分布情况

Fig. 5 Pixel value distribution before and after split

时,当前滑动窗口内至少存在一个位于蜂窝效应伪影区域的像元并且数量不会超过滑动窗口所有像元数量的一半,或滑动窗口内的像元都处于纤芯区域。接着确定滑动窗口内被认定为位于伪影区域的像元像素值与滑动窗口内的最大像素值的差值,表达式为

$$P = M - I(i_n, j_n), \quad (5)$$

式中: $I(i_n, j_n)$ 表示滑动窗口内被认定为伪影区域的像元像素值; (i_n, j_n) 表示该像元在滑动窗口内的坐标; M 表示当前窗口内的像素最大值。然后计算滑动窗口内被认定为位于伪影区域的像元与像素值最大的像元之间的欧氏距离,表达式为

$$D = \sqrt{(i_n - x)^2 + (j_n - y)^2}, \quad (6)$$

式中: (x, y) 表示最大像素值所对应的像素点在滑动窗口内的坐标。接着确定像素值差值的加权系数和反距离加权系数,表达式分别为

$$W_p = \frac{P}{M}, \quad (7)$$

$$W_d = 1 - \frac{D}{\sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}. \quad (8)$$

式(7)中的像素差值系数 P 由式(5)确定,式(8)中的 D 由式(6)确定。最后利用式(7)和式(8)得到的两个系数构造最后用于恢复像素点的自适应加权系数,表达式为

$$W = 1 + W_p \times W_d. \quad (9)$$

接着利用得到的自适应加权系数,按照式(9)对窗口内被认定为受到包层干扰的像素点进行加权操作,表达式为

$$I'(i_n, j_n) = I(i_n, j_n) \times W(i_n, j_n), \quad (10)$$

式中: $W(i_n, j_n)$ 表示窗口内坐标为 (i_n, j_n) 对应的加权系数; $I(i, j)$ 表示窗口内被认定为受到包层影响的像素点对应的像素值; $I'(i, j)$ 表示经过恢复得到的像素值。处理完当前窗口内所有位于伪影区域的像素点后,继续滑动窗口到下一个区域,步进为3。当遍历完16幅子图像后,图像中的蜂窝效应伪影被有效去除掉,图6展示了处理前后的图像像素值的分布情况。

从图6可以看出,处理前的高像素值落差在处理后就得到了很明显抑制,这表明所提方法对图像中的蜂窝效应伪影有较好的抑制作用。在处理完16幅子图像后,即可完全去除图像中的蜂窝效应伪影。为了使处理结果恢复到与原始图像相同的尺寸大小,根据反

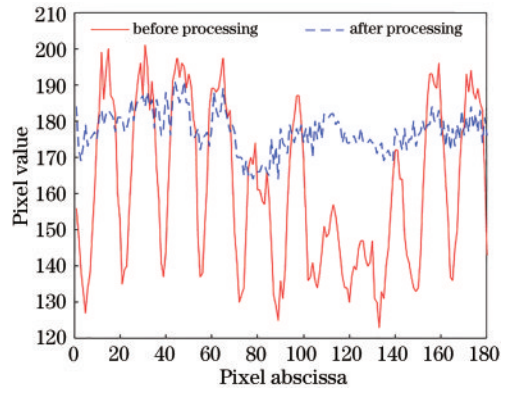


图6 处理前后像素值分布对比

Fig. 6 Comparison of pixel value distribution before and after processing

向拆分的思想,对修复了蜂窝效应伪影的16幅子图像进行重构,得到了与原始图像同等尺寸的图像。

4 实验结果分析

为了清楚所提方法对光纤传像束引起的图像的蜂窝效应伪影的去除效果,选取了在空域和频域用于去除蜂窝效应伪影的主流方法和所提方法进行对比实验,各种方法均在同一实验平台进行测试,各方法参数均按照典型实验参数进行设置。实验平台具体参数为 Intel Core i5-4200@2.8 GHz,内存 12 GB,程序开发平台为 Visual Studio 2017 @ Opencv4.5。使用光纤传像束采集系统采集含有蜂窝效应伪影的图像。表1展示了光纤传像束的相关参数。

表1 光纤传像束的相关参数

Table 1 Related parameters of imaging optical fiber bundle

Parameter	Value
Imaging optical fiber bundle length /mm	1350
Effective cross-section diameter /mm	1.8
Diameter of monofilament fiber / μm	15
Numerical aperture (NA)	0.6

使用峰值信噪比 (PSNR)和结构相似性 (SSIM)两种图像评价指标对各种算法针对蜂窝效应伪影的去除效果进行量化评价,计算公式分别为

$$\begin{cases} E_{\text{MSE}} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [D(i, j) - C(i, j)]^2}{m \times n}, \\ R_{\text{PSNR}} = 10 \times \left[(2 \log_{10} V_{\text{max}}) - \log_{10} E_{\text{MSE}} \right] \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} l(D, C) = \frac{2\mu_D \mu_C + c_1}{\mu_D^2 + \mu_C^2 + c_1}, c(D, C) = \frac{2\sigma_D \sigma_C + c_2}{\sigma_D^2 + \sigma_C^2 + c_2}, s(D, C) = \frac{2\sigma_{DC} + c_3}{\sigma_D \sigma_C + c_3}, \\ V_{\text{SSIM}}(D, C) = [l(D, C)]^\alpha \times [c(D, C)]^\beta \times [s(D, C)]^\gamma \end{cases}, \quad (12)$$

式中: D 为经过算法处理后的图像; C 表示干净的不含蜂窝效应伪影的图像; E_{MSE} 为图像的均方差; V_{max} 表示

图像可能的最大像素值,针对8位的无符号图像, V_{max} 取 255; $l(D, C)$ 、 $c(D, C)$ 、 $s(D, C)$ 分别表示经过算法处

理后的图像 D 和不含蜂窝效应伪影的图像 C 之间的亮度 (luminance)、对比度 (contrast)、结构 (struct) 的相似性; μ_D 和 μ_C 分别表示了图像 D 和图像 C 的标准差, σ_D 和 σ_C 代表了这两幅图像的方差, σ_{DC} 表示两幅图像的协方差; c_1, c_2, c_3 为常数, 且 $c_3 = c_2/2$ 。

PSNR 和 SSIM 评价指标属于客观质量评价方法, 需要干净图像作为参考, 而光纤传像束成像系统所采集的自然图像缺乏对应的干净图像, 为此本文将普通工业相机采集到的自然图像作为干净图像, 再对其添加蜂窝效应伪影来模拟干扰图像。通过对采集到的含有蜂窝效应伪影图像进行理论分析得知, 伪影在图像中表现为一圈低于纤芯部分像素的低像素带, 这表明可以将干净图像划分为未受干扰区和干扰区, 保持未受干扰区的图像像素不变, 只针对受干扰区进行填充。真实的蜂窝效应伪影处的像素值受到两边纤芯的影响, 距离纤芯越远像素值越低, 位于两个纤芯中间区域的蜂窝效应伪影的像素值最低, 即近似服从正态分布, 因此可以按照此分布方式对受干扰区域进行填充。图 7 展示了在干净图像中添加了蜂窝效应伪影后的效果。

4.1 定量对比

利用工业相机采集的干净图像生成带有蜂窝效应

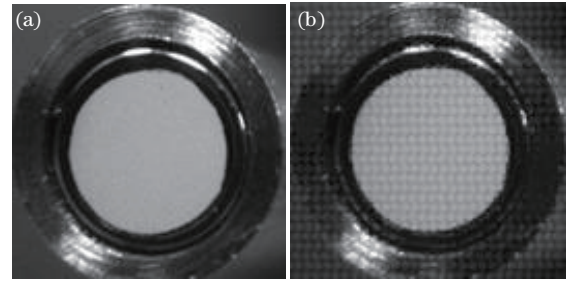


图 7 添加蜂窝效应伪影后的效果。(a)工业相机采集的干净图像; (b)仿真得到的干扰图像
Fig. 7 Effect after adding honeycomb artifacts. (a) Clean image captured by industrial camera; (b) interference image obtained by simulation

伪影的图像, 再通过所提方法对生成的蜂窝效应伪影图像进行处理, 最后通过计算处理前后图像的 PSNR 和 SSIM 值来对不同方法进行定量分析。为了验证所提方法的有效性, 设计了两组对比实验来进行验证, 分别为实验 A 和实验 B。图 8 和图 9 展示了各个算法对不同图像中的蜂窝效应伪影的去除情况, 并对各算法的处理结果的同一细节部分进行了放大。表 2 为各种算法处理结果的量化对比。

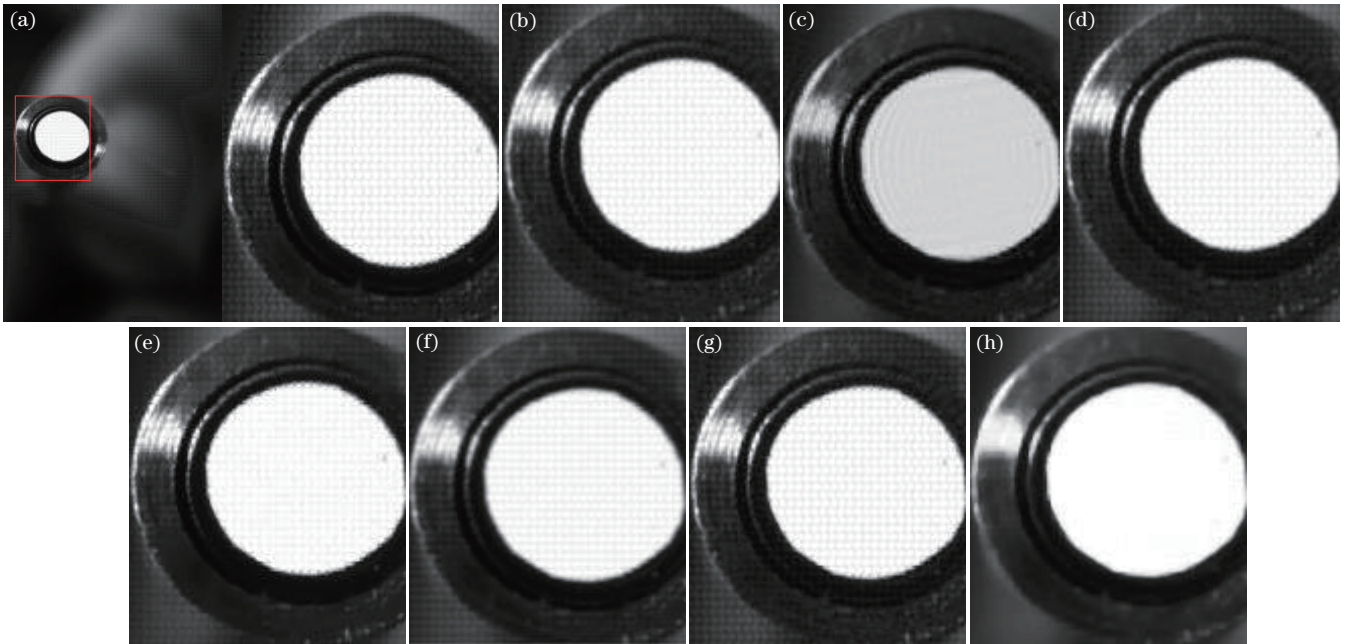


图 8 实验 A 中蜂窝效应伪影去除结果对比。(a)受干扰图; (b)均值滤波; (c)文献[11]中的方法; (d)文献[5]中的方法; (e)文献[15]中的方法; (f)文献[6]中的方法; (g)引导滤波; (h)所提方法

Fig. 8 Comparison of artifact removal results of honeycomb in experiment A. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

通过表 2 可以看出, 相比于其他算法, 所提方法具有更高的 PSNR 和 SSIM 值, 这是因为所提方法不是无差别处理图像的所有像元, 而是只针对位于伪影区域的像元进行修复的, 且针对不同的像元采用了不同的补偿系数, 该补偿系数是自适应的, 因此通过所提方法处理后的图像能有更高的 PSNR 和 SSIM 值。相比于

原始干扰图像, 所提方法处理图像的 PSNR 最大提升了 52.32%, SSIM 最大提升了 65.52%。PSNR 是衡量处理前后图像对应像元像素值之间误差的指标, PSNR 高表明经过处理后的图像质量较好。SSIM 表征处理前后图像的亮度、对比度及结构之间的相似性, SSIM 值大表示经过处理后的图像与干净图像之间的差距小。

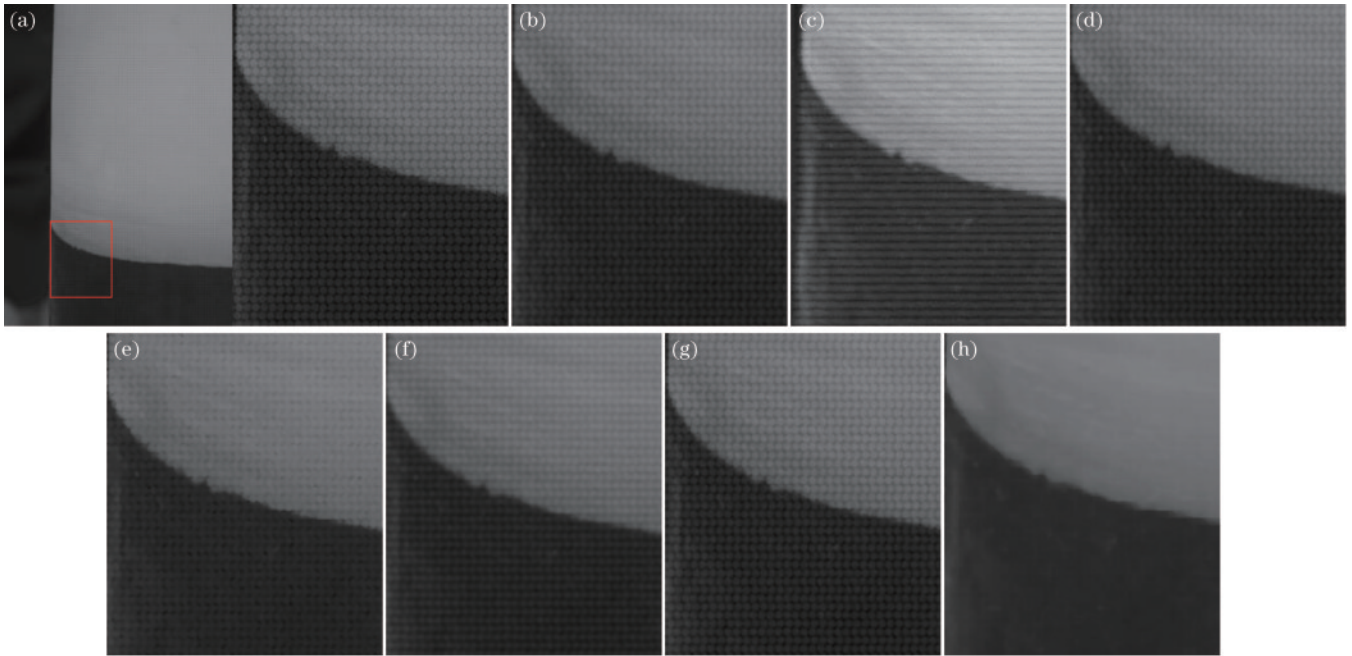


图9 实验B中蜂窝效应伪影去除结果对比。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 9 Comparison of artifact removal results of honeycomb in experiment B. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

表2 蜂窝效应伪影去除结果量化指标

Table 2 Quantitative index for removal results of honeycomb artifacts

Method	PSNR /dB		SSIM	
	Experiment A	Experiment B	Experiment A	Experiment B
Interfered image	26.15	26.70	0.55	0.58
Mean filtering	28.78	29.52	0.76	0.82
Method in Ref. [11]	14.83	26.91	0.49	0.64
Method in Ref. [5]	28.77	29.51	0.75	0.83
Method in Ref. [15]	31.52	33.14	0.82	0.90
Method in Ref. [6]	29.54	30.47	0.81	0.89
Guided filtering	28.26	28.87	0.72	0.76
Proposed method	33.58	40.67	0.87	0.96

4.2 定性分析

为了验证所提方法对实际的蜂窝效应伪影的修复效果,采用搭建好的光纤传像束成像系统采集了含有真实蜂窝效应伪影的图像,使用各种算法对图像进行测试,测试结果如图10和图11所示,并对各算法的处理结果的同一细节部分进行了放大。

均值滤波、引导滤波、文献[5]中的方法、文献[15]中的方法都属于空域的修复方法,从图10和图11中的(b)、(d)、(e)、(g)可以看出,该类算法对所采集到的图像中存在的蜂窝效应伪影的修复情况并不理想,这是因为一般的空域方法都是针对特定的图像进行设计的,算法泛化性较差,从而造成修复结果较差;文献[11]中的方法和文献[6]中的方法属于频域的修复方法,处理结果如图10和图11中的(c)、(f)所示,相比空

域的处理方法,这类方法表现更好,但会造成图像细节丢失;相比于这些算法,所提方法对蜂窝伪影的修复效果更好,且对光纤传像束输出端面上的刮伤引起的不正常线条都有一定的抑制作用,此外在边缘保护能力上也优于其他算法,如图10(h)所示。此外为了进一步验证所提方法的有效性,使用光纤传像束成像系统采集在不同光照强度及不同波长的单色光照射环境下的图像质量测试卡图像,并对比不同算法的处理效果,处理结果如图12~15所示。其中图12和图13展示了不同光照强度下不同算法的处理效果,图13~15展示了在同一光照强度、不同波长的单色光照射环境下不同算法的处理效果。

图12和图13展示了各种算法对光纤传像束成像系统在光强为100 lx和150 lx的白色光照下获取的图

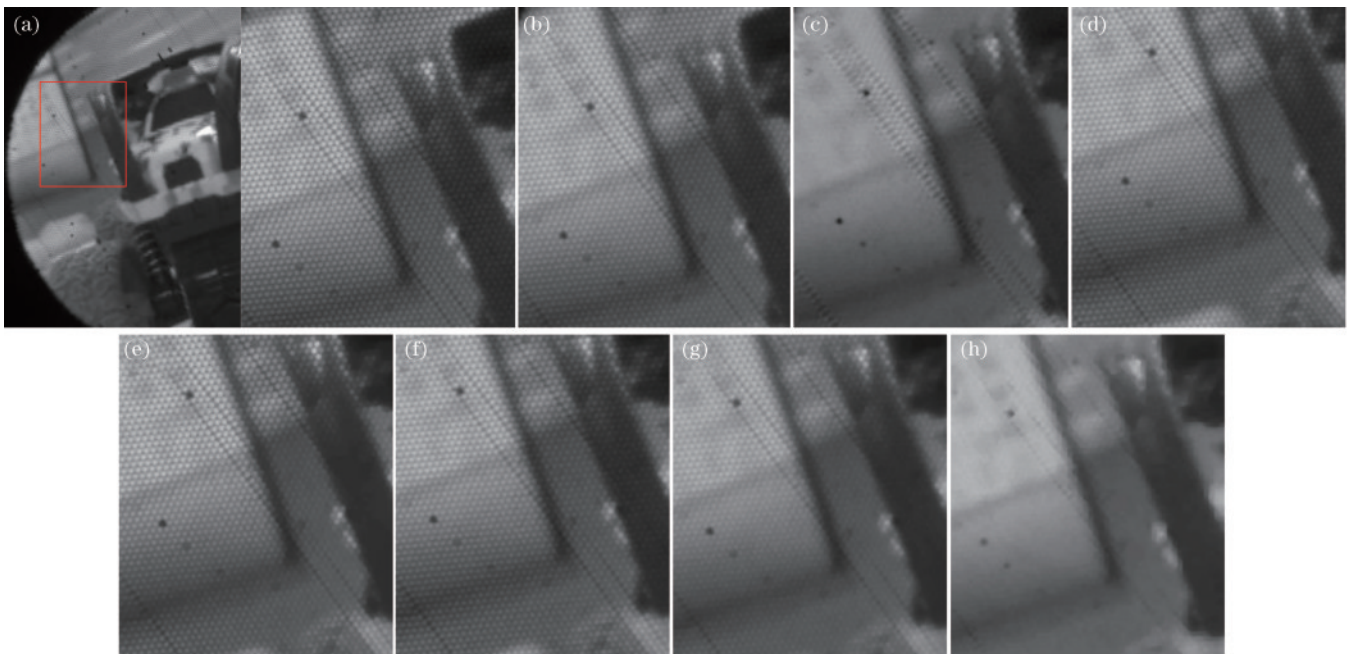


图 10 实验 C 中真实的蜂窝效应伪影去除结果对比。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;
(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 10 Comparison of real artifact removal results of honeycomb in experiment C. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

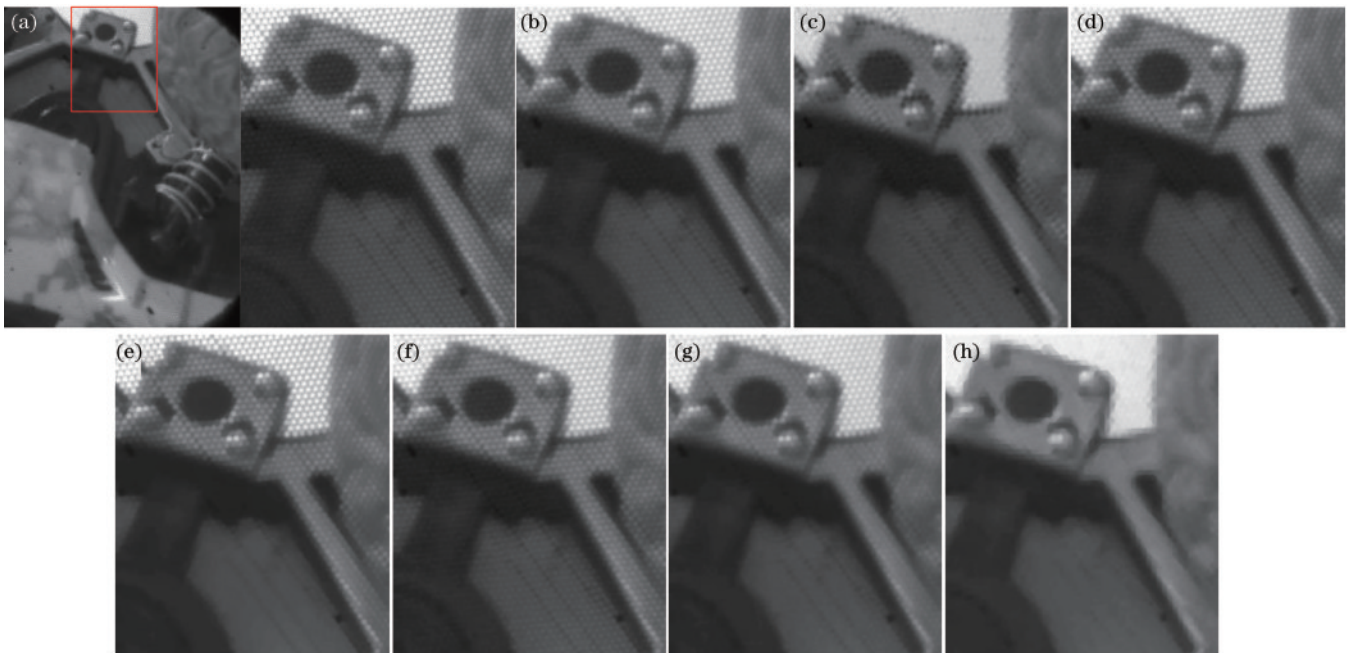


图 11 实验 D 中真实的蜂窝效应伪影去除结果对比。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;
(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 11 Comparison of real artifact removal results of honeycomb in experiment D. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

像的处理效果。从图 12 和图 13 的处理结果可以看出各算法对不同光强环境下获取的图像存在的蜂窝效应伪影均有一定效果。其中图 12(c)和图 13(c)为文献[11]中的方法的处理效果,算法本质是使用陷波滤波器对图像进行处理,从处理结果可以看出,该方法能在

一定程度上消除蜂窝效应伪影,但是图中仍残留着部分伪影,并且使用该方法对彩色图像进行处理时需要分通道进行,并且通道分离后 G(绿色)通道值更大,在使用文献[11]中的方法后,G 通道相比于另外两个通道更大,使得处理后的结果出现了色偏。图 12 和图 13

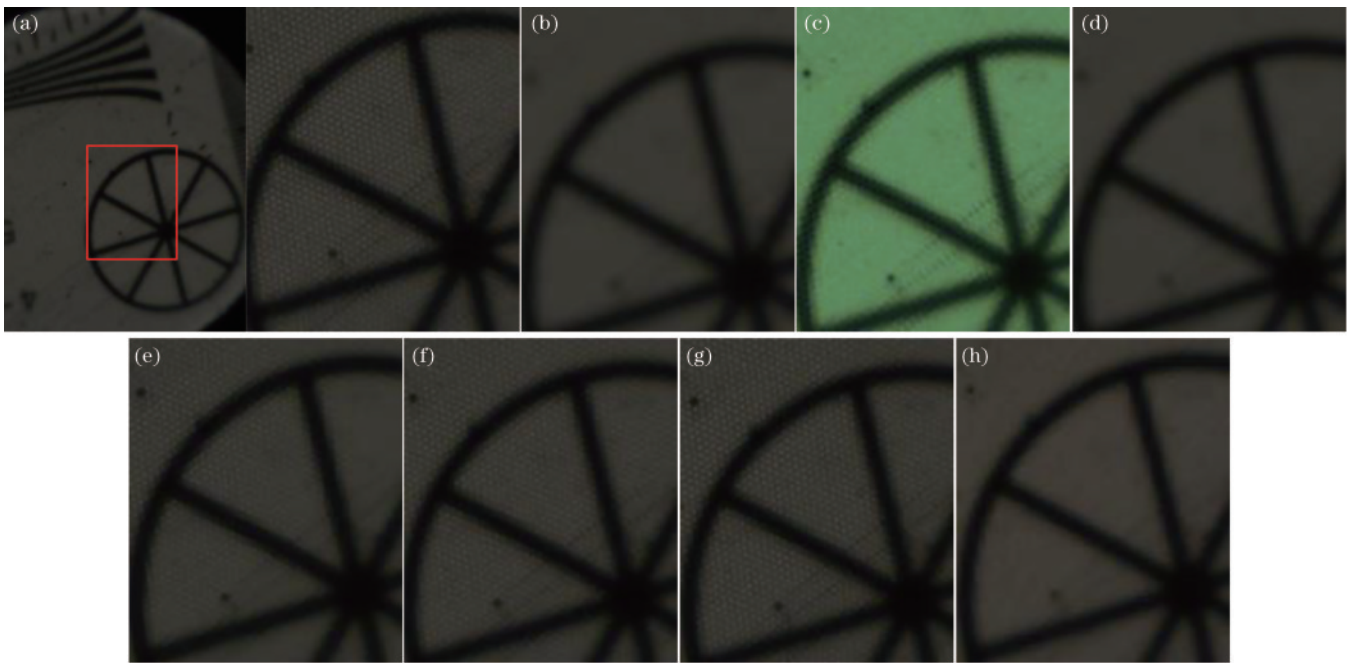


图 12 白色光照明,光强为 100 lx 的环境。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 12 Environment with white light illumination and light intensity of 100 lx. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

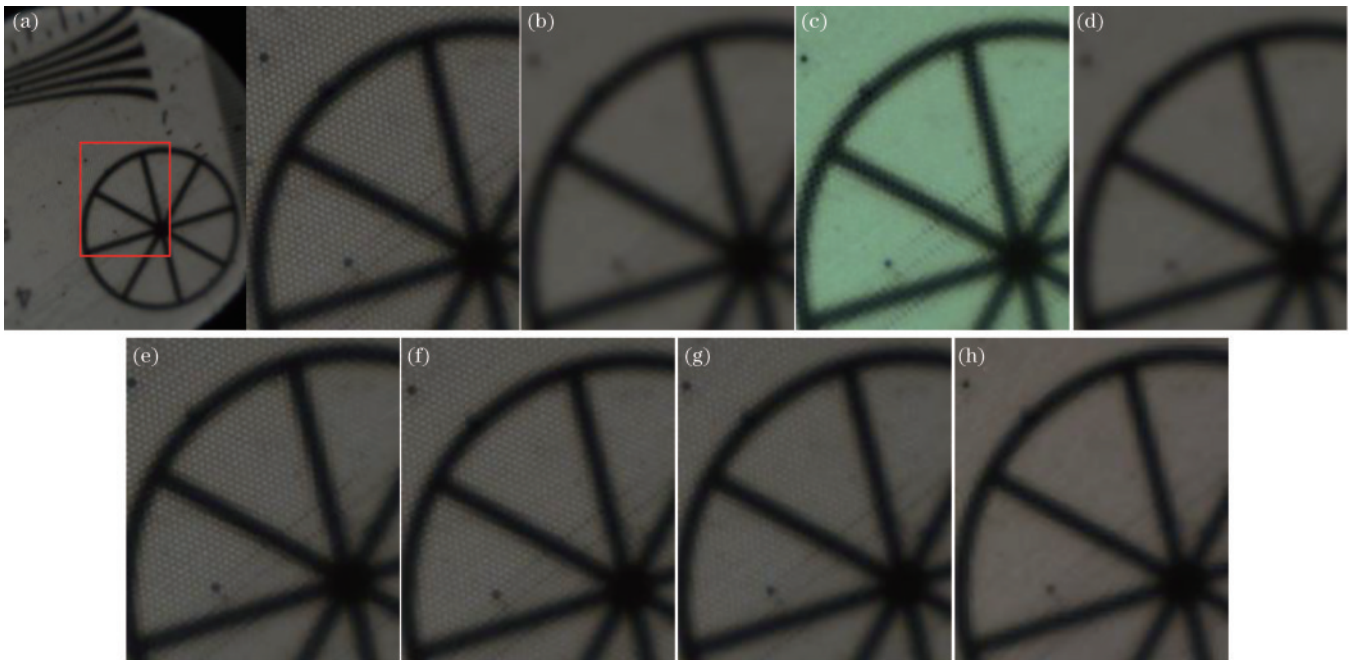


图 13 白色光照明,光强为 150 lx 的环境。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 13 Environment with white light illumination and light intensity of 150 lx. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

中的(b)、(d)、(e)、(g)属于空域方法处理的结果,可以明显看出该类方法对蜂窝效应伪影有一定的去除作用,但会使得图像变得模糊,如图 12 和图 13 中的(b)、(d)所示,或对蜂窝效应伪影的滤除作用不够明显,如图 12 和图 13 中的(e)、(g)所示。此外文献[6]中的方

法对蜂窝效应伪影的滤除效果不明显。相比于其他算法,所提方法在图像清晰度和蜂窝效应伪影的去除效果上均表现优秀,这是因为在处理图像时,所提方法使用了自适应阈值机制对图像中的像元进行了筛选,只针对位于伪影区域的像元进行修复,且针对不同的像

元采用了不同的补偿系数,该补偿系数是自适应的,可以很好应对各种情况。

通过图 13~15 可以看出,所提方法对采集到的被不同波长的单色光照射的质量测试卡图像的处理结果均表现优秀。在蓝色光照明、光强为 150 lx 时,蜂窝效

应伪影变得不那么明显,但图中仍然存在蜂窝效应伪影;在绿色光照明、光强为 150 lx 时,蜂窝效应伪影表现明显。针对不同的单色光环境,各种对比算法对伪影均有一定的去除效果,但仍然不可避免地会存在模糊、去除效果不明显的问题,与此相比,所提方法在图

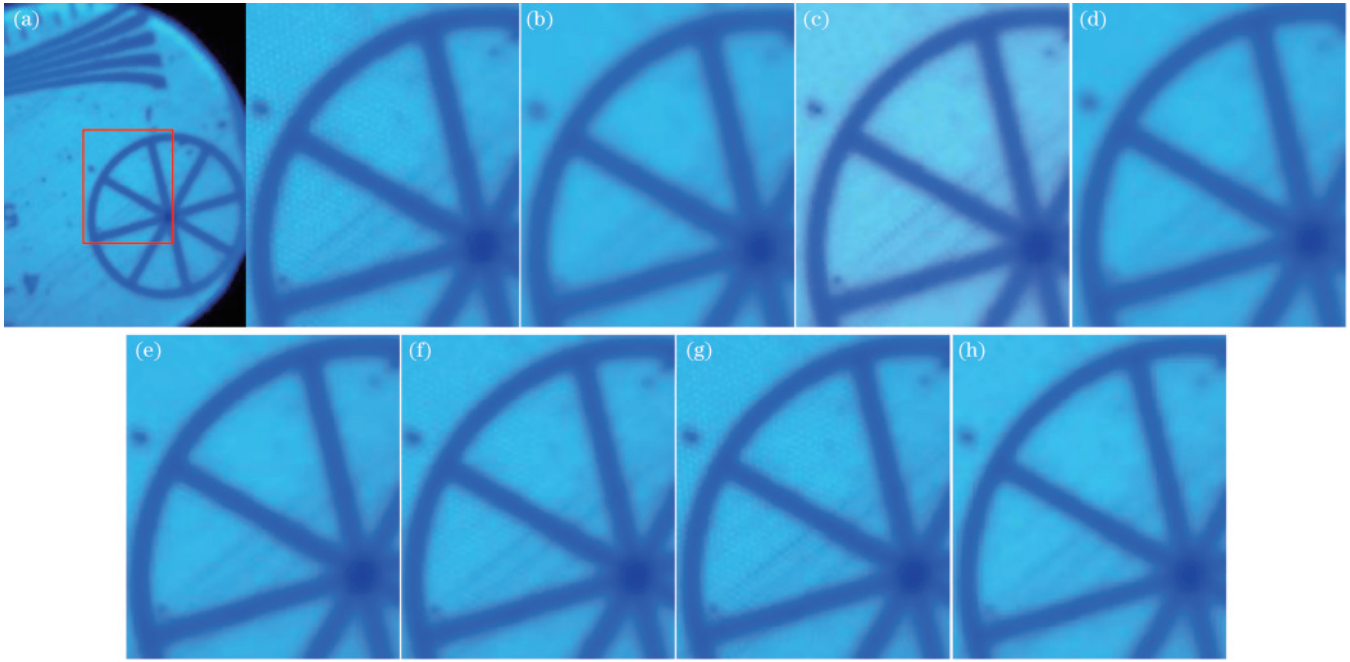


图 14 蓝色光照明,光强为 150 lx 的环境。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 14 Environment with blue light illumination and light intensity of 150 lx. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

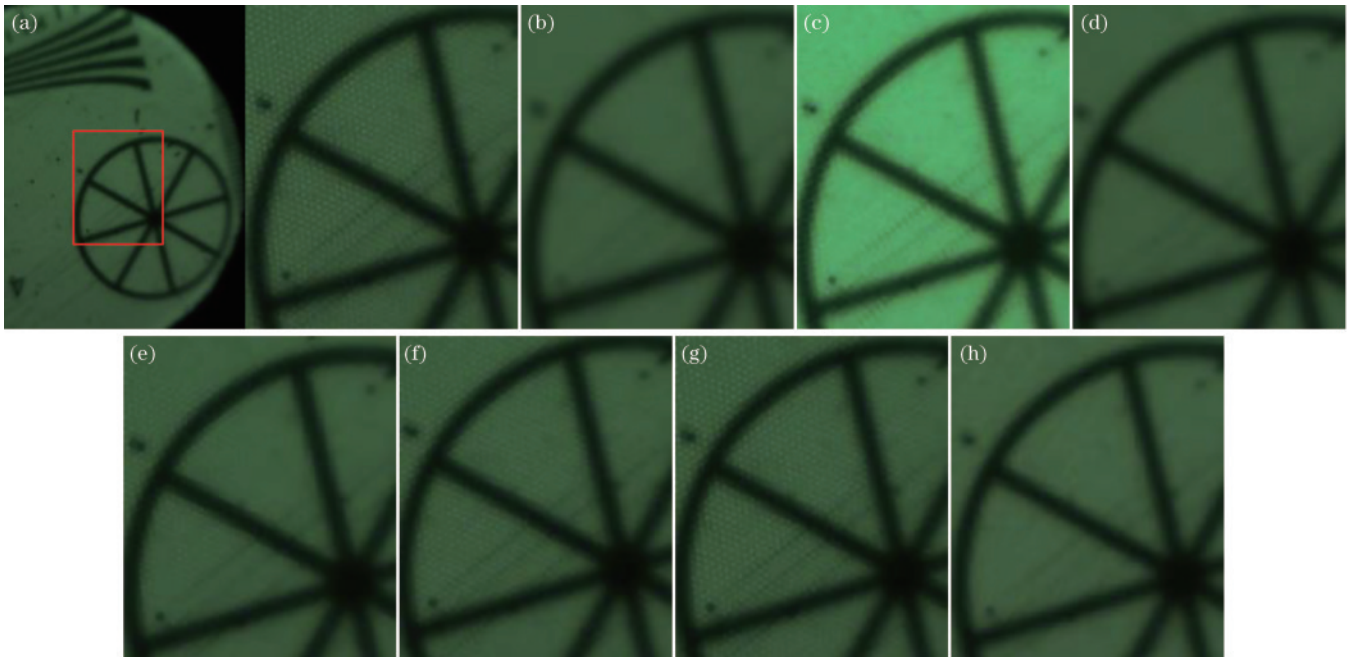


图 15 绿色光照明,光强为 150 lx 的环境。(a)受干扰图;(b)均值滤波;(c)文献[11]中的方法;(d)文献[5]中的方法;(e)文献[15]中的方法;(f)文献[6]中的方法;(g)引导滤波;(h)所提方法

Fig. 15 Environment with green light illumination and light intensity of 150 lx. (a) Interfered graph; (b) mean filtering; (c) method in Ref. [11]; (d) method in Ref. [5]; (e) method in Ref. [15]; (f) method in Ref. [6]; (g) guided filtering; (h) proposed method

像清晰度和蜂窝效应伪影去除效果方面均表现优秀。

5 结 论

针对传像光纤成像中存在的蜂窝效应伪影,根据蜂窝效应伪影产生机理及其相关特性提出了一种能有效修复蜂窝效应伪影的方法。通过分析蜂窝效应伪影在图像中的像素分布,利用工业相机采集到的图像模拟得到了含有蜂窝效应伪影的图像,测试了多种算法对蜂窝效应伪影的修复效果。结果表明所提方法具有更高的 PSNR 和 SSIM 值。为了进一步验证所提方法的有效性,还测试了不同算法对传像光纤成像中存在的蜂窝效应伪影的修复效果,从实验结果看,与空域、频域中的修复方法相比,所提修复方法对蜂窝效应伪影的修复效果更好,边缘保护能力更强。

参 考 文 献

- [1] 李桂菊,王延杰. 光学系统中的光纤传像束[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 28-32.
Li G J, Wang Y J. Optical fiber bundle in optical systems [J]. OME Information, 2010, 27(12): 28-32.
- [2] 孙磊. 大截面光纤传像束及应用[J]. 应用光学, 2000, 21(S1): 58-60.
Sun L. Large cross-section fiber bundle and its application [J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(S1): 58-60.
- [3] 孙宇杰. 光纤传像束系统的图像重构关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Sun Y J. Research on key technologies of image reconstruction in optical fiber image bundle system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [4] Perperidis A, Dhaliwal K, McLaughlin S, et al. Image computing for fibre-bundle endomicroscopy: a review[J]. Medical Image Analysis, 2020, 62: 101620.
- [5] Göbel W, Kerr J N D, Nimmerjahn A, et al. Miniaturized two-photon microscope based on a flexible coherent fiber bundle and a gradient-index lens objective [J]. Optics Letters, 2004, 29(21): 2521-2523.
- [6] Suter M, Reinhardt J, Montague P, et al. Bronchoscopic imaging of pulmonary mucosal vasculature responses to inflammatory mediators[J]. Journal of Biomedical Optics, 2005, 10(3): 034013.
- [7] Elter M, Rupp S, Winter C. Physically motivated reconstruction of fiberoptic images[C]//18th International Conference on Pattern Recognition, August 20-24, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2006: 599-602.
- [8] Rupp S, Elter M, Winter C. Improving the accuracy of feature extraction for flexible endoscope calibration by spatial super resolution[C]//2007 9th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 22-26, 2007, Lyon, France. New York: IEEE Press, 2007: 6566-6572.
- [9] Han J H, Lee J, Kang J U. Pixelation effect removal from fiber bundle probe based optical coherence tomography imaging[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7427-7439.
- [10] Han J H, Yoon S M. Depixelation of coherent fiber bundle endoscopy based on learning patterns of image prior[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3212-3214.
- [11] Lee C Y, Han J H. Elimination of honeycomb patterns in fiber bundle imaging by a superimposition method[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2023-2025.
- [12] Lee C Y, Han J H. Integrated spatio-spectral method for efficiently suppressing honeycomb pattern artifact in imaging fiber bundle microscopy[J]. Optics Communications, 2013, 306: 67-73.
- [13] Cheon G W, Cha J, Kang J U. Random transverse motion-induced spatial compounding for fiber bundle imaging[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4368-4371.
- [14] Liu X, Zhang L J, Kirby M, et al. Iterative l_1 -min algorithm for fixed pattern noise removal in fiber-bundle-based endoscopic imaging[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33(4): 630-636.
- [15] Zheng Z, Cai B, Kou J T, et al. A honeycomb artifacts removal and super resolution method for fiber-optic images[M]//Chen W D, Hosoda K, Menegatti E, et al. Intelligent autonomous systems 14. Advances in intelligent systems and computing. Cham: Springer, 2017, 531: 771-779.