

文章编号: 0253-2239(2009)11-3025-06

结合基于梯度的振铃评价算法的总变分最小化 图像分块复原法

陶小平 冯华君 赵巨峰 李 奇 徐之海

(浙江大学现代光学仪器重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 为了消除退化函数随空间变化发生变化模糊图像分块复原法子块之间的不平滑拼接缝, 提出了一种结合了基于梯度的振铃评价算法梯度振铃评价(GRM)的总变分(TV)最小化分块复原法。根据图像分布及退化类型将模糊图像划分为矩形、环形或其他形状的子块, 图像子块之间要留有一定的重叠区; 然后对每一个图像子块进行复原, GRM 方法是基于图像梯度结构相似度的图像质量评价算法, 以 GRM 作为 TV 复原算法迭代过程中的收敛条件, 可以更好地控制复原图像的振铃; 最后去除复原图像子块含振铃波纹的重叠区, 拼接得到完整图像。并以矩形分块及环形分块为例, 证明该方法可以很好地抑制图像边界振铃效应, 克服分块复原法本身的缺陷, 得到拼接平滑的完整图像。

关键词 图像处理; 图像复原; 空间变化点扩展函数; 分块复原算法; 总变分最小化方法; 基于梯度的振铃评价算法

中图分类号 TN911 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092911.3025

A Total-Variation Majorization-Minimization Sectioned Restoration Algorithm with Gradient Ringing Metric Image Quality Assessment

Tao Xiaoping Feng Huajun Zhao Jufeng Li Qi Xu Zhihai

(State Key Laboratory of Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract For eliminating the ringing artifacts between the sub-frames of the sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function (SVPSF), the paper introduces a sectioned restoration algorithm, which bases on total variation (TV) majorization-minimization restoration algorithm and gradient ringing metric (GRM) image quality assessment approach. Firstly, the SVPSF-blurred image is divided into rectangular sections, circular sections or any other, which relies on the distribution of the degradation function, with some overlapped-regions. Then, each sub-section is restored by TV restoration algorithm with GRM as the convergence limit of restoration iteration. The GRM method is helpful to identify ringing of restored image, which relies on the similarity of the gradients of two images. After removing the overlapped regions, the sub-frames are spliced together to construct the composite full image. Taking the restorations of the rectangular-section and circular-section SVPSF-blurred images as examples, the paper proves that the algorithm is good at suppressing ringing artifacts. Consequently a better image with smooth splicing is obtained. The drawback of the sectioned restoration algorithm is overcome.

Key words image processing; image restoration; space-variant point spread function; sectioned restoration algorithm; total-variation majorization-minimization algorithm; gradient ringing metric image quality assessment

1 引 言

由于成像系统的缺陷和工作环境的不稳定, 人

们期待得到与原景物完全一致的图像往往不能如愿。若能将物体到图像的映射描述为一个线性退化

收稿日期: 2008-12-11; 收到修改稿日期: 2009-02-23

基金项目: 国家 937 计划(2009CB24006)和国家 863 计划(2006AA12Z107)资助课题。

作者简介: 陶小平(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事图像复原和图像评价等方面的研究。

E-mail: taoxp99@gmail.com

导师简介: 冯华君(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事成像系统和遥感等方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn

函数,则成像过程可认为是物体与退化函数的卷积,想得到原物体的信息,理论上进行反卷积运算即可^[1,2]。而在实际应用中,物体到图像的映射并非单一退化函数的线性过程,退化函数随视场发生变化是普遍存在的。比如光学系统像差,一般是以光轴为中心径向对称的;若图像中包含运动物体,则该物体的退化和静止背景的退化是不同的;若景物在垂直光轴方向有多个平面,每个物平面的离焦量也是不同的;传播介质如水流、气流的局部剧烈变化也将造成物空间各点退化的不同。

若在退化过程中考虑物空间坐标,则退化图像不再是物体和退化函数的卷积,无法应用简便的傅里叶变换与逆变换来完成运算。多个甚至海量的点扩展函数(PSF)给图像复原过程中的存储和计算带来了极大的困难。

对于此类空间变化点扩散函数(SVPSF)图像,目前复原的方法主要有:空间坐标转换法^[3~5]、分块复原法^[6~11]以及迭代滤波直接复原法^[12~16]。空间坐标转换法的思路是寻找一个坐标空间,在该空间中图像的退化不随位置发生变化,在该空间中应用空间不变点扩展函数(SIPSF)图像复原方法,完成后再转换回原坐标空间。该方法直观简单,但是要求退化函数可解析表达,这在大多数应用条件下是无法满足的。并且两次坐标变换分别对应非均匀采样和插值,引入了额外的模糊和噪声,还可能导致平稳噪声变得不平稳。分块复原法是将图像划分为PSF近似不变的图像子块,结合SIPSF图像复原算法对每一个图像子块进行处理,最后拼接成完整的图像。该方法的主要缺点在于:图像子块的复原一般伴随着振铃波纹的出现,拼接之后各相邻图像子块之间存在不平滑的拼接缝。迭代滤波的直接复原法则侧重于对大量PSF的分析、整理,尽可能降低数据存储量,减小算法运算量,提高收敛速度。

本文介绍了一种结合梯变振铃评价(GRM)图像质量评价的总变分最小化图像分块复原法。总变分最小化方法可以在提高图像清晰度的同时较好的抑制振铃,而GRM是专门针对图像振铃波纹的评价,为图像复原的迭代过程提供了一个很好的收敛条件。综合两者的优点,有效的减小了分块图像间隙的不平滑拼接缝,提高了像质。

2 SVPSF 图像的分块复原

SVPSF图像可依据实际的退化情况划分为圆形、矩形或任意其他形状。例如系统以径向对称退

化为主则可按圆形-环形进行等晕区分块;若图像PSF随径向发生变化较缓,也可用较小的矩形分块来近似圆形分块以方便矩阵运算;对于部分运动或离焦的物体,可依该物体的形状将图像分为前景和背景。每一图像块的PSF的提取对图像的复原有极为重要的作用,一般可根据实际情况选用适当的方式进行计算。如医学CT图像,可用标准点阵参考板测量各区域退化函数^[2];拥有机场、桥梁或其他较明晰的边缘线状特征物的遥感类图像,可使用刀刃法提取PSF^[17];而对于某些确知退化类型的图像,频谱、倒频谱分析、误差-参数曲线法^[12]被用于退化参数估计;使用共轭梯度法^[18],Landweber迭代法^[19]等对图像和PSF进行交替最小化迭代,同时估计退化图像和退化函数的盲迭代复原法也被广泛应用。本文实验部分采用的是利用边缘特征信息的刀刃法:选取图像中灰度对比明显的边缘区域,经平滑滤波,曲线拟合提取边缘扩散函数(ESF),对其微分即得到线扩散函数(LSF),从而获知该区域PSF。

与源图像图1相比,图2使用 3×3 的矩形分块作为示例,在实际应用中一般需要更多的分块来表达等晕区。图2的块5,块2,4,6,8和块1,3,7,9分别使用了不同的退化函数 PSF_1 , PSF_2 和 PSF_3 ,模糊程度依次递增。图3是使用单一PSF(PSF_2)复原得到的图像,可以看出图像中部由于使用不正确的退化函数而出现伪信息,而图像外层仍然较模糊,没有得到很好的复原。



图1 原图像

Fig. 1 Original image

图4(a)是将图2按等晕区分块,每个图像块使用Richard-Lucy(RL)算法进行反卷积之后拼接得到的复原图像。我们可以看到图像各部分清晰度与图3相比均有提高,然而其缺陷也是明显的,分块的边界附近伴有振铃波纹,严重影响了图像质量。

于是将图像的分块从等晕区边界往外延伸,使相邻图像块之间存在一定的重叠区,每个图像块完成复原之后,再切除重叠区进行拼接。如图4(b)所示,虽



图 2 矩形分块 SVPSF 模糊图像

Fig. 2 Rectangular-sectioned SVPSF-blurred image



图 3 单 PSF 复原图像

Fig. 3 Image restoration with single PSF

图 4 RI 算法复原图像比较 (a) 无重叠区分块复原图像；
(b) 重叠分块复原图像

Fig. 4 Restored images with RI algorithm (a) non-overlapped sectioned restored image; (b) overlapped sectioned restored image

然消除了大部分拼接缝,但图像块的拼接仍然不够平滑,比如块 3 和块 6 间隙的帽沿,块 5 和块 6 间隙的眼睛,块 6 和块 9 间隙的头发存在明显的瑕疵。

3 结合 GRM 评价的 TV 图像复原

3.1 抑制振铃的 TV 算法

Rudin 等^[20]发现,受噪声污染的图像的总变分比无噪图像的总变分明显要大。总变分定义为图像梯度幅值之和:

$$f_{TV}(x) = \sum_i |\nabla x| = \sum_i \sqrt{(\Delta_x^h)^2 + (\Delta_x^v)^2}, \quad (1)$$

式中 i 为图像的像素, $|\nabla x|$ 为图像水平方向 Δ_x^h 和垂直方向 Δ_x^v 梯度值平方和的开方,遍历整个图像各个像素即可计算总变分。限制总变分就可以限制噪声。于是图像复原问题就化为最小化 $L(x)$ 的问题:

$$x = \arg \min L(x) = \arg \min [\|y - Hx\|^2 + \lambda f_{TV}(x)], \quad (2)$$

式中 x 为原图像, H 为系统的退化函数, y 为输出图像, λ 为控制算法收敛的常量。总变分最小化方法能够限制噪声,但并不对解强加平滑作用,即可以保存图像轮廓细节并且可在保证图像清晰度提高的前提下,抑制图像复原所带来的振铃波纹^[21]。在计算过程中,使用共轭梯度法求解整理后的 $A^{(i)}x = y$ 方程,对每一个图像块自动选择合适的 λ 值,并且在迭代过程中自适应的修改该参数,以动态调整复原结果。

3.2 基于梯度的振铃评价方法 GRM

众所周知,很多迭代的图像复原算法随着迭代次数的增加,图像清晰度会提高,但同时振铃波纹会更严重。而过多的振铃波纹会影响图像本身信息的获取,因此总的来说,图像质量并不一定提高。一般的图像质量评价算法如均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)等,会把振铃波纹当作图像细节,其评价价值随迭代次数一直增加,这与人的主观评价不相符。

于是本实验小组提出了综合考虑振铃波纹的 GRM 图像评价方法,该方法的基本思路源于 Wang Zhou^[22]的结构相似度(SSIM)评价方法:将评价因子分为亮度、对比度、结构信息三个部分,考察被评价图像与原图像的结构相似度,其最大值为 1,最小值为 0。对图像的每个像素在一个加权窗口内计算这三个评价因子,形成索引图,最后将平均的结构相似度作为对整体图像质量的评价测度。GRM 方法则对比复原前后的图像梯度信息。梯度矩阵可以清晰的表达图像的平坦区域和细节轮廓区域,而振铃多出现于图像细节轮廓附近的平坦区域内,与源图像相比,很容易剔除振铃波纹。对于这类含振铃波纹图像,GRM 的评价要优于结构相似度方法。

实验验证对于大多数图像 GRM 方法具有很好的单峰性,如将其引入到迭代的图像复原算法当中,每一次迭代计算其 GRM 评价值,当评价值开始下降时停止迭代。这一迭代收敛条件考虑了振铃波纹对像质的影响,与常用的对比迭代前后两幅图像差值的收敛条件相比要准确。对于小部分 GRM 曲线后期呈非常小的斜率上升的情况,如 $10^{-4} \sim 10^{-5}$,

可将该值作为前后 GRM 差值的阈值加入到复原算法中。由于 GRM 最大值为 1, 当其变化小于 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 时, 人眼几乎不能分辨图像质量的差别, 因此将该阈值作为迭代收敛条件是合适的。

将 GRM 评价方法引入到总变分复原算法中, 无需人工干预即可得到清晰度高, 振铃波纹少的质量最好的图像块, 为随后的拼接做好了准备。

3.3 图像的分块与拼接

如前所述, 图像按等晕区进行分块, 复原后拼接会留下不平滑的拼接缝。即使是对于抑制振铃十分有效的 TV 复原算法, 虽然拼接缝明显减小了, 但依然存在, 如图 5(a) 所示。将图像分块自等晕区往外延伸, 若延伸太少达不到去除振铃的目的, 而延伸太多一方面增加了计算量。另一方面, 若算法中包含随迭代调整 PSF 的步骤, 那么过多的非等晕区像素会严重影响 PSF 的调整, 导致等晕区图像块的复原出现偏差。因此重叠区的选择很重要。一般说来重叠区的最佳宽度与 PSF 大小相仿, 但依图像细节多少和边缘像素的灰度分布的差异, 以及复原算法保存细节、抑制振铃的能力不同, 重叠区宽度并不总是

固定值。

图 1 所示的 Lena 图像为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 退化 PSF 大小为 15×15 , 于是复原分块时从等晕区边界往外延伸 15 pixel, 图像块完成复原之后切除重叠区进行拼接, 如图 5(b) 所示。块间的拼接缝消失了, 与图 4(b) 中 RL 算法复原结果相比, 块间的瑕疵也没有了, 而且块 1, 块 3, 块 8, 块 9 的清晰度均有提高, 而块 7 的振铃波纹得到了抑制。



图 5 TV 算法复原图像比较: (a) 无重叠区分块复原图像; (b) 重叠分块复原图像

Fig. 5 Restored images with TV algorithm: (a) non-overlapped sectioned restored image; (b) overlapped sectioned restored image

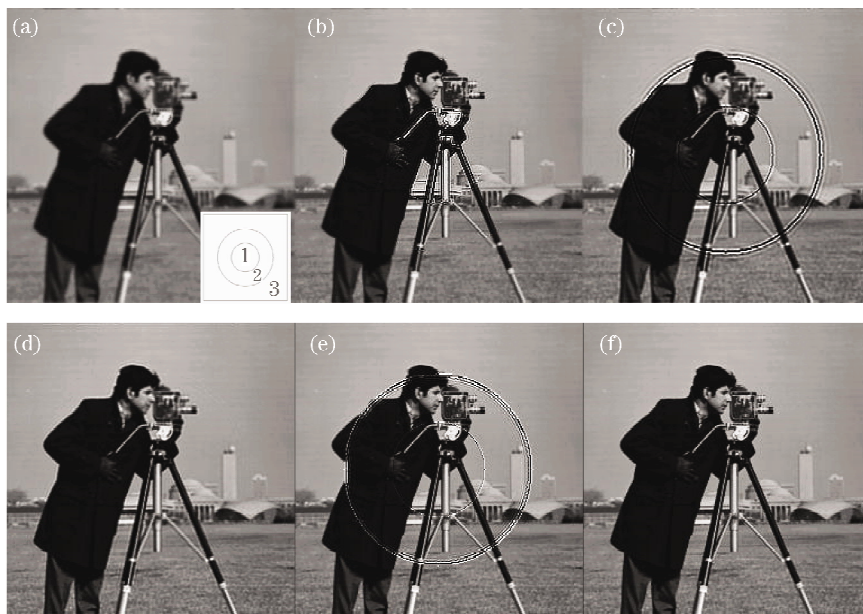


图 6 环形分块 SVPSF 模糊图像及复原图像对比: (a) SVPSF 模糊图像; (b) 单 PSF 复原图像; (c) RL 无重叠区分块复原图像; (d) RL 重叠分块复原图像; (e) TV 无重叠区分块复原图像; (f) 结合 GRM 评价的 TV 重叠分块复原图像

Fig. 6 Circular-sectioned SVPSF-blurred image and restored images: (a) SVPSF-blurred image; (b) restored image with single PSF; (c) non-overlapped sectioned restored image with RL algorithm; (d) overlapped sectioned restored image with RL algorithm; (e) non-overlapped sectioned restored image with TV algorithm; (f) overlapped sectioned restored image with TV algorithm based on GRM assessment approach.

4 实验与分析

图 6 列出了一组圆形-环形分割的例子,对于呈径向对称如像差等因素的退化,通常可以使用此类分割。图 6(a)是由内向外分三层,各层退化函数分别为 PSF_1 , PSF_2 和 PSF_3 ,模糊程度依次递增的 SVPSF 模糊图像;(b)是 PSF_2 单 PSF 复原图像,可以看到图像中部已出现伪信息,而图像外部清晰度仍不够;(c)是 RL 算法无重叠分块的复原结果,层间的波纹缺陷十分明显;(d)是 RL 算法重叠分块的复原结果;(e)是 TV 算法无重叠区分块复原结果,

层间的振铃波纹较之(c)中更细,但缺陷仍无法忽视;(f)是结合 GRM 评价的 TV 重叠分块复原结果。与(d)相比,(f)中图像第二层的头发和衣服边缘的振铃已消失,而脸部的清晰度亦有明显提高。

所列的各模糊图像及复原图像的五种客观质量评价价值如表 1 所示,可以看到均方根(MSE),峰值信噪比(PSNR)和熵(Entropy)函数因受图像振铃波纹或伪信息影响几乎无法反映图像质量好坏的顺序,而 GRM 和 SSIM 算法的评价价值基本与人眼观察相符,结合 GRM 评价的 TV 算法复原效果最好。

表 1 模糊图像和各复原图像质量评价

Table 1 image quality assessments of the blurred images and restored images

	MSE	PSNR	Entropy	GRM	SSIM
Fig. 2	3532.6	22.8311	2.2763	0.7745	0.8309
Fig. 3	3994.6	23.8986	2.2962	0.8354	0.8671
Fig. 4(a)	3816.8	23.5032	2.2980	0.8937	0.8895
Fig. 4(b)	3792.0	23.4456	2.2889	0.8834	0.9001
Fig. 5(a)	3801.8	23.4690	2.2804	0.8753	0.8888
Fig. 5(b)	3831.2	23.5359	2.2783	0.8941	0.9133
Fig. 6(a)	3504.5	22.7616	2.1127	0.7400	0.8386
Fig. 6(b)	3935.4	23.7690	2.1460	0.8836	0.8950
Fig. 6(c)	4041.7	24.0004	2.1855	0.8039	0.8125
Fig. 6(d)	3801.0	23.4672	2.1404	0.9210	0.9216
Fig. 6(e)	4111.8	24.1498	2.1784	0.8493	0.8431
Fig. 6(f)	3853.9	23.5872	2.1366	0.9444	0.9476

图 7 是一组局部离焦的实拍图及复原图。图像左方的一排书离焦量少,清晰度较好;而图像右方的药盒放在书前方约 30cm 处,离焦量较大,更为模糊。将该图像分为前景(药盒)和背景(书)两部分,使用刀刃法分别提取两者的 PSF,然后利用结合 GRM 评价的 TV 重叠分块复原法得到了如图 7(b)的复原图像。值得注意的是,GRM 作为一种以评

价相似度为基础的全参考型评价方法,在实际应用中是有一定局限性的。仿真实验时有模糊前的原图作为参考,而实拍图往往是不存在清晰参考图的,但是在迭代计算过程中,后一幅图像可以以前一幅图像作为参考,计算两者的相似度,当随着迭代的进行,图像改变越来越少,到某一阈值时可认为结果趋于稳定,该结果即为最终的复原图了。



图 7 局部离焦模糊图及复原图:(a)局部离焦的 SVPSF 模糊图像;(b)结合 GRM 评价的 TV 重叠分块复原图像

Fig. 7 Local-defocused SVPSF blurred image and restored image; (a) local-defocused SVPSF blurred image; (b) sectioned restored image with TV algorithm based on GRM assessment approach

5 结 论

对于物空间各点的退化随位置的变化而改变的 SVPSF 图像,使用单一的退化函数和一般的 SPSF 图像复原算法无法得到满意的复原效果。目前主要的三种 SVPSF 复原算法各有其适用范围和优缺点。本文介绍了一种基于总变分最小化方法的 SVPSF 图像分块复原法。总变分最小化复原方法本身具有抑制振铃及噪声的作用,与专门针对振铃波纹评价的 GRM 算法相结合,可以更好的克服分块复原法本身的缺陷,即消除复原图像子块边缘的振铃波纹引起的块间拼接不连续,得到平滑自然的完整图像。适用于医学、遥感、运动或离焦等各类

SVPSF 图像复原。

参 考 文 献

- 1 Gonzalez R. C, Woods R. E. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- 2 Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001
邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- 3 Alexander A. S. Space-variant image motion degradation and restoration [C]. *IEEE*, 1972, **60**(7): 854~861
- 4 Gregory M. Robbins, Thomas S. Huang. Inverse filtering for linear shift-variant imaging systems [C]. *IEEE*, 1972, **60**(7): 862~872
- 5 Alexander A. Sawchuk. Space-variant image restoration by coordinate transformations [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(2): 138~144
- 6 H. J. Trussell, B. R. Hunt. Image restoration of space variant blurs by sectioned methods [J]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Process*, 1978, **26**: 608~609
- 7 H. J. Trussell, B. R. Hunt. Sectioned methods for image restoration [J]. *IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Process*, 1978, **26**: 157~164
- 8 Thomas P. Costello, Wasfy B. Mikhael. Efficient restoration of space-variant blurs from physical optics by sectioning with modified wiener filtering [J]. *Digital Signal Process.*, 2003, **13**(1): 1~22
- 9 Y. P. Guo, H. P. Lee, C. L. Teo. Blind restoration of images degraded by space-variant blurs using iterative algorithms for both blur identification and image restoration [J]. *Image and Vision Comput.*, 1997, **15**: 399~410
- 10 Junmo Kim, Andy Tsai, Mujdat Cetin *et al.*. A curve evolution-based variational approach to simultaneous image restoration and segmentation [C]. *IEEE ICIP*, 2002, **1**: I-109~I-112
- 11 Leah Bar, Nir Sochen, Nahum Kiryati. Restoration of images with piecewise space-variant blur [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, **4485**: 533~544
- 12 Jain K. A, Angel S. E. Restoration of images degraded by spatially varying point spread functions by a conjugate gradient method [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(14): 2186~2190
- 13 John W. Woods, Clark H. Radewan. Kalman filtering in two dimensions [C]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1977, **IT-23**(4): 473~482
- 14 D. A. Fish, J. Grochmalicki, E. R. Pike. Scanning singular-value-decomposition method for restoration of images with space-variant blur [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(3): 464~469
- 15 James G. Nagy, V. Paul Pauca, Robert J. Plemmons *et al.*. Space-varying restoration of optical image [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(12): 3162~3174
- 16 Thomas P. Costello, Wasfy B. Mikhael. Restoration of digital images with known space-variant blurs from conventional optical systems [C]. *SPIE*, 1999, **3716**: 71~79
- 17 Taeyoung Choi, Ikonos satellite on orbit modulation transfer function (MTF) measurement using edge and pulse method[D]. American: South Dakota State University, 2002.
- 18 Zhao Wenqian, Rao Changhui, Geng Zexun. Myopic image deconvolution of point source based on joint estimation of object and point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 52~57
赵文倩, 饶长辉, 耿则勋. 基于目标和点扩展函数联合估计的点源目标图像近视解卷积[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 52~57
- 19 Lu Yuan, Jian Sun, Long Quan *et al.*. Image deblurring with blurred/noisy image pairs [J]. *ACM Trans. Graphics*, 2007, **26**(3):
- 20 S. Osher, L. Rudin, E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Phys. D.*, 1992, **60**: 259~268
- 21 Jose M. Bioucas-Dias, Mario A. T. Figueiredo, Joao P. Olivei. Total variation-based image deconvolution a majorization-minimization approach [C]. *IEEE ICA ASSP*, 2006, **2**: II-861~II-864
- 22 Zhou Wang, Alan Conrad Bovik, Hamid Rahim Sheikh. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2004, **13**(4): 600~612