

基于自类推与 NSCT 的单幅图像超分辨率技术

程倩倩 范新南 李庆武

(河海大学计算机与信息学院, 江苏 常州 213022)

摘要 在很多实际应用中很难获得适当的图像训练集,但是单幅图像放大却是一个病态问题。利用图像局部结构的自相似性和可传递性,结合非下采样 Contourlet 变换(NSCT)的优点,提出一种基于自类推与 NSCT 的单幅图像超分辨率重建(SRR)方法。采用 NSCT 对源图像和退化图像进行多尺度、多方向分解,得到用于学习的各带通方向子带对,利用图像自类推技术生成高分辨率的各带通方向子带,与立方插值放大后的源图像进行 NSCT 重构得到超分辨率重建图像。实验结果表明,该方法可以独立进行,摆脱一般方法对训练结合的依赖,能产生更为合理的细节,视觉边缘更清晰,图像更逼真。

关键词 图像处理;超分辨率;非下采样 Contourlet 变换;自类推

中图分类号 TP911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051002

Single Image Super Resolution Based on Self-Analogies and NSCT

Cheng Qianqian Fan Xinnan Li Qingwu

(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract In lots of cases, it's difficult to obtain appropriate image training set, but single-image zooming is an ill-posed problem. Using the self-similarity feature among local structure in an image which can be maintained in the scale space and the advantage of nonsubsampling contourlet transform (NSCT), a single image super-resolution reconstruction (SRR) algorithm based on image analogies and NSCT is proposed. NSCT is performed on the original image and the degraded image at different scales and directions, thus varieties of directional bandpass subband pairs are obtained. The relationships between the subband pairs by image self-analogies are learned to generate high resolution varieties of directional bandpass subband. The super-resolution reconstructed image is obtained by transforming these changed subband coefficients and the zoomed-original image by bicubic interpolation back to the spatial domain. The experimental results show that the algorithm can be executed independently without any supposed outliers. It can generate more reasonable details than general methods, thus the edges are much clearer and the image is more natural-looking.

Key words image processing; super resolution; nonsubsampling contourlet transform; self-analogies

OCIS codes 100.6640; 100.3008

1 引言

由于成像系统物理条件和天气条件的影响,使得获得的实际图像质量较差,分辨率较低。传统的单帧图像放大是一个病态问题,由于无法利用额外的信息,存在重建图像轮廓模糊,高频信息受损的问题。为了解决该问题,人们研究了多种自适应图像插值方法,图像质量有一定程度的提高,但边缘模糊现象仍然存在。因此人们提出一种具有边缘保持的自适应图像插值方法,但是该方法存在消耗时间长和暂用存储空间大的缺点,并且在干扰严重的情况下容易错判边缘^[1]。

收稿日期: 2011-11-19; **收到修改稿日期**: 2012-01-05; **网络出版日期**: 2012-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(60972101,60872096)、疏浚技术教育部工程研究中心开放基金(HDCN08002)和江苏省社会发展科技项目(BS2007058)资助课题。

作者简介: 程倩倩(1986—),女,硕士研究生,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: qianqianspring@163.com

导师简介: 范新南(1965—),男,博士,教授,主要从事数字图像处理、水下声纳信息获取与处理等方面的研究。

E-mail: fansxn@126.com(通信联系人)

图像超分辨率技术是在不改变硬件设备的前提下,采用某种方法利用已有的低分辨率图像来重建高分辨率图像。目前,超分辨率重建(SRR)技术^[2~17]主要分为两大类:基于重构的和基于学习的。基于重构的又分为频域法和空域法,相比于频域法,空域法具有更大的灵活性,最常用的有最大后验概率估计法^[8,9]和凸集投影法^[10,11]。基于重构的方法通常需要输入多幅图像,由于只能从输入的多幅图像中获得所需要的信息,同时需要增加的信息本质上是无法预测的,故该方法存在放大上限。2001年,纽约大学的 Hertzmann 等^[13]提出了图像类推算法,并可以通过图像类推来实现超分辨率重建。文献^[13]为了获得更准确的细节信息,训练集合中的样本数量往往较大,导致算法运行速度较慢;同时由于图像的灰度值变化范围比较大,导致类推过程产生较大的误差。古元亭等^[14,15]提出采用一种图像自类推的算法来提高图像的清晰度,该算法较一般的图像类推算法^[13]速度大为加快,并且能产生较为合理的细节,但是由于学习样本只有自身,超分辨率重建的图像上会有一定的人工痕迹,比如视觉上过硬的边缘。喻继业等^[16]提出一种将图像类推技术与立方插值相结合的方法,该方法直接对高分辨率图像的高频细节信息进行学习,图像变清晰的同时人工痕迹也有一定程度的减少,但该算法时间开销较大,同时需要大量的合适的学习样本,可是在很多实际应用中很难获得大量的适当的图像训练集。

非下采样 Contourlet 变换(NSCT)^[18~20]在线和超平面的奇异性表示上具有各向异性特点,不仅能将图像各频带区分开,且多向和平移不变性可以增强细节的保护能力。为了解决边缘模糊、依赖训练集合、人工痕迹明显的问题,本文融合自类推技术^[14,15,17]和 NSCT 以及立方插值的优点,提出一种基于自类推与 NSCT 的单幅图像超分辨率重建方法。实验结果表明,该方法可以独立进行,摆脱一般方法对训练集合的依赖,能产生更合理的细节,图像更逼真。

2 非下采样 Contourlet 变换

为了消除 Contourlet 变换^[21,22]的频谱混叠现象,增强方向选择性和平移不变性,Cunha 等^[19]利用非下采样塔式分解和非下采样滤波器组构造出了 NSCT。NSCT 不仅具有多尺度、良好的空域、频域局部特性和多方向特性,还具有平移不变特性,使得各子带系数具有相同尺度大小。NSCT 的两层分解如图 1 所示,首先通过非下采样塔式滤波器实现图像的多尺度分解,再通过非下采样方向滤波器组将高频部分分解成 2 的任意次幂个方向。

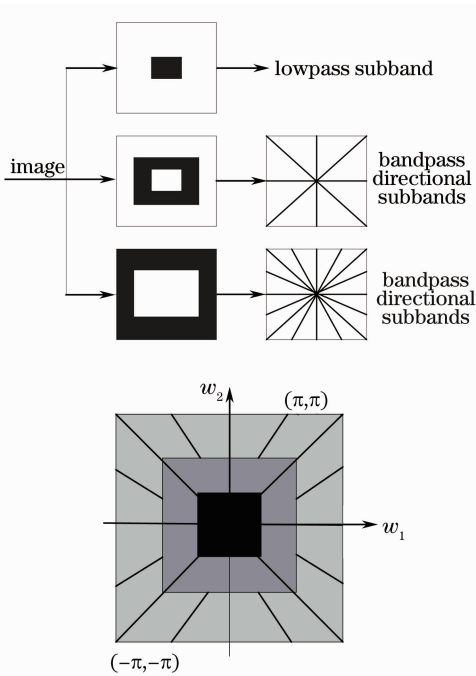


图 1 非下采样 Contourlet 变换
Fig. 1 Nonsubsample contourlet transform

3 图像类推

图像类推的基本思想来源于多分辨纹理合成技术,其中关键的风格映射被定义为一个近似最近搜索问题,从而把风格的生成换成纹理合成^[14]。

3.1 图像类推问题描述

已知一组图像 A 、 A' 和 B ,其中 A 为未经滤波的源图像, A' 为滤波后的源图像, B 为一幅未经滤波的图像,通过学习 A 和 A' 的映射关系 f ,利用关系 f 作用在目标图像 B 上,从而类推出一幅滤波后的目标图像 B' ,记作: $A:A'\Rightarrow B:B'[f(B)]$ 。

3.2 图像类推算法

为了达到最佳匹配搜索的目的,Hertzmann 等^[13]采用邻域最佳匹配来衡量目标像素点 q 与源像素点 p 之间的差距,同时采用相似最近邻域搜索算法来加速像素的搜索匹配。为了避免在合成过程中目标图像的

结构发生变化,采用高斯金字塔^[16]来保持目标图像的结构。

图像类推算法流程可用以下步骤来描述:

- 1) 对源图像 A 、滤波后源图像 A' 和目标图像 B 进行预处理,计算像素特征向量;
- 2) 创建 A 、 A' 和 B 的高斯金字塔,在 B 的基础上构建 $f(B)$ 的高斯金字塔;
- 3) 初始化搜索算法的数据结构;
- 4) 按照金字塔的结构,从顶层到最底层,逐层逐像素点合成目标图像 $f(B)$ 中的每个像素点,搜索过程中运用相邻域搜索算法进行加速,像素之间根据邻域最佳匹配原则进行匹配,最后保存目标图像 $f(B)$ 。

3.3 自类推算法

图像类推必须依赖训练集合,但是在很多实际应用中很难获得适当的图像训练集。图像自类推^[14,15]算法的优点就是不需要训练集合,完全可以独立进行。设输入图像为 I ,退化算子为 φ ,则理想的超分辨率算子为 φ^{-1} ,根据图像局部结构的自相似性和可传递性^[17],可以认为 φ^{-1} 在相邻的尺度上是一个不变算子。通过退化模型^[12]产生退化算子 φ ,则 I 与 $\varphi(I)$ 构成了一对具有超分辨率关系的图像对,即 $I = \varphi^{-1}[\varphi(I)]$ 。通过学习它们之间的关系,并将之传递给 I ,即可实现对 I 的超分辨率重建。这样就将超分辨率问题转化成一个特殊的图像类推问题,其中 $\varphi(I)$ 和 I 分别相当于类推问题训练集合中的 A 和 A' , φ^{-1} 是学习的风格, I 同时又是待处理对象 B ,目标是 $B' = \varphi^{-1}(I)$ 。

4 基于自类推与 NSCT 的超分辨率重建算法

4.1 算法原理框图

图 2 给出了基于自类推与 NSCT 的单幅图像超分辨率重建算法的原理框图。该方法融合了自类推算法、NSCT 和立方插值算法的优点,弥补了图像类推算法依赖训练结合、误差大和自类推算法人工痕迹明显、视觉过硬和立方插值算法边缘模糊的不足。

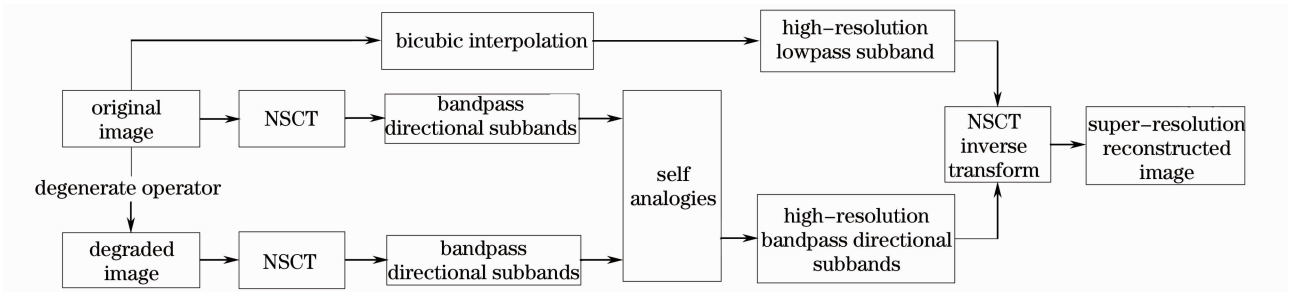


图 2 基于自类推与 NSCT 的算法原理框图

Fig. 2 Principle of the algorithm based on self analogies and NSCT

首先对源图像和退化图像进行多尺度、多方向的 NSCT 分解,得到用于学习的各带通方向子带对,接着通过图像自类推技术学习各带通方向子带对之间的非线性映射关系,并将该映射关系作用于各带通方向子带,得到高分辨率的各带通方向子带,接着对源图像进行立方插值,最后将立方插值放大后的源图像与高分辨率的各带通方向子带进行 NSCT 重构,得到超分辨率重建图像。

4.2 算法步骤

- 1) 设输入的源图像为 I ,退化算子为 φ ,本文 φ 是一个高斯模糊过程,则退化图像记作 $\varphi(I)$,对 I 进行 J 级 NSCT 变换,得到各带通方向子带 $C_{j,k}^{2^j}(I)$,接着对 $\varphi(I)$ 也进行 J 级 NSCT 变换,得到各带通方向子带,其中 $1 \leq j \leq J, 1 \leq k \leq 2^j$, j 表示尺度, k 表示带通子带方向, 2^j 表示尺度 j 上分解的方向数;
- 2) 将 $C_{j,k}^{2^j}(I)$ 和对应的 $C_{j,k}^{2^j}[\varphi(I)]$ 构成一对具有超分辨率关系的细节图像对;
- 3) 通过图像自类推学习 $C_{j,k}^{2^j}(I)$ 和对应的 $C_{j,k}^{2^j}[\varphi(I)]$ 的映射关系 $f_{j,k}^{2^j}$;
- 4) 将映射关系 $f_{j,k}^{2^j}$ 作用于 $C_{j,k}^{2^j}(I)$,生成高分辨率的各带通方向子带;
- 5) 对立方插值后的源图像和高分辨率的各带通方向子带进行 NSCT 逆变换,生成超分辨率重建的图像。

主要模块可用下面的伪语言进行描述:

函数: 自类推 $\{C_{j,k}^{2l_j}[\varphi(I)], C_{j,k}^{2l_j}(I)\}$,

令 $A = C_{j,k}^{2l_j}[\varphi(I)]$, $A' = C_{j,k}^{2l_j}(I)$, $B = C_{j,k}^{2l_j}(I)$, 完成训练集合构建;

$S(V) =$ 函数基于方块的图像类推 (A, A', B) ;

初始化最佳能量 $E = \max_E$, 初始化最佳解 $G = \text{null}$;

循环: 从第一块至最后一块, 遍历 n_i

 循环: 从最佳匹配至第 k 佳匹配, 遍历 k

 计算当前解 G 的能量 $E(G')$;

 如果 $E(G') < E$, $E = E(G')$;

$G \leftarrow G'$, $B \leftarrow G$ 。

函数: 基于方块的图像类推 $[\phi(W), W, W]$,

对 W 进行分块, 使 $W = \{b_i\}$, 并初始化图 G , 使 $n_i = b_i$;

计算 b_i 的中心位置 p_i 对应的在 $\phi(W)$ 上的位置 $\phi(p_i)$;

循环: 从左上角像素至右下角像素, 遍历 $\phi(p_i)$ 的相邻搜索域,

 前 k 个与 b_i 距离最近方块 $\phi(b_i^k) \leftarrow$ 函数 Almost Nearest Neighbor(ANN) 搜索 (k, b_i) ;

 将 $\phi(b_i^k)$ 对应的 W 的图像块 $\phi^{-1}[\phi(b_i^k)]$ 作为图案 P_i^k ; $n_i = \bigcup P_i^k$; $S(V) = \prod n_i$ 。

5 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性, 将本文方法与立方插值、古元亭等^[15]提出的自类推算法和喻继业等^[16]提出的图像类推算法进行对比实验。实验中选择图像是常用的标准测试图像 Lena, 如图 3(a) 所示, 图像大小为 512 pixel×512 pixel。对图 3(a) 进行 2 倍下采样和高斯模糊(hsize: 3, sigma: 0.849)后得到本实验的源图像图 3(b); 图 3(c) 是对图 3(b) 进行立方插值后的图像; 图 3(d) 是对图 3(b) 采用文献[15]提出的自类推算法重建的图像; 图 3(e) 是对图 3(b) 采用文献[16]提出的改进的图像类推算法重建的图像; 图 3(f) 是对图 3(b) 采用本文方法重建的图像, 其中 NSCT 分解层数取为 2, 从低分辨率层到高分辨率层, 方向分解数依次取为 4 和 8, 尺度分解采用‘9-7’滤波器, 方向分解采用‘dmaxflat’滤波器。

从图 3 中可以明显看出, 图 3(c) 的边缘最模糊; 图 3(d) 的边缘比图 3(c) 清晰, 生成的细节较为合理, 缺点是局部区域有块状现象, 边缘视觉过硬, 有明显的人工痕迹; 图 3(e) 的人工痕迹比图 3(d) 有一定程度的减少, 克服了局部块状现象, 但是边缘视觉较硬, 呈现轻微的锯齿状; 图 3(f) 的边缘比图 3(e) 更清晰, 纹理更丰富, 人工痕迹弱, 图像更逼真。图 4 给出了对源图像的某高频子带[图 4(b)]采用本文算法重建的高分辨率的高频子带[图 4(c)], 图 4(a) 是对应的退化图像的高频子带。

为了更清晰的说明重建效果, 对超分辨率重建图像的局部区域进行了放大比较, 如图 5 所示。图 5(a1), (a2) 的边缘最模糊, 纹理很弱; 图 5(c1), (c2) 的边缘比图 5(b1), (b2) 清晰, 同时区域过渡更自然, 纹理信息更丰富, 人工痕迹弱。如图 5(b2) 的人脸轮廓不连续, 局部区域呈现锯齿状, 纹理较粗糙; 图 5(c2) 的人脸轮廓连续, 局部纹理较光滑细致。

同时以峰值信噪比(PSNR)、标准偏差、梯度和信息熵作为超分辨率重建效果测度指标, 如表 1 所示。通常, 标准偏差越大, 图像的灰度级分布越均匀, 目视效果越好; 梯度越大, 图像的细节反差越大, 纹理特征更为突出, 清晰度较高; 信息熵越大, 图像的信息量越丰富。本文方法峰值信噪比比文献[16]约高出 4 dB, 且具有最高的标准偏差值和信息熵值, 表明采用本文方法重建的图像灰度分布更均匀, 信息量更多, 目视效果更好。需要注意的是, 明显的人工痕迹和过硬的边缘导致采用文献[15]算法和文献[16]算法的重建图像的梯度较大, 但是过硬的边缘导致人工痕迹明显, 降低了重建图像的质量, 影响了图像的逼真度。表 1 的定量分析与前面的主观视觉效果相一致, 说明本文方法的有效性。



图 3 Lena 图像的超分辨率重建结果图。(a)标准 Lena 图像;(b)源图像;(c)立方插值;(d)古元亨的自类推方法;
(e)喻继业的图像类推方法;(f)本课题方法

Fig. 3 Lena image processed by SRR. (a) Standard lena image; (b) original image; (c) cubic interpolation; (d) self analogies provided by Gu Yuanting; (e) image analogies provided by Yu Jiye; (f) the proposed method

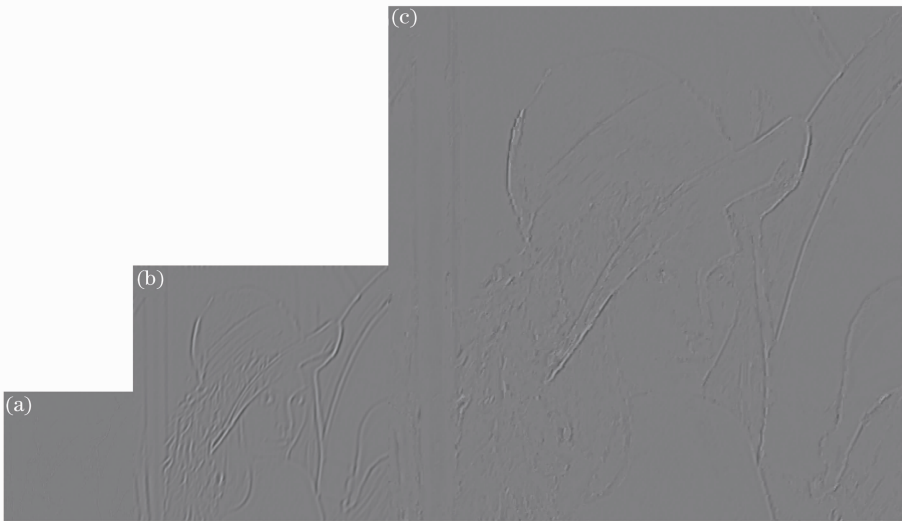


图 4 某高频子带的超分辨率重建结果图。(a)对应的退化图像的高频子带;(b)源图像的某高频子带;(c)对应的超分辨率重建高频子带

Fig. 4 A high frequency subband processed by the proposed method. (a) Corresponding high frequency subband of degraded image; (b) a high frequency subband of original image; (c) corresponding reconstructed high frequency subband

表 1 超分辨率重建图像的质量参数

Table 1 Quality parameters of SRR images

	Bicubic interpolation	Reference[15]	Reference[16]	Proposed method
PSNR /dB	18.6802	18.9173	19.2959	19.7482
Standard deviation	51.6291	52.2471	52.2807	52.9157
Gradient	3.7975	5.0866	6.1577	4.6035
Information entropy	7.5743	7.5442	7.5802	7.5813

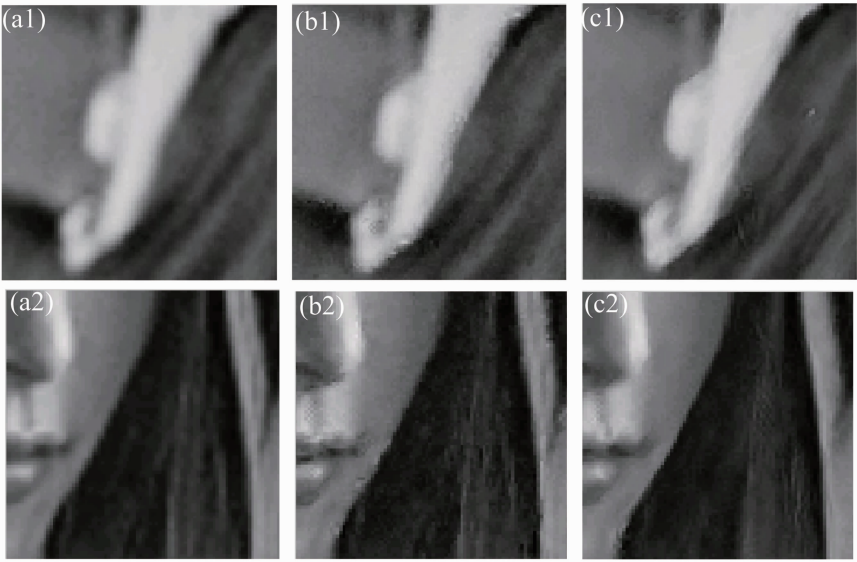


图 5 超分辨率重建图像的局部对比。(a1),(a2)立方插值;(b1),(b2)喻继业的图像类推;(c1),(c2)本文方法
Fig. 5 Local contrast of image super-resolution reconstruction. (a1),(a2) cubic interpolation; (b1),(b2) image analogies provided by Yu Jiye; (c1),(c2) the proposed method

6 结 论

本文融合图像自类推技术^[14,15,17]和非下采样 Contourlet 变换^[18~20]的优点,提出一种基于自类推的 NSCT 域单幅图像超分辨率重建方法。NSCT 的各向异性和平移不变性可以增强细节的保护能力;自类推技术不需要训练集合,完全可以独立进行,能产生较为合理的细节,并且较一般的图像类推算法速度大为加快。实验结果表明,该方法可以独立进行,摆脱一般方法对训练集合的依赖,能产生更合理的细节,人工痕迹弱,图像更逼真。

参 考 文 献

1 Sun Chunfeng, Yuan Feng, Ding Zhenliang. New locally adaptive image interpolation algorithm based on edge preserving [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2010, **31**(10): 2279~2284
孙春风,袁峰,丁振良. 一种新的边缘保持局部自适应图像插值算法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(10): 2279~2284
2 Jing Tian, Kai-Kuang Ma. A survey on super-resolution imaging[J]. *Signal. Image. Video. P.*, 2011, **5**(3): 329~342
3 J. D. van Ouwerkerk. Image super-resolution survey[J]. *Image. Vision. Comput.*, 2006, **24**(10): 1039~1052
4 Shen Huanfeng, Li Pingxiang, Zhang Liangpei *et al.*. Overview on super resolution image reconstruction[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(2): 194~199
沈焕锋,李平湘,张良培等. 图像超分辨率重建技术与方法综述[J]. *光学技术*, 2009, **35**(2): 194~199
5 Sung Cheol Park, Min Kyu Park, Moon Gi Kang. Super-resolution image reconstruction; a technical overview[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003, **20**(3): 21~36
6 Zhang Xinming, Shen Lansun. Super-resolution restoration with multi-scale edge-preserving regularization [J]. *J. Software*, 2003, **14**(6): 1075~1081
张新明,沈兰荪. 基于多尺度边缘保持正则化的超分辨率复原[J]. *软件学报*, 2003, **14**(6): 1075~1081
7 Pu Jian, Zhang Junping, Huang Hua. A survey of super resolution algorithms[J]. *J. Shandong University (Engineering Science)*, 2009, **39**(1): 27~32
浦剑,张军平,黄华. 超分辨率算法研究综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2009, **39**(1): 27~32
8 Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin *et al.*. Modified MAP algorithm for single frame super-resolution reconstruction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 011003
张磊,杨建峰,薛彬等. 改进的最大后验概率估计法实现单幅图像超分辨率重建[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(1): 011003
9 Peng Xujun, Zhang Guilin. Restoration of high resolution image based on Gibbs model [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2003, **32**(6): 613~616

彭旭俊, 张桂林. 基于 Gibbs 模型的提高图像分辨率方法[J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(6): 613~616

10 A. J. Patti, M. I. Sezan, A. M. Tekalp. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1997, **6**(8): 1064~1076

11 A. J. Patti, Y. Altunbasak. Artifact reduction for set theoretic superresolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2001, **10**(1): 179~186

12 Liu Ju, Qiao Jianping. Learning-based super-resolution reconstruction[J]. *CAAI Transaction on Intelligent Systems*, 2009, **4**(3): 199~207

刘 璐, 乔建苹. 基于学习的超分辨率重建技术[J]. 智能系统学报, 2009, **4**(3): 199~207

13 A. Hertzmann, C. E. Jacobs, N. Oliver *et al.*. Image analogies [C]. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico, 1997, 554~560

14 Gu Yuanting, Wu Enhua. Non-linear convolution based controllable image analogies and self analogies [J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, **20**(3): 332~336

古元亭, 吴恩华. 基于非线性卷积的可控图像类推和自类推技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, **20**(3): 332~336

15 Gu Yuanting, Wu Enhua. Image-analogies based super resolution[J]. *J. Software*, 2008, **19**(4): 851~860

古元亭, 吴恩华. 基于图像类推的超分辨技术[J]. 软件学报, 2008, **19**(4): 851~860

16 Yu Jiye, Wu Wei, Teng Qizhi *et al.*. Image-analogies based super resolution for remote sensing images[J]. *J. Computer Applications*, 2010, **30**(1): 61~67

喻继业, 吴 炜, 滕奇志. 基于图像类推的遥感图像超分辨率技术[J]. 计算机应用, 2010, **30**(1): 61~67

17 Han Hua, Wang Hongjian, Peng Silong. A new super-resolution algorithm for a single image based on Local structure similarity[J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, **17**(5): 941~947

韩 华, 王洪剑, 彭思龙. 基于局部结构相似性的单幅图像超分辨率算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, **17**(5): 941~947

18 Wu Xiaoyue, Guo Baolong, Tang Lu *et al.*. A new adaptive image denoising method based on the nonsubsampling contourlet transform algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2147~2152

武晓玥, 郭宝龙, 唐 璐 等. 一种新的基于非下采样 Contourlet 变换的自适应图像去噪算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2147~2152

19 A. L. Cunha, J. Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling Contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2006, **15**(10): 3089~3101

20 Wu Wei, Yang Xiaomin, Chen Mo *et al.*. Super-resolution restoration algorithms based on improved nonsubsampling contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1493~1501

吴 炜, 杨晓敏, 陈 默 等. 基于改进的非下采样 Contourlet 变换的超分辨率复原算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1493~1501

21 Lou Shuai, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Iterative image restoration algorithm based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2768~2773

娄 帅, 丁振良, 袁 峰. 基于 Contourlet 变换的迭代图像复原算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2768~2773

22 M. N. Do, M. vetterli. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2005, **14**(12): 2091~2106