

文章编号 1004-924X(2014)11-3091-09

光学合成孔径复原图像的振铃探测与消除

魏小峰^{1*}, 耿则勋¹, 宋 向²

- (1. 解放军信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450002;
2. 61175 部队, 江苏 南京 210049)

摘要:针对相位平移误差使光学合成孔径图像的复原出现的振铃效应,提出了一种结合视觉感知的振铃探测与消除方法。首先,提出并利用梯度方向随机度和局部方差值两项指标计算得到图像纹理区;然后,根据不同阈值的 Canny 算子检测出全边缘与主边缘,并将主边缘邻域内的全边缘作为待筛选的边缘振铃;最后,结合人类视觉系统的纹理掩盖效应分别得到振铃区与平坦区。此外,在图像分区基础上,选择亮度相似度因子作为自适应参数,利用双边滤波进行图像处理。实验显示:处理后 Lena 图像的峰值信噪比提高了 10.8%,分辨率板的结构相似度提高了 0.057。结果表明:该方法能够对图像以像素精度分区,可以在保持边缘与纹理的同时,有效消除振铃效应,提高图像复原质量。

关键词:图像复原;振铃效应;光学合成孔径;视觉感知;图像分区;双边滤波

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.3091

Detection and removal of ringing artifact for optical synthetic aperture restoration image

WEI Xiao-feng^{1*}, GENG Ze-xun¹, SONG Xiang²

- (1. *Institute of Geography and Space Information, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China;*
2. *Troop 61175, Nanjing 210049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wxf198861@163.com*

Abstract: As phase shift errors will lead to severe ringing artifacts in the restoration results of optical synthetic aperture images, a method to detect and remove the ringing artifacts was proposed based on visual perception. Firstly, the texture region was obtained by calculating the scales of gradient direction randomness and local variance distribution. Then, the whole edges and main edges were separately detected by the Canny operator with different thresholds and whole edges belong to the neighborhood of all edges were considered as the edge ringing candidate. Finally, the ringing region and flat region were respectively derived by combining the texture masking of human visual system. Based on the image classification, the adaptive bilateral filter was applied to removal of the ringing artifacts. Experimental results show that the Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) of a Lena image after processing is improved by 10.8% while the Structural Similarity (SSIM) of resolution board image is improved by 0.057 as well. It concludes that the proposed method classifies the image on pixel

收稿日期:2014-04-17;修订日期:2014-05-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目

scale, so it eliminates the ringing artifacts dramatically while preserving the edges and textures effectively. It is capable of improving the image restoration quality.

Key words: image restoration; ringing artifact; optical synthetic aperture; visual perception; image classification; bilateral filter

1 引言

光学合成孔径技术是将若干子孔径按一定方式排列,并且满足相位同步条件,在焦平面上实现干涉成像,从而达到等效大口径望远镜分辨率的成像技术。它的设计和应用主要面临两个方面的问题:一是由集光面积减小引起的中低频信息衰减,这使得直接获取的图像不可避免地出现模糊降质;二是相位误差会造成系统点扩散函数(Point Spread Function, PSF)主峰偏移,频谱混叠,进而影响成像质量^[1]。受这两个因素影响,光学合成孔径系统必须将成像时的相位误差控制在 0.1 倍波长以下,并采用图像复原等手段进行后处理,才能真正满足高分辨率的应用需求^[2],而目前的光学制造和调校水平无法达到纳米级精度,因此,开展含相位误差的光学合成孔径图像后处理方法的研究具有重要的现实意义。

相位误差的存在对合成孔径图像复原的主要影响表现在复原结果会出现较严重的振铃效应(Ringing Artifact)。现在发展较成熟的振铃效应的探测和消除方法主要是针对图像压缩产生的振铃^[3-4],并且通常与分块效应(Blocking Artifact)一起进行处理^[5]。常见方法包括在图像分区基础上进行滤波^[6-7],在变换域检测振铃^[8]以

$$\text{PSF}_{\text{syn}}(x, y) = \text{PSF}_{\text{sub}}(x, y) \cdot \left\{ N + 2 \sum_{n=1}^{N(N-1)/2} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\Delta\varphi_n - \frac{\Delta\epsilon_n x}{f} - \frac{\Delta\eta_n y}{f} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像平面坐标; N 为子孔径数; f 为焦距; λ 为波长; $(\Delta\epsilon_n, \Delta\eta_n)$ 是任意 2 个子孔径中心的距离; $\Delta\varphi_n$ 表示第 n 对子孔径间的 OPD(即活塞误差),通常以波长的倍数表示。理想无相位误差条件下, $\Delta\varphi_n = 0$ 。 PSF_{sub} 为单孔径衍射受限非相干成像系统的 PSF,可表示为:

$$\text{PSF}_{\text{sub}} = \left| \left[\frac{\pi D^2}{4\lambda f} \right] \frac{J_1(\pi Dr/\lambda f)}{\pi Dr/\lambda f} \right|^2, \quad (2)$$

其中: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; J_1 为一阶 Bessel 函数。

由于合成孔径阵列的稀疏性和中低频衰减等

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{|H(u, v)|} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + S_\eta(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v), \quad (3)$$

及在盲解卷积过程中添加抑制振铃的约束项^[9-10]等。

本文在对复原振铃与相位平移误差进行深入分析的基础上,提出了一种基于视觉感知的振铃检测方法。该方法在图像分区的基础上,利用自适应双边滤波方法进行图像处理,从而可在保持边缘纹理的同时消除振铃。

2 相位平移误差与振铃效应

光学合成孔径系统最主要的两种相位误差分别为活塞误差和倾斜误差^[11],实际观测过程中,这两种误差均需在系统容许值内,这样合成干涉阵列才能近似实现共相位光束合成。实验证明,活塞误差与倾斜误差对合成孔径图像复原质量的影响类似,均表现为一定程度的振铃效应。而且相同条件下,活塞误差比倾斜误差的影响更大,因此本文针对活塞误差产生的复原振铃进行分析处理。

活塞误差又称为相位平移误差,它是由通过各子孔径的光束到达出瞳面的光程差(Optical Path Difference, OPD)引起的,只与复合光束有关。有活塞误差条件下,合成孔径系统的 PSF 可以表示为^[12]:

特性,直接经合成孔径系统成像的模糊退化现象严重,因此,图像复原等后处理技术必不可少。为考察相位平移误差对图像复原质量的影响,利用经典的维纳滤波方法对合成孔径仿真图像进行复原。维纳滤波是一种经典的线性图像复原方法,也是目前国内外进行合成孔径图像复原的主流算法,其将图像看作二维平稳连续信号,噪声独立且有零均值,则复原图像的频谱值在频域中可用下式计算:

其中: $S_{\eta}(u, v) / S_f(u, v)$ 为噪声功率谱与理想图像功率谱之比。

在此基础上,通过实验分析了复原振铃与压缩振铃对图像的不同影响,结果如图 1 所示。其中, L_1 为原二值图像某一行的灰度值,其值只有 0 和 255 两种; L_2 是对图像进行压缩编码后的灰度值,由图可见, L_2 在中间屋顶状边缘和右边阶梯状边缘处均有一定程度的振铃出现,但大小与原灰度值相差不大; L_3 是利用含相位平移误差的光学合成孔径系统进行仿真成像后,再复原得到的图像。由图可知,含相差的合成孔径系统复原图像中振铃的形状分布和压缩振铃有较大差异,主要表现在:(1)整体灰度动态范围较原始图像有较大压缩;(2)边缘附近灰度值变化剧烈,振铃效应更为突出;(3)除边缘之外的其它区域同样存在灰度值的振荡,即振铃分布具有全局性。

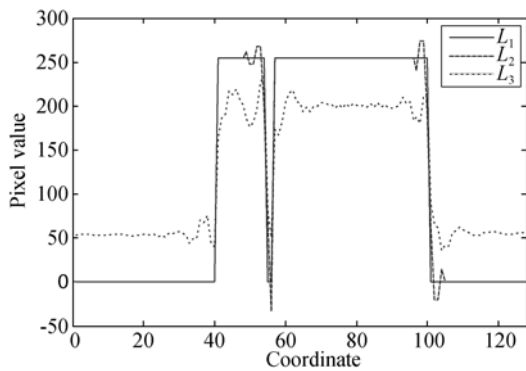


图 1 压缩振铃与复原振铃对比

Fig. 1 Comparison of compression and restoration ringings

由此可见,压缩或复原产生的振铃在形状、分布及强度方面均有明显不同,目前针对压缩振铃的探测和消除方法不能较好地消除复原振铃^[13]。故本文采用填充因子为 0.3 的 Golay-6 合成孔径阵列进行仿真实验。向其中某一子孔径添加大小为 0.15λ 的活塞误差,对图 2(a)的原始图像进行光学合成孔径仿真成像,得到含相差的退化图像如图 2(b)。再利用维纳滤波方法进行复原,最终结果如图 2(c)所示。实验使用的 PSF 由理想无相差的光瞳函数经傅里叶变换得到,且暂不考虑噪声影响,以保证复原质量只受相位平移误差影响。

可以发现,由于相位平移误差的存在,利用理想的 PSF 不能进行精确复原,恢复结果出现了明显的振铃效应。这种以边缘振铃为主的振铃效应是由于退化模型与实际成像过程之间的偏差导致的^[14]。

对复原产生的边缘振铃进行检测与消除是获取高清晰光学合成孔径图像的必要前提,也是本文研究的重点问题。

3 结合视觉感知的振铃检测方法

含相位平移误差的合成孔径复原图像中,除了图像的真实边缘外,还有由于振铃效应产生的虚假边缘。此振铃效应有其独特的分布特点:



(a) 理想图像
(a) Ideal image

(b) 退化图像
(b) Degraded image

(c) 复原图像
(c) Restored image

图 2 光学合成孔径成像仿真与复原结果

Fig. 2 Simulation and restoration results of optical synthetic aperture imaging

(1) 振铃通常出现在图像边缘,特别是梯度值较大的边缘附近;

(2) 在原边缘附近会出现与之方向平行的重复振荡波纹,且振铃梯度值往往小于原边缘;

(3) 振铃的可见性受局部背景的空间分布影响很大。在纹理区振铃有纹理掩盖效应,而在平坦区则显得很突出。

根据这些特点,采用合适的方法将整幅图像分为边缘区、纹理区、平坦区和振铃区。在此基础上利用不同强度的滤波器进行分区平滑,以去除振铃。

3.1 纹理区

人类视觉系统(Human Visual System, HVS)对粗糙纹理区域内图像失真的敏感度较低,而对包含诸如长边缘等结构的纹理区域内的图像失真敏感度较高。这是由视觉感知特性中的纹理掩盖效应决定的,纹理丰富区域内灰度变化剧烈,各像素梯度方向随机,而结构纹理与边缘等区域灰度变化更为规则,局部方差也较小。本文根据视觉感知这一特性,结合纹理区域特点,利用梯度方向随机性和局部方差两项指标,提取图像的纹理信息。

首先,在 3×3 窗口内计算原始图像各个像素的局部方差 $\text{Var}(x, y)$:

$$\text{Var}(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 [f(x+i, y+j) - \bar{f}(x, y)], \quad (4)$$

$$\text{其中: } \bar{f}(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 f(x+i, y+j). \quad (5)$$

生成的局部方差图反映了各像素与邻域像素间的强度差异,概括了图像的梯度大小分布情况。利用迭代阈值法将方差图二值化,即可得到图像的全部细节和纹理信息。图 3(a)为二值化后的方差图 V_{BW} ,其中 $V_{\text{BW}}=1$ 的白色区域可认为是图像的非平坦区。可以看出,非平坦区内不仅包括纹理,还有边缘和振铃。区分纹理与边缘的关键在于其梯度方向的随机性,因此可以在此基础上结合梯度方向来提取纹理区。

为表达梯度方向的随机性,计算每个像素在其 3×3 邻域内 8 个方向的梯度值,并将梯度最大的方向标记为垂直、水平、主对角线及副对角线 4 个类别之一。统计各单元 $N \times N$ 邻域内梯度最大方向种类数 $G_N(i, j) \in [1, 4]$,生成梯度方向图,并以此表达梯度方向的随机性,如图 3(b)所示。图中的 4 个灰度级由低至高分别表示该像素 $N \times N$ 邻域内有 1~4 种最大梯度方向,其种类越多,说明该位置图像的纹理越复杂。

设置方向复杂度阈值 $K \in [1, 4]$,同时满足 $V_{\text{BW}}=1$ 且 $G_N(i, j) \geq K$ 的区域即认为是纹理区。令 $K=3$,则最终得到的纹理区为图 3(c)白色区域。与二值化方差图相比,结合梯度方向随机度提取的纹理区基本上去除了长边缘及其附近的振铃等规则纹理,可以认为该区域内对图像失真最不敏感。

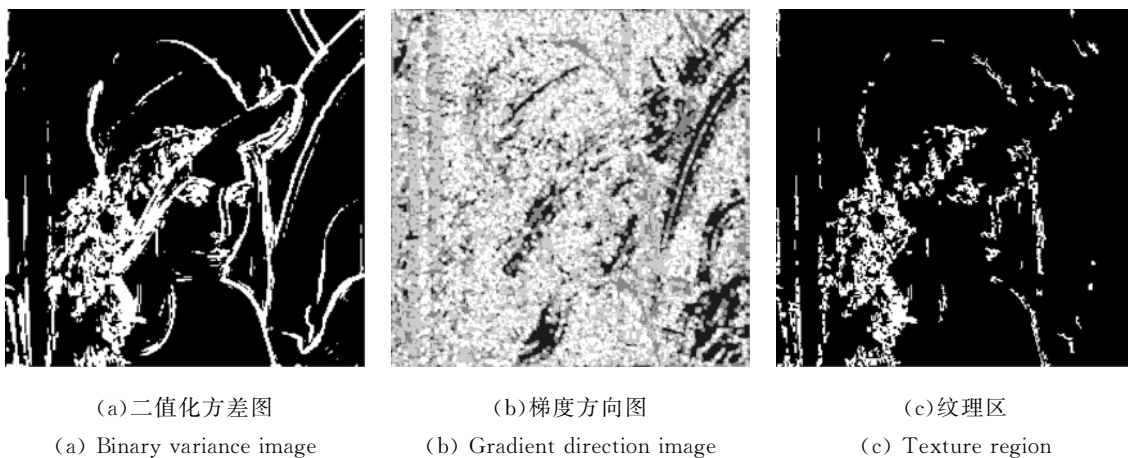


图 3 纹理区确定

Fig. 3 Determination of texture region

3.2 振铃区

根据以上分析可知,振铃一般出现在强边缘周围,但本身强度较弱。另外,纹理区附近的边缘振铃受掩盖效应影响,不易被 HVS 感知,对其进行平滑滤波反而会引入高频信息损失,因而应当予以剔除。

首先利用 Canny 算子对振铃图像进行边缘特征提取,通过选取不同的阈值 T ,分别得到梯度

值较大,视觉特征也最为明显的主边缘以及包含真实边缘、振铃以及部分纹理等的全边缘,分别如图 4(a)(b)所示。对照图 2(c)可以发现,全边缘包含了可以感知到的大部分振铃,而且绝大多数分布在主边缘附近。将主边缘的邻域视为振铃探测区,探测区内除主边缘外的全边缘即可初步认为是振铃。对主边缘进行膨胀操作可以得到振铃探测区,图 4(c)显示了振铃探测区及其内的全边缘。



图 4 边缘提取与振铃探测区确定

Fig. 4 Edge extraction and determination of ringing detection region

探测区内的全边缘除了平行于主边缘的振铃边缘外,还有很大一部分属于纹理区的离散点线,需要对其进一步处理。首先检测区域内所有的 8 连接分量,消除长度小于给定阈值的点线,然后将其余的边缘膨胀,从而得到平行于主边缘的边缘振铃区。对边缘振铃进行膨胀的主要原因在于实际振铃并非单像素宽度的线状结构,所探测到的 8 连接分量仅指示了振铃的中心位置,适当膨胀之后得到的区域才是完整的振铃区。对于振铃区与纹理区的重叠部分,根据纹理掩盖效应,将其视为纹理区。处理后的振铃区仅包含主边缘在平坦区的振荡纹理,从而避免消除振铃时平滑纹理。

将主边缘与纹理区合并为边缘纹理区,它与振铃区之外的区域即为平坦区,分别将这 3 个区域用黑、白、灰三色表示,如图 5 所示。对照图 2(c)可以发现,白色区域外的图像基本不存在振铃,证明了本文振铃探测方法的有效性和准确性。



图 5 图像分区结果

Fig. 5 Results of image classification

本文的纹理区与振铃区检测方法流程图如图 6 所示。该方法不同于以往基于图像块的分区方法^[6-7],而是以像素为基本分割单元,结合人类视觉感知特性,通过几何特征(边缘)和灰度特征(梯度)共同确定分区准则,取得了较好的效果。

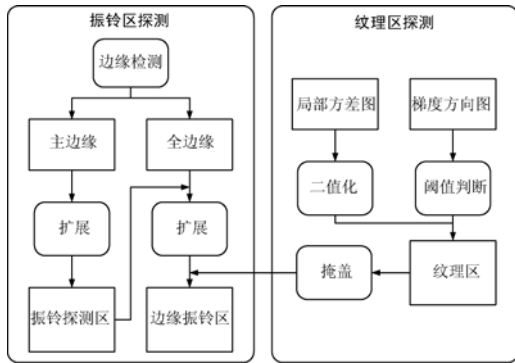


图 6 振铃区与纹理区检测流程图

Fig. 6 Flowchart of detection for ringing and texture regions

4 自适应双边滤波

在确定出振铃区、边缘纹理区与平坦区的基础上,利用双边滤波方法对图像进行处理。其关键在于不同分区的滤波器参数不同,从而达到去除振铃并保持图像细节的目的。

双边滤波器是一种可以在滤除噪声的同时保持图像边缘的非线性滤波器,具有非迭代、局部和便于实现等特性^[15-16]。同经典高斯滤波器一样,双边滤波器也仅仅利用了局部加权平均;不同的是双边滤波器在二维邻域内的加权系数由两部分因子乘积组合而成,一部分由像素间的空间距离决定,可称之为空间邻近度因子;另一部分由像素间的亮度值之差决定,称之为亮度相似度因子。

空间邻近度因子 w_s 考虑的是空间相关性,其随着像素点与中心点之间欧几里德距离的增加而减小:

$$w_s(i, j) = \exp\left[-\frac{|i-x|^2 + |j-y|^2}{2\sigma_s^2}\right]. \quad (6)$$

亮度相似度因子 w_r 则反映了邻近像素的灰度连续性,其随着像素亮度差的增大而减小:

$$w_r(i, j) = \exp\left[-\frac{|g(i, j) - g(x, y)|^2}{2\sigma_r^2}\right]. \quad (7)$$

对一定邻域内的每一个像素点 $g(i, j)$, 其加权系数 $w(i, j)$ 由两部分因子的乘积组成:

$$w(i, j) = w_s(i, j)w_r(i, j). \quad (8)$$

双边滤波器采用局部加权平均的方法获取复原图像 $g(x, y)$ 的像素值:

$$f(x, y) = \frac{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j)g(i, j)}{\sum_{(i, j) \in S_{x, y}} w(i, j)}, \quad (9)$$

式中: $S_{x, y}$ 表示像素 (x, y) 处 $(2N+1) \times (2N+1)$ 大小的邻域。实际上,式(9)右边就是

中心像素点邻域内像素亮度值的加权平均。

将双边滤波应用于含振铃图像,其问题在于振铃的形状和分布与真实边缘类似,若直接滤波,则会将其视作边缘信息而予以保留,而选择较大的平滑参数又会将纹理过度平滑,导致更严重的失真。在图像分块——特别是边缘纹理区与振铃区分——的基础上,可以灵活地选择滤波器参数,实现保持纹理的同时平滑振铃。

双边滤波器受 3 个参数的控制:滤波器半宽 N 、参数 σ_s 和 σ_r 。其中 σ_s 和 σ_r 分别控制着空间邻近度因子 w_s 和亮度相似度因子 w_r 的衰减程度,且参数值越大,平滑作用越强。通过实验发现,滤波结果对亮度相似度因子 w_r 最为敏感,因此本文选择 σ_r 作为自适应参数对振铃图像进行分区滤波。

5 实验结果与分析

根据以上分析,图像的边缘纹理区包含丰富的纹理和边缘信息,应当予以最大程度保留;振铃区主要包括探测到的边缘振铃,是平滑的主要目标;而平坦区细节信息较少,可视为弱振铃区,采用强度适中的滤波处理。本文实验中,设置滤波器半宽 $N=3$, $\sigma_s=5$, σ_r 分别选取 5, 20 和 60 作为边缘纹理区、平坦区和振铃区的亮度相似度因子参数。对照实验 σ_r 值分别取为 10 和 30, 其余参数不变,滤波后的实验结果如图 7 所示。

通过对比不难发现,使用全局统一参数的情况下,较小的 σ_r 未能消除帽沿、脸部和肩部的边缘振铃(图 7(a));而较大的 σ_r 会对帽穗等细节丰富区域过度平滑,但帽沿处的振铃仍有残留(图 7(b))。图像分区后采用不同参数进行滤波,可以在保持边缘和纹理的同时,最大程度地平滑振铃,因而取得更好的视觉效果(图 7(c))。

利用分辨率板测试图像进行实验,含相差的合成孔径复原图像如图 8(a)所示,其中的数字及规则条纹附近均存在较多的虚假边缘。图 8(b)为利用本文方法对该图像进行分区的结果,可以看到探测得到的振铃区覆盖了大部分的边缘振铃,而中心位置及右侧小数字等梯度较小的部分被识别为纹理区。分别选取 σ_r 为 5, 20 和 40 作为边缘纹理区、平坦区和振铃区的滤波参数,利用双边滤波器处理的最终结果如图 8(c)所示。通过比较可以发现,大号数字及条纹附近的振铃基本消除,小数字及中心位置纹理仍保持清晰。



图 7 振铃消除效果对比

Fig. 7 Comparison of ringing reduction results

第三组实验中的复原图像振铃效应更为明显,帽子本身的纹理与振铃难以区分(图 9(a)),而图 9(b)的图像分区结果表明该方法可以正确识别纹理附近的边缘振铃。选择与上次实验相同

的参数进行处理,结果如图 9(c)所示。由图可知,无论是帽子上的字母、阴影边缘或木板上的纹理均得到保持,而主要的振铃均通过滤波消除。

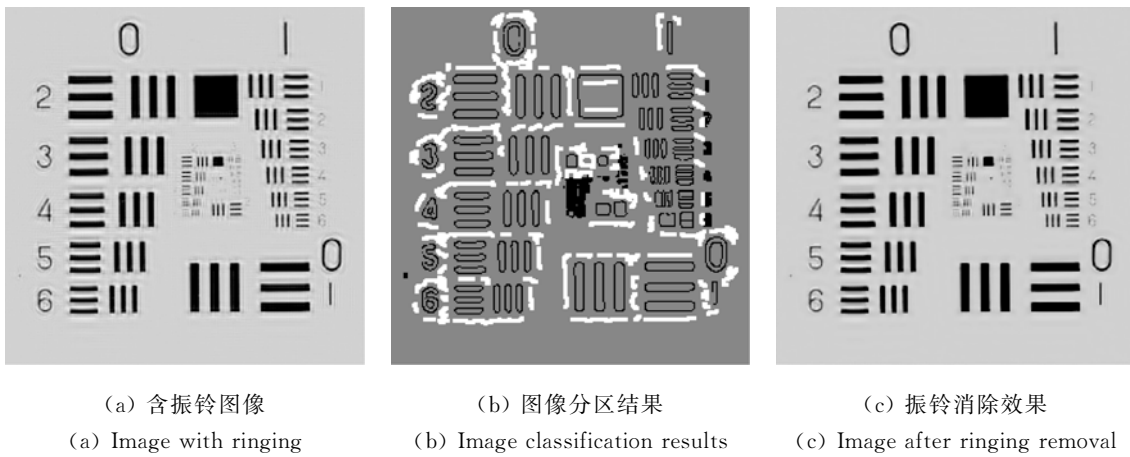


图 8 分辨率板图像振铃探测与消除实验

Fig. 8 Experiments of ringing detection and reduction for resolution board image

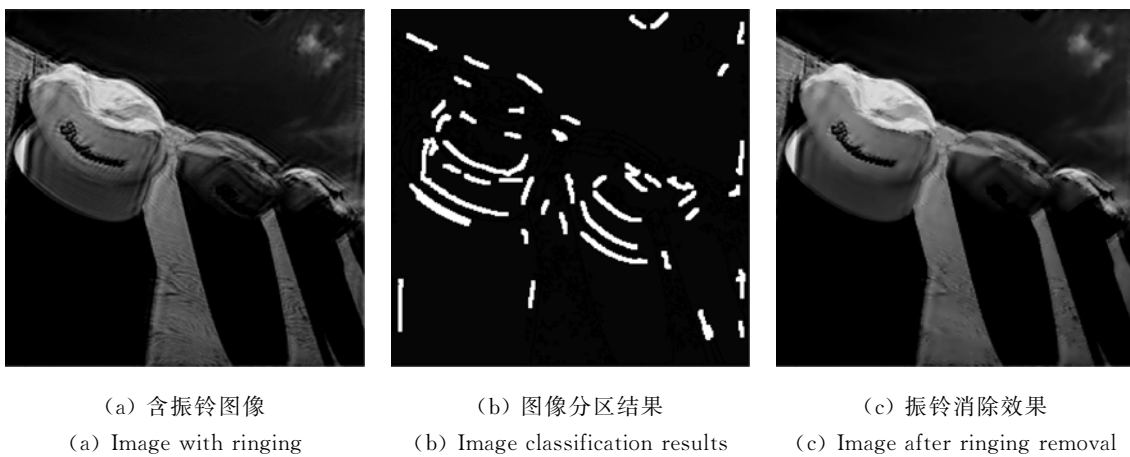


图 9 帽子图像振铃探测与消除实验

Fig. 9 Experiment of ringing detection and reduction for cap images

利用峰值信噪比(PSNR)、相关系数和结构相似度(SSIM)3个指标分别对3次实验结果进行评价,结果如表1所示。其中,PSNR比较了两幅图像信噪比之间的差异;相关系数是从全局反映图像相似程度的客观评价指标;而SSIM主要比较了原图像与失真图像在亮度、对比度及结构信息方面的情况,与基于HVS的主观评价最为符合^[17]。

表1 客观评价指标
Tab.1 Objective assessment scales

Images		PSNR	Correlation coefficient	SSIM
Lena	Before	24.55	0.972 8	0.842 0
	After	27.19	0.976 0	0.853 7
Resolution board	Before	13.11	0.970 5	0.821 1
	After	13.18	0.979 2	0.878 2
Caps	Before	27.33	0.967 3	0.842 4
	After	28.12	0.972 5	0.862 1

由表1可知,处理后的图像的各项评价指标

参考文献:

- [1] WEI X F, GENG Z X, JIANG CH. Multi-frame sparse aperture image restoration based on movable array [C]. 2012 *International Conference on Computer Vision in Remote Sensing (CVRS)*, 2012, 100-104.
- [2] CHUNG S J, DAVID W M, OLIVIER L. Design and implementation of sparse aperture imaging systems [C]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4849: 181-192.
- [3] MARZILIANO P, DUFAUX F. Perceptual blur and ringing metrics: application to JPEG2000 signal processing [J]. *Image Communication*, 2004, 19(2): 163-172.
- [4] LIU H T, NICK K, INGRID H. A perceptually relevant approach to ringing region detection [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(6): 1414-1426.
- [5] LEE Y L, KIM H C, PARK H W. Blocking effect reduction of JPEG images by signal adaptive filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(2): 229-234.

均均有一定提高,其中Lena图像的PSNR提高了10.8%,分辨率板的SSIM提高了0.057。总体而言,客观评价指标结果与主观视觉感受相符。

5 结 论

本文以含相差的光学合成孔径复原图像为研究对象,提出一种基于视觉感知特性的图像分区与振铃消除方法:利用梯度方向随机性和局部方差值两项指标综合衡量像素邻域内的纹理复杂度,提取纹理区;根据边缘振铃分布特点,通过不同阈值的Canny算子检测出全边缘与主边缘,结合掩盖效应得到振铃区及平坦区。在此基础上,对各个区域采用具有不同参数的自适应双边滤波进行处理。对合成孔径复原图像及后处理结果的评价和比较表明,本文方法可以有效地探测并消除图像中的边缘振铃,处理后的Lena图像的PSNR提高了10.8%,分辨率板的SSIM提高了0.057,视觉效果改善明显。因此,本文方法可在一定程度上克服相位平移误差对光学合成孔径系统图像复原质量的影响,有利于发挥其高分辨率成像的优势。

- [6] KONG, H, VETRO A, SUN H. Edge map guided adaptive post-filter for blocking and ringing artifacts removal [C]. *IEEE Int. Symp Circuits and Systems (ISCAS)*, 2004, 929-932.
- [7] WU J, YE X Q, GU W K. An adaptive fuzzy filter for coding artifacts removal in video and image [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2007, 8(6): 841-848.
- [8] POPOVICI I, WITHERS W. Locating edges and removing ringing artifacts in JPEG image by frequency-domain analyses [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2007, 16: 1470-1474.
- [9] BERTERO M, BOCCACCI P. A simple method for the reduction of boundary effects in the Richardson-Lucy approach to image deconvolution [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, 437: 369-374.
- [10] YANG S, HU Y H. Maximum-likelihood parameter estimation for image ringing-artifact removal [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(8): 963-973.
- [11] BUTTS R R. Effects of piston and tilt errors on the performance of multiple mirror telescopes [J]. *Inproc. Sp.*, 1981, 293.

- [12] LIU Z, WANG S Q, RAO C H. The co-phasing detection method for sparse optical synthetic aperture systems [J]. *Chin. Phys. B*, 2012, 21(6): 069501-1-8.
- [13] 左博新,明德烈,田金文. 盲复原图像振铃效应评价[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(8): 1244-1253.
ZUO B X, MING D L, TIAN J W. No-reference restoration image ringing metrics [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(8): 1244-1253. (in Chinese)
- [14] LAM K B, YU W M, LEE S L. Ringing reduction of image restoration [C]. *ICSP*, 2002, 1757-1761.
- [15] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]. *IEEE Computer Society*, 1998: 839-846.
- [16] CUONG C P, SYNH V U, JAE W J. Adaptive guided image filtering for sharpness enhancement and noise reduction [C]. *PSIVT*, 2011, 7087, 323-334.
- [17] 袁万立,李朝锋. 结合 HVS 及 SSIM 的无参考模糊图像评价方法[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(1): 210-221.
YUAN W L, LI CH F. No-reference blur image quality metric combining HVS with SSIM [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(1): 210-221. (in Chinese)

作者简介:



魏小峰(1988—),男,河南遂平人,博士研究生,2009年、2012年于解放军信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事图像复原、光学合成孔径等方面的研究。E-mail: wxf198861@163.com

导师简介:



耿则勋(1958—),男,河南孟州人,博士,教授,博士生导师,1982年于新乡师范学院获得数学专业学士学位,1990年于西安交通大学获得概率论与数理统计专业理学硕士学位,1996年于解放军测绘学院获得摄影测量与遥感专业博士学位,主要从事遥感信息获取与处理、天文图象处理等方面的研究。E-mail: zxgeng@126.com