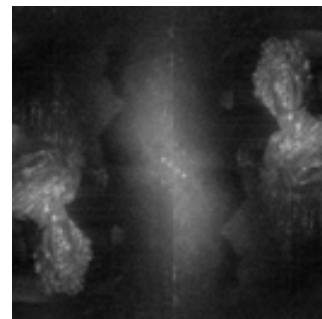




DOI: 10.12086/oe.2019.180418

透火焰红外数字全息图像的分辨率增强算法

柴金燕¹, 黄晔^{2,3*}, 陈春燕¹, 杨超⁴¹ 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;² 宁波中国科学院信息技术应用研究院, 浙江 宁波 315100;³ 宁波中科集成电路设计中心有限公司, 浙江 宁波 315100;⁴ 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210046

摘要: 近年来, 高温干扰遮蔽情况下利用红外热成像与数字全息成像相结合的新技术观察火场中目标成为时下的研究重点。理论上火焰和浓烟对长波长的红外数字全息成像没有影响, 但在现实火场环境中, 燃烧物的大颗粒灰尘将会干扰光路, 严重增加了全息图重建图像的噪声。本文提出了一种新的图像处理算法来抑制红外数字全息重建的噪声。该算法利用双边滤波器配合拉普拉斯金字塔算法将全息重建图像的细节和能量层分开, 再对细节层进行滤波, 然后用反向拉普拉斯金字塔算法将分离的层叠加回重建图像中, 从而提高重建像的分辨率, 并通过模拟火场环境验证了该算法对改善红外数字全息图重建像的分辨率具有显著效果。

关键词: 高温干扰; 红外数字全息; 图像处理; 图像噪声; 拉普拉斯金字塔算法

中图分类号: TP391; TB872

文献标志码: A

引用格式: 柴金燕, 黄晔, 陈春燕, 等. 透火焰红外数字全息图像的分辨率增强算法[J]. 光电工程, 2019, 46(4): 180418

Resolution enhancement algorithm based on infrared digital holography imaging through flame

Chai Jinyan¹, Huang Chao^{2,3*}, Cheng Chunyan¹, Yang Chao⁴¹ Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;² Ningbo China Academy of Information Technology Application Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315100, China;³ Ningbo Zhongke Integrated Circuit Design Center, Ningbo, Zhejiang 315100, China;⁴ College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China

Abstract: In recent years, the use of new technologies combining infrared thermal imaging and digital holographic imaging to observe the targets in the fire field has become a current research focus. In theory, flame and smoke have no effect on long-wavelength infrared digital holography, but in the real fire environment, large particles of dust from the combustion will interfere with the light path, seriously increasing the reconstruction noise of the hologram. This paper proposes a new image processing algorithm to suppress the noise of infrared digital holographic reconstruction. The algorithm uses a bilateral filter combined with the Laplacian pyramid algorithm to separate the details and

收稿日期: 2018-08-01; 收到修改稿日期: 2018-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0700501); 宁波国家高新区(新材料科技城)重大科技专项(重大技术创新项目); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX17_0233)

作者简介: 柴金燕(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事图像处理及嵌入式系统开发的研究。E-mail: 892165299@qq.com

通信作者: 黄晔(1972-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事智能感知技术的研究。E-mail: chuang@ict.ac.cn

energy layers of the holographic reconstructed image, filters the detail layer, and then superimposes the separated layers back into the reconstructed image by the inverse Laplacian pyramid algorithm. Therefore, the resolution of the reconstructed image is improved, and the simulation of the fire field environment proves that the algorithm has a significant effect on improving the resolution of the reconstructed image of the infrared digital hologram.

Keywords: high temperature interference; infrared digital holography; image processing; image noise; Laplacian pyramid method

Citation: Chai J Y, Huang C, Cheng C Y, et al. Resolution enhancement algorithm based on infrared digital holography imaging through flame[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(4): 180418

1 引言

近几年的可见光波段数字全息研究已经建立了相当深厚的理论基础, 并且其相应的理论已经被应用到科学研究和工业技术等方面^[1]。利用红外热成像与数字全息成像相结合实现火场搜救成为新的研究热点之一^[1]。在国际上有报道的文献中, Paturzo 等人的团队正在研究这个新兴方向, 其研究方向包括物体动态全息三维场景的合成与显示^[2]; 二维动态位相光栅在数字全息中的超分辨率^[3]; 用远红外数字全息技术在烟雾和火焰中对活体进行成像^[4]等。而国内对红外数字全息领域的研究成果尚无相关报道。

如图 1(b)、1(c)所示, 在发生火灾的区域中, 使用普通的可见光成像方式无法观察到火场中目标, 不利于火场救援。如图 1(d)所示, 使用红外热成像观察的方式也有极大的不足。利用红外数字全息可以透过火焰和烟雾观察目标, 但经过模拟火场的实验发现, 通过红外传感器采集的干涉图非常不清晰, 重建后的图像细节模糊, 由于物体表面粗糙度变化超过光波长引起的散斑噪声, 不利于观察。当相干光束照射随机散射物体的粗糙表面时, 由于幅度的变化, 散射于不同表面点的波会发生波动。这些散射波在记录平面中叠加形成散斑噪声。在全息重建中, 人们提出了许多

抑制噪声技术。大多数方法通过复用全息图^[5-7]或引入旋转元件来进行时间积分^[8-12]。这两种方法都能有效地降低散斑噪声。然而, 在这些方法中也存在一些缺点。例如, 旋转元件法存在系统扰动的问题。另一方面, 时域方法只是对重建图像进行平滑处理, 牺牲了图像细节。为此, 本文设计了一个抑制重建图像噪声, 增强重建图像细节, 从而提高其分辨率的图像处理算法, 显著提高了重建图像的分辨率。

2 理论推导

2.1 实验装置及光路

整个光学装置是基于简单的 Mach-Zender 干涉, 方案如图 2。本文使用的激光源是在连续模式下工作的功率可调谐的 10.6 μm CO₂ 红外激光器, 输出功率被设定为 28 W。使用的光学镜片均是普通的透红外透镜, BS 代表 20/80 分光镜。M1, M2, M3 和 M4 是反射镜。VA 是消光比为 500 : 1 的衰减器。L1 和 L2 是焦距为 10 cm 的凹透镜。成像目标是一个 60 cm × 35 cm 的石膏雕像, H 是自制火盆, 燃烧物是多种日用物品混合(木屑, 杂草, 布条等)。本文使用的探测器是 384×288 非晶硅薄膜非制冷热像仪, 热像仪的成像透镜已取出。

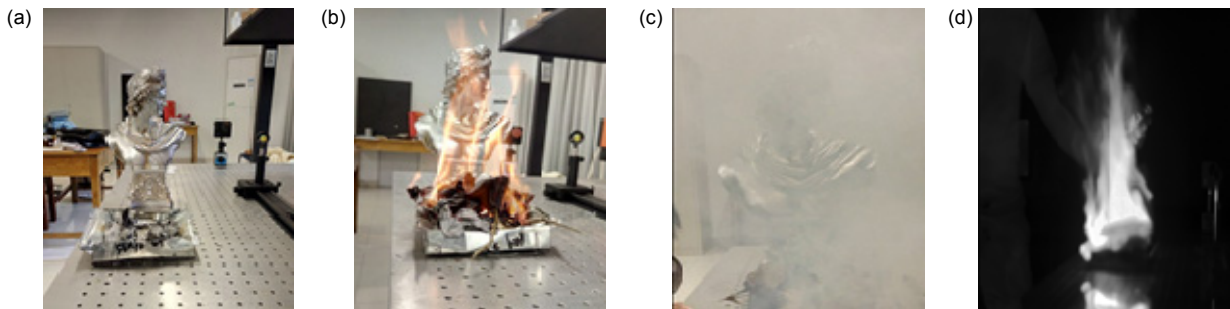


图 1 模拟火场成像效果。(a) 成像物体; (b) 透火焰成像; (c) 透浓烟成像; (d) 透火焰红外热像仪成像

Fig. 1 Simulating the fire field imaging effect. (a) Imaging objects; (b) Imaging through flame; (c) Imaging through thick smoke; (d) Imaging with a thermal imaging camera through a flame

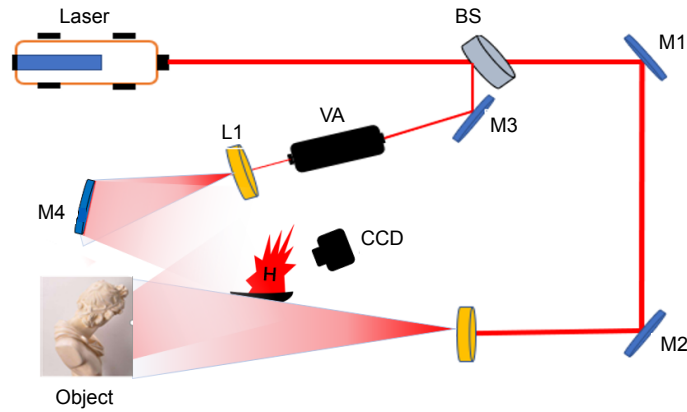


图 2 基于简单的 Mach-Zender 干涉的光学装置
Fig. 2 Optical device based on simple Mach-Zender interference

在采集干涉条纹图时，本文采集了透火焰与不透火焰两种条纹图进行对比，从图 3(a)和 3(b)中可以看出，物光透过火焰形成干涉条纹后，条纹变得模糊，所以，重建出来的图像也就相对模糊(如图 4)，而且含有很多噪声。为此，本文参考张文理等人的空间外差光谱仪的干涉图校正技术对干涉图进行校正^[13]，但由于远红外光波长较长，该方法对于改善本文的红外干涉图效果不明显。所以必须解决这一问题，才能真正地实现透火焰浓烟观察目标。

2.2 分辨率增强算法原理

图像金字塔是图像中多尺度表达的一种方式。由于经过下采样的过程，金字塔的 $K+1$ 层比 K 的分辨率更低。在拉普拉斯金字塔中，将高斯滤波器应用于每一层来提取图像的细节信息^[14]。也就是说，可在金字塔分离过程之后逐层提取原始图像的大部分细节信息。

当透过火焰和浓烟采集红外干涉条纹并重建时，从图 3(b)和图 4(b)中可以看出，由于红外焦平面的像

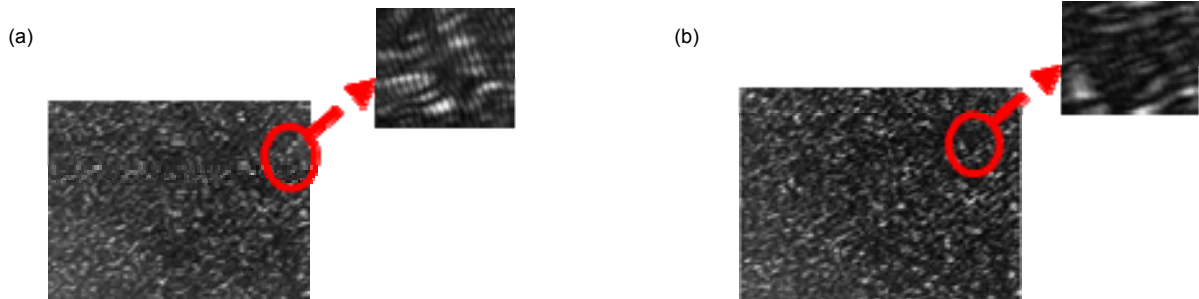


图 3 干涉条纹图。(a) 无遮挡下的干涉条纹图；(b) 透火焰浓烟下的干涉条纹图
Fig. 3 Interference fringe pattern. (a) Hologram without obstruction; (b) Hologram obtained by flame and smoke

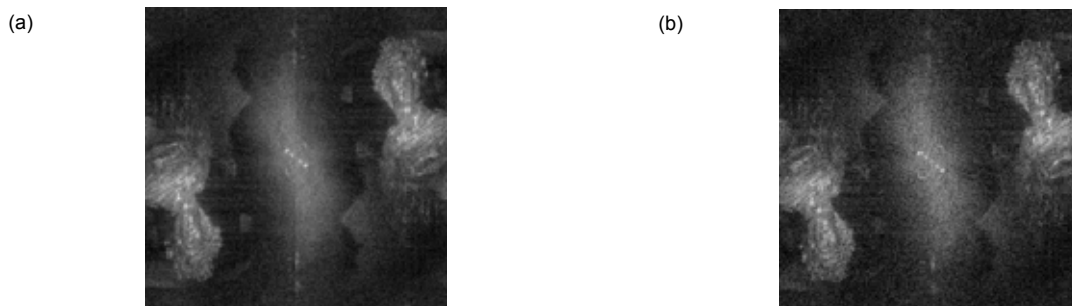


图 4 全息图重建像。(a) 无遮挡下的重建像；(b) 透火焰浓烟下的重建像
Fig. 4 Reconstruction of hologram. (a) Reconstruction of hologram without obstruction; (b) Reconstruction of holograms through flames and smoke

素间距比普通可见光 CCD 更大,且分辨率更低,还有火焰和浓烟的干扰,所以干涉条纹图上的噪声严重影响重建图像效果。在图 4(b)中,本文将图像重建的维度扩展到 1024×1024,以避免频谱重叠^[15]。根据图 4(b)可以看到,噪声的强度几乎等于重建图像,本文使用中值滤波器和均值滤波器来降低噪声,但是噪声降低的同时,图像的细节也降低了,图像变得模糊。本文设计的图像分辨率增强算法克服了这种情况,如图 5,本文使用图像金字塔将透火焰浓烟下的重建像分割成多个层,拉普拉斯金字塔包含了图像的细节信息,高斯金字塔包含了图像的能量信息。从图像的细节层来看,原始全息图已经被分离成 4 层,原始拉普拉斯分层算法在区分噪声和细节方面效果并不理想。为了可以降低散斑噪声并获得良好的图像效果,必须找到一种区分噪声和细节信息的新方法。

研究表明,双边滤波器是一种区分细节和噪声的有效方法^[16]。双边滤波器的基本理论是利用两个高斯核函数的参数选择,对噪声和细节进行判别,从而从图像中选择细节信息,同时剔除噪声信息。双边滤波器的表达式如下:

$$f_{BF}(x,y) = \frac{\sum_i \sum_j f(i,j)w(x,y,u,j)}{\sum_i \sum_j w(x,y,u,j)},$$

其中:空间邻近度因子为

$$d(x,y,i,j) = \exp\left[-\frac{(x-i)^2 + (y-j)^2}{2\delta_d^2}\right].$$

亮度相似因子为

$$r(x,y,i,j) = \exp\left[-\frac{|f(x,y) - f(i,j)|^2}{2\delta_r^2}\right].$$

双边滤波器的权重等于空间邻近度因子和亮度相似因子的乘积:

$$w(x,y,i,j) = \exp\left[-\frac{|f(x,y) - f(i,j)|^2}{2\delta_r^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{|f(x,y) - f(i,j)|^2}{2\delta_d^2}\right].$$

空间邻近因子为高斯滤波器系数,像素距离越远,权重越小。其中 δ_r 是空间距离的标准方差,当 δ_r 越大时,图像平滑效果越好,亮度相似因子与空间像素差值有关,像素差值越大,权重越小^[16]。这就是双边滤波器能够去除噪声也可以保护细节的原因,对同等灰度差像素平滑作用越大,保边效果越差。亮度相似因子中的 δ_d 为灰度差值的标准方差,本文中给出的参考是 δ_d ,一般取高斯噪声标准差的 2 倍。

由于双边滤波器的良好特性,本文将传统的拉普拉斯金字塔分离算法做了一些改进,使其与双边滤波器相配合,具体流程如图 6,原始图像经过该流程分解为能量图像和细节图像。虽然双边滤波器可以将图像的能量和细节部分分开,但是细节成分中依然存在一些被误认为是细节的噪声,所以本文将分离出来的细节图像又做了一次自适应中值滤波。常见的中值滤波器的窗口大小是固定不变的,这就不能在去噪的同时保护图像的细节,所以要对它进行一些改进。自适应中值滤波器在去除噪声的过程中,滤波器会根据需求自动更改窗口的大小^[17]。自适应中值滤波器的特性是会根据设定好的条件来判断该像素点是噪声还是细

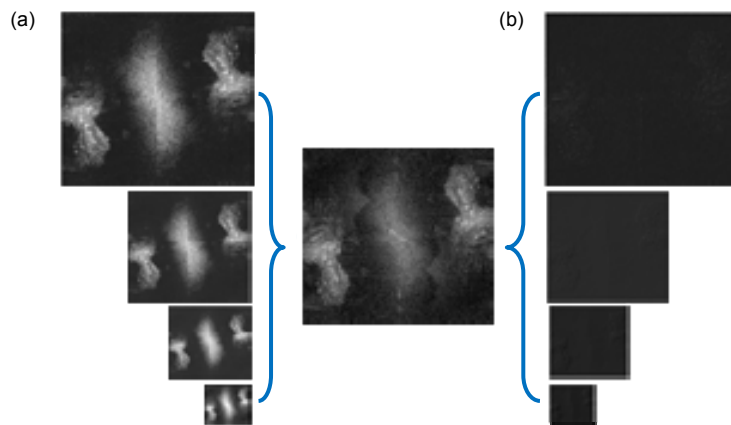


图 5 金字塔分层结果。(a) 高斯金字塔; (b) 拉普拉斯金字塔
Fig. 5 Pyramid stratification results. (a) Gaussian pyramid; (b) Laplacian pyramid

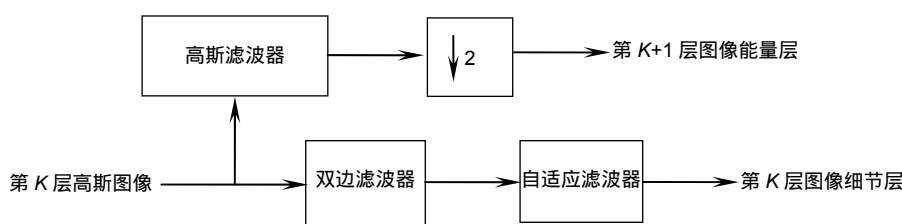


图 6 金字塔分层算法流程

Fig. 6 Pyramid layering algorithm flow

节，如果是则用邻域中值替换掉当前像素；否则就不作改变。这就达到了一个很好的去除图像噪声保护图像细节的效果。

由于双边滤波器和自适应滤波器的特性，本文设计如图 6 的金字塔分层算法流程。然后，在 CPU 为 E5-2680-V3，主频为 2.5 GHz，内存为 32.0 GB 的电脑上使用 Matlab 2015b 运行本文的算法，新的金字塔分层结果如图 7 所示，新的细节层更加清晰。

在得到清晰的图像细节层以后，将 $K+1$ 层的双边滤波金字塔细节图像插值到 K 层细节图像的维度进行简单相加，最后与第一层的高斯金字塔相加得到处理后的图片。

3 实验结果

3.1 本文成像效果

首先本文对透火焰浓烟全息图进行重建，如图 8 所示。接着本文对透火焰和浓烟成像的重建图像进行了拉普拉斯金字塔处理，如图 9(b)所示，与图 8 进行比较，可以发现经过拉普拉斯金字塔处理后的结果与原始图像的处理结果相比，改善不大，这也说明在透火焰和浓烟下，原始拉普拉斯分层算法的处理效果不太

理想。最后，用本文设计的新算法对透火焰和浓烟成像的重建图像进行处理，处理结果如图 9(c)所示，与图 9(b)进行比较，发现经本文算法处理后的全息图清晰度要比原始拉普拉斯分层算法处理后的高；与图 4(a)进行比较，本文提出的算法的处理结果接近于无火焰浓烟下的全息图处理结果，这也说明了本文的算法能尽可能的提取原始图片细节，从而达到图像增强的效果。

3.2 其他算法效果对比

图 10 为透火焰成像原始图片。本文选取了其它几种算法与之做对比。图 11(a)是本文参考文献[4]中的算法，在同时采集了多张重建图像还原后做了一个累加取均值^[4]。图 11(a)相比原始图片，噪点显得更加平滑，但是雕像的面部细节也被淹没。图 11(b)是参考文献[18]中的算法，利用自适应直方图分割的思想，增加图片的对比度，但是雕像的面部亮度过于饱和，影响到面部细节^[18]。图 11(c)是参考文献[19]中的算法，利用特征分析技术，提取原始图片细节，从而达到图像增强的效果^[19]。该算法起到了一定的作用。但是显然本文的新算法对雕像面部细节的增强做的更好。

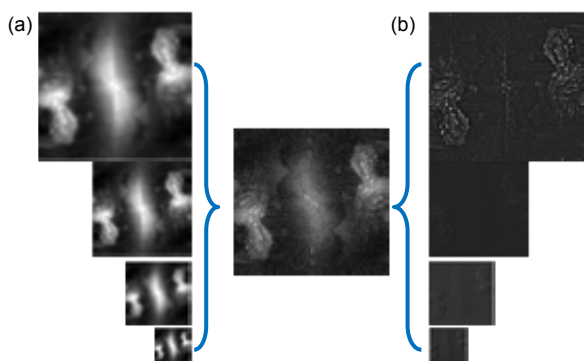


图 7 新金字塔分层结果。(a) 高斯金字塔；(b) 双边滤波金字塔

Fig. 7 New pyramid layered results. (a) Gaussian pyramid; (b) Bilateral filtering pyramid

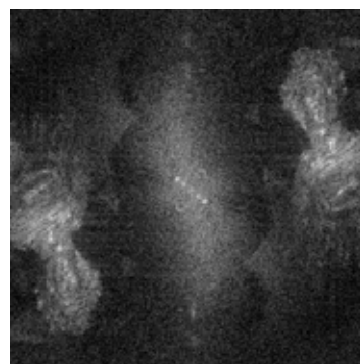


图 8 透火焰浓烟重建像

Fig. 8 Reconstruction of the smoke through the flame

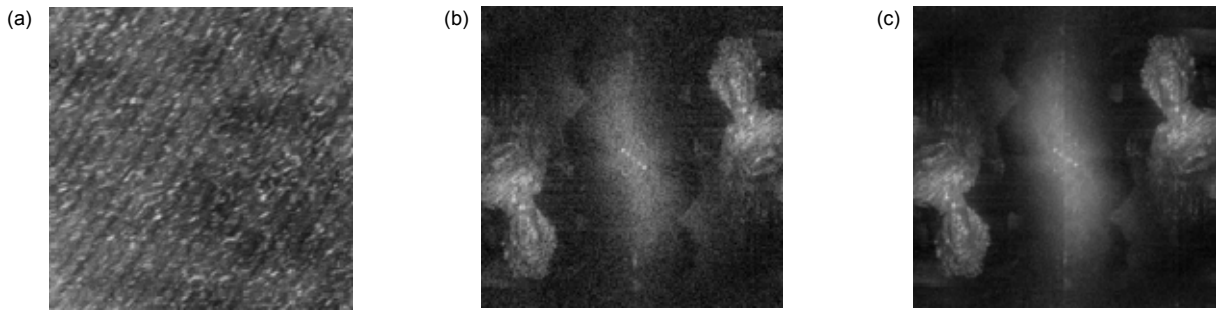


图 9 对原始重建图像的处理结果。(a) 透火焰和浓烟成像的原始全息图；(b) 拉普拉斯金字塔算法；(c) 本文提出的算法

Fig. 9 Processing results of the original reconstructed image. (a) Hologram obtained by flame and smoke; (b) Laplace Pyramid algorithm; (c) Algorithm proposed in this paper



图 10 透火焰成像原始图片

Fig. 10 Through flame imaging original picture

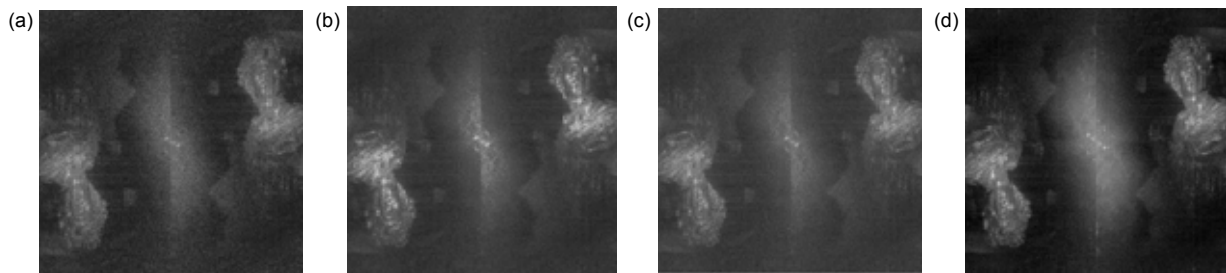


图 11 多种算法处理下的透火焰成像图。(a) 多图片取均值算法^[4]；(b) 自适应直方图算法^[18]；(c) 基于特征分析的红外图像边缘增强算法^[19]；(d) 本文提出的算法

Fig. 11 Through flame imaging image processed by various algorithms. (a) Multiple images are cumulatively averaged^[4]; (b) Adaptive histogram equalization algorithm^[18]; (c) Edge enhancement and noise suppression for infrared image based on feature analysis^[19]; (d) Algorithm proposed in this paper

4 数据分析

最后通过计算图片的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)来进一步说明本文算法的有效性。PSNR 的定义如下式：

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{255^2}{MSE} \right),$$

其中： MSE 是处理后图像与原图像的均方误差。本文中的原图像为无遮挡的重建像。

从表 1 中可以看出，多图片取均值的方法虽然计

算简单,但是与原图片相比并未有太大的改变。自适应直方图分割很好地抑制了图片的噪声,但是并没有将图片的细节很好地体现出来。基于特征分析的红外图像边缘增强恰好相反,它增强了图片细节,但同时也增加了图片的噪声。而本文的算法做到了增强图片细节的同时,又很好地抑制了图像噪声,从而使峰值信噪比有明显提高。

表 1 不同算法的 PSNR 对比

Table 1 PSNR contrast of different algorithms

名称	PSNR
透火焰成像原始图片	7.8265
多图片取均值 ^[4]	8.6489
IGM 配合 PCNN ^[18]	20.4698
基于特征分析的红外图像边缘增强 ^[19]	16.5462
本文算法	27.6489

5 结 论

综上所述,直接对透火焰浓烟全息图做快速傅里叶变换还原,所得的图像模糊,散斑噪声高,分辨率差。本文提出了一种新的图像分辨率增强算法,可以有效地增强透火焰浓烟红外数字全息成像的图像分辨率。该算法具有计算简单和易于实现的优点,在光学装置中不需要特殊的仪器设备,可以大大降低散斑噪声,提高重建图像的细节。实验结果表明,这种新算法具有很好的性能。

参考文献

- [1] Li W L. Research on digital holographic autofocus and image quality enhancement technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunication, 2016.
李维亮. 数字全息自动聚焦及像质增强技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [2] Paturzo M, Memmolo P, Finizio A, et al. Synthesis and display of dynamic holographic 3D scenes with real-world objects[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 8806–8815.
- [3] Paturzo M, Merola F, Grilli S, et al. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(21): 17107–17118.
- [4] Locatelli M, Pugliese E, Paturzo M, et al. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 5379–5390.
- [5] Amako J, Miura H, Sonehara T. Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(17): 3165–3171.
- [6] Pan F, Yang L, Xiao W. Coherent noise reduction in digital holographic microscopy by averaging multiple holograms recorded with a multimode laser[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(18): 21815–21825.
- [7] Rong L, Xiao W, Pan F, et al. Speckle noise reduction in digital holography by use of multiple polarization holograms[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(7): 653–655.
- [8] Wang L L, Tschudi T, Halldorsson T, et al. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(10): 1770–1775.
- [9] Lai X J, Tu H Y, Wu C H, et al. Resolution enhancement of spectrum normalization in synthetic aperture digital holographic microscopy[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(1): A51–A58.
- [10] Kujawinska M, Makowski P, Finke G, et al. Synthetic aperture double exposure digital holographic interferometry for wide angle measurement and monitoring of mechanical displacements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9660**: 966019.
- [11] Huang H C, Rong L, Wang D Y, et al. Synthetic aperture in terahertz in-line digital holography for resolution enhancement[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(3): A43–A48.
- [12] Mori Y, Nomura T. Synthesis method from low-coherence digital holograms for improvement of image quality in holographic display[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(16): 3838–3844.
- [13] Zhang W L, Tian F C, Zhao Z Z, et al. Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(5): 488–497.
张文理, 田逢春, 赵贞贞, 等. 空间外差光谱仪的干涉图校正[J]. *光电工程*, 2017, **44**(5): 488–497.
- [14] Chen H, Wang Y J. Research on image fusion algorithm based on Laplacian pyramid transform[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(4): 439–442.
陈浩, 王延杰. 基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(4): 439–442.
- [15] Huang Y Q, Zhao K, Pei C, et al. Computational holographic reference light angle selection method based on spatial spectrum analysis of primitive hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(02): 23–27.
黄应清, 赵锴, 裴闯, 等. 基于基元全息图空间频谱分析的计算全息参考光角度选择方法[J]. *光子学报*, 2015, **44**(02): 23–27.
- [16] Wang S P, Gao T. Destriping method for infrared image based on Bilateral filter[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(9): 728–731.
王书朋, 高腾. 基于双边滤波器的红外图像条纹噪声消除算法[J]. *红外技术*, 2014, **36**(9): 728–731.
- [17] Xiao L, He K, Zhou J L, et al. Image noise removal on improvement adaptive medium filter[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(2): 44–46.
肖蕾, 何坤, 周激流, 等. 改进自适应中值滤波的图像去噪[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(2): 44–46.
- [18] Zhang Q, Zhou P C, Xue M G, et al. Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(9): 888–894.
张谦, 周浦城, 薛模根, 等. 一种结合 IGM 和改进 PCNN 的图像增强方法[J]. *光电工程*, 2017, **44**(9): 888–894.
- [19] Jiang M. Edge enhancement and noise suppression for infrared image based on feature analysis[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **91**: 142–152.

Resolution enhancement algorithm based on infrared digital holography imaging through flame

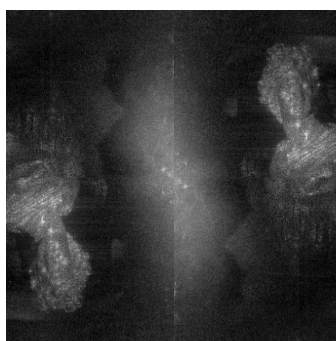
Chai Jinyan¹, Huang Chao^{2,3*}, Cheng Chunyan¹, Yang Chao⁴

¹Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²Ningbo China Academy of Information Technology Application Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315100, China;

³Ningbo Zhongke Integrated Circuit Design Center, Ningbo, Zhejiang 315100, China;

⁴College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China



The resolution enhancement algorithm in this paper

Overview: In general, the target observation methods are mostly concentrated in the visible and infrared light bands, and the target and scene are observed by the imaging devices of the corresponding bands respectively. However, in areas where fires occur, the mere use of traditional imaging observations does not meet the requirements. On the one hand, due to the shielding effect of fire and smoke, the short-wavelength scattering effect in the visible light band is obvious, and it is not suitable for such turbid medium. Therefore, it is almost impossible to see the target situation in the fire field by means of visible light observation, which brings extremes to search and rescue. On the other hand, the use of infrared thermal imaging alone has certain disadvantages. Although long-wave infrared light can transmit dust and haze to a certain extent, its fundamental infrared thermal imaging is a kind of temperature difference imaging. If the target temperature is too high in the observed scene, it will cause the pixel response on the focal plane. The saturation makes it impossible to observe the target normally. In recent years, the use of new technologies combining infrared thermal imaging and digital holographic imaging to observe the target in the fire field has become the focus of research. In theory, flame and smoke have no effect on long-wavelength infrared digital holography, but in the real fire environment, large particles of dust from the combustion will interfere with the light path, which seriously increases the noise of the hologram reconstructed image. Our optical device is based on simple Mach-Zender interference. No special equipment is needed in the optical device. After collecting the interference fringe image of the imaging target and reconstructing the image, a new image processing algorithm is proposed to suppress the noise of infrared digital holographic reconstruction. The algorithm uses a bilateral filter combined with the Laplacian pyramid algorithm to separate the details and energy layers of the holographic reconstructed image, filters the detail layer, and then superimposes the separated layers back into the reconstructed image by the inverse Laplacian pyramid algorithm. In order to improve the resolution of the reconstructed image, and by simulating the fire field environment, the algorithm can effectively enhance the image resolution of the transparent digital smoke holographic image. The algorithm has the advantages of simple calculation and easy implementation, which can greatly reduce speckle noise and improve the details of reconstructed images. Experimental results show that this new algorithm has good performance.

Citation: Chai J Y, Huang C, Cheng C Y, *et al.* Resolution enhancement algorithm based on infrared digital holography imaging through flame[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(4): 180418

Supported by National Key Research and Development Plan (2016YFB0700501), Major National Science and Technology Project (Major Technology Innovation Project) of Ningbo National High-tech Zone (New Materials Science and Technology City), and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX17_0233)

* E-mail: chuang@ict.ac.cn