

# 一种改进的非线性外推图像增强算法及 在高分辨率图像重建中的应用\*

戴天荣 张立明

(复旦大学电子工程系, 上海, 200433)

**摘要** 对非线性外推图像增强算法进行分析, 充分考虑图像高频分量的局部特征, 提出一种新的非线性滤波剪切策略包络阈值剪切算法. 改进后的算法使整幅图像的增强趋于均匀化, 增强效果显著改善. 结合该算法重建得到的高分辨率图像, 明显优于只用插值算法得到的结果.

**关键词** 图像增强, 高分辨率图像重建, 非线性滤波, 包络检波.

## AN IMPROVED IMAGE ENHANCEMENT ALGORITHM BY NON - LINEAR EXTRAPOLATION IN FREQUENCY SPACE AND THE APP - LICATION TO HIGH RESOLUTION IMAGE RECONSTRUCTION \*

DAI Tian-Rong ZHANG Li-Ming

(Department of Electronics and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** An improved image enhancement algorithm by contour threshold nonlinear extrapolation in frequency space was proposed. Considering the fluctuation of the amplitude of the high frequency component, the new clip strategy improves the performance of image enhancement. The results of high resolution image reconstruction combining this method show that the improved algorithm is suitable and powerful.

**Key words** image enhancement, high resolution image reconstruction, nonlinear filter, envelope demodulation.

### 引言

图像的高频分量决定了图像边缘的锐利度, 当因为某种原因导致其高频分量衰减或者丧失时, 图像的主观视觉效果就会模糊. 这样的一些场合就需要对图像进行增强处理: 一种情况等效为低通滤波, 如图像传输时的信道频响、光学系统的散焦、物体运动、图像平滑去噪处理等等; 另一种情况是对图像进行缩放处理, 当一幅图像被放大后它的空间频率将被压缩相同的倍率而丧失高频成分. 现在已经有多种图像增强算法: 基于模糊逻辑处理<sup>[1,2]</sup>、通过调整直方图<sup>[3]</sup>、基于变换的频率域图像增强<sup>[4]</sup>以及通过非线性滤波进行频率外推<sup>[5]</sup>等. 区别于提升图像中原有高频分量幅度的典型做法, 频率空间非线性外推增强算法<sup>[5]</sup>是基于多分辨率图像中边缘形状

不变特性, 通过非线性滤波外推出新的高频分量, 这为图像增强和高分辨率图像重建提出了一个新的思路. 但现有的频率空间非线性外推增强算法的剪切策略并不合理, 实际由外推频率分量所带来的增强效果并不显著. 本文对该算法进行分析后, 提出一种新的剪切策略改进非线性滤波算法, 图像增强的对比实验表明: 改进后的算法在外推新的高频分量时显著优于原算法, 结合该算法重建得到的高分辨率图像, 明显优于只用插值算法得到的结果.

### 1 频率空间非线性外推图像增强算法

频率空间非线性外推图像增强算法是 H. Greenspan 等在 2000 年提出的<sup>[5]</sup>. 在子带分析中一幅图像可以表示成一幅低频图像加上相应的高频图像(对应边缘信息), 那么在图像增强中, 如果把

\* 国家自然科学基金(批准号 60171036)资助项目  
稿件收到日期 2002 - 03 - 30, 修改稿收到日期 2002 - 10 - 20

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 60171036)  
Received 2002 - 03 - 30, revised 2002 - 10 - 20

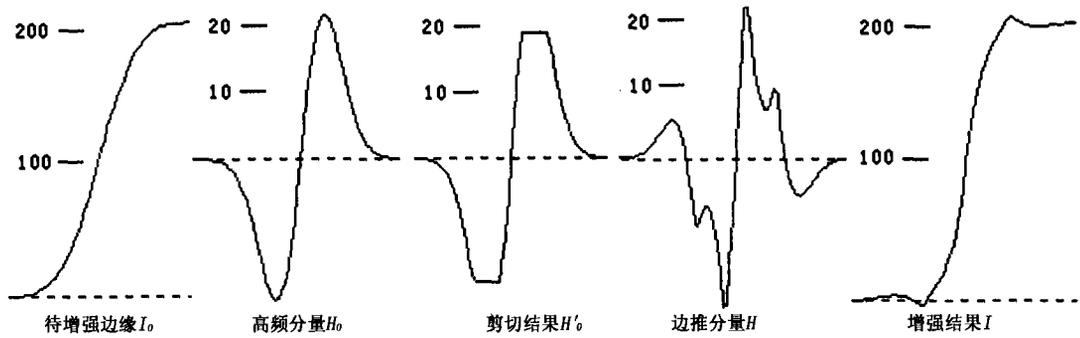


图1 一维边缘的频率空间非线性外推增强原理  
Fig.1 The principle of 1-D enhancement by nonlinear extrapolation

待增强图像  $I_0$  看作低频图像,若是能够构造出对应的更高频图像  $H$ ,迭加  $I_0$  和  $H$  将得到比  $I_0$  更清晰(边缘更锐利)的图像  $I$ .对  $I_0$  中的高频分量  $H_0$  进行非线性滤波,可以外推出与  $H_0$  相位一致的更高频图像  $H$ (外推分量),从而实现图像增强.其非线性滤波是对  $H_0$  削波而获得的,如式(1)、(2)、(3)和(4)所示.

$$T = (1 - c) \times H_{0max}, \quad 0 \leq c \leq 1, \quad (1)$$

$$BOUND(x) = \begin{cases} T & \text{if } x > T \\ x & \text{if } -T \leq x \leq T, \\ -T & \text{if } x < -T \end{cases} \quad (2)$$

$$H'_0 = s \times (BOUND(H_0)), \quad (3)$$

$$H = BP(H'_0). \quad (4)$$

式(1)中  $c$  为剪切参数,  $H_{0max}$  为高频图像  $H_0$  中灰度最大值,  $c$  决定了非线性滤波的剪切阈值  $T$ .式(2)中  $BOUND(x)$  为对  $H_0$  中像素  $x$  的剪切函数,式(3)用幅度参数  $s$  对剪切后的  $H_0$  进行缩放.式(4)中的  $BP$  表示带通滤波(在数字系统中实际也是一个高通滤波).图1表示了一维边缘的频率空间非线性外推增强原理,其中  $I$  是由  $I_0$  和  $H$  迭加得到.

## 2 对频率空间非线性外推增强算法进一步分析及改进

图1可看到:频率空间非线性外推图像增强算法产生了原边缘所不具有的高频分量,从而增强了边缘的视觉锐利度.式(1)和(4)中的参数  $c$ 、 $s$  对增强效果有一定的影响: $c$  决定了新增高频分量的位置(相位), $c$  越小剪切拐点离  $H_0$  波峰越近,剪切后存留部分越大,所需  $s$  参数较小;反之, $c$  越大剪切拐点离波峰越远,所需  $s$  参数较大.图2为不同参数时增强的实际效果, $c$  较小时,增强效果较好而且过冲也小; $c$  较大时,剪切拐点的离散分布导致  $H$  出现多个峰值,中间的两个主峰提供了边缘增强的主导作用,邻近平坦区域的小幅度波峰则导致了边缘过冲,且  $c$  越大过冲点离边缘中心越远.

为了观察纯粹由外推频率分量贡献的增强效果,在上面的实验中并没有省略式(4)中的带通滤波(在文献[5]中被省略).高频图像  $H_0$  被剪切并放大后得到的  $H'_0$  可表示为

$$H'_0 = s \times (H_0 - Clip(x)).$$

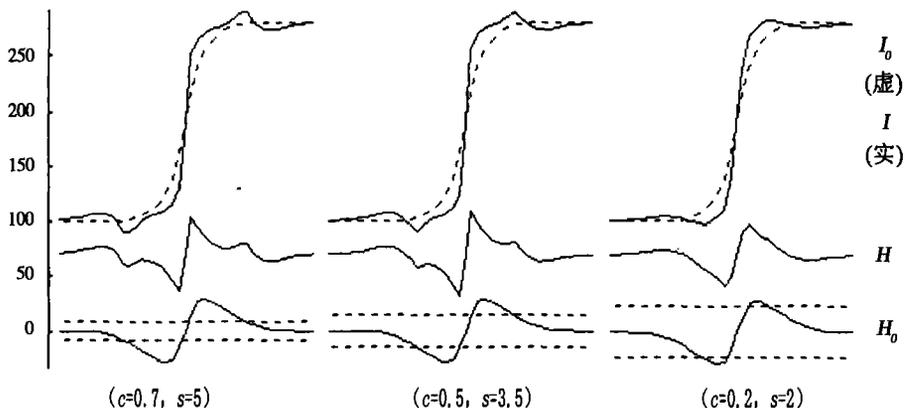


图2 不同参数时实际增强结果,虚直线是采用的剪切阈值  
Fig.2 The results with different parameter sets, The broken beeline is the clipping threshold

$Clip(x)$  为被剪除部分的表达式,可以看出  $H_0$  中新增频率分量只存在于  $Clip(x)$  中,  $H_0$  包含的频率信息都是  $I_0$  原有的,当省略增强算法中对  $H_0$  的带通滤波操作或者带通滤波器没有较好的截止特性时,增强作用就不仅由新增频率分量(包含于  $Clip(x)$ )贡献,而且原有高频分量(包含于  $H_0$ )也将参与了边缘的增强.为了研究外推频率分量对图像增强的实际贡献,后续实验中将直接对  $Clip(x)$  带通滤波.

通常一幅图像中表征边缘信息的高频分量的幅度总是参差不齐,在进行整幅图像增强时使用全局剪切阈值就显得很不合理.从全局看,为了使具有高对比度的主要边缘具有较好的增强效果而不引入太大的过冲,剪切参数  $c$  不可选得太大,故较高的剪切阈值很难照顾到具有小幅度高频分量的低对比边缘.对于一幅待增强图像来说,需要增强的重点往往不是少数已经很显著的边缘,而是数量较多却不显著的低对比边缘.全局剪切阈值导致一种马太效应,其结果是本来就清晰的边缘得到增强,甚至导致很大的过冲,而模糊的边缘却得不到增强.

为消除马太效应使图像在整体上均匀增强,我们改进了非线性滤波中使用的剪切策略.一个容易实现的方法是利用高频图像  $H_0$  的局部信息,对  $H_0$  进行包络检波,用得到的包络代替  $H_{0max}$  作为剪切阈值的基准.这样在整幅图像增强时能兼顾各种幅度的高频分量,促使增强作用均匀化.包络剪切阈值非线性滤波用式(6)、(7)所示的剪切策略代替原有算法中式(1)、(2)进行剪切,然后使用式(3)、(4)进行非线性滤波.

$$T = (1 - c) \times LP(\text{abs}(H_0)), \quad (6)$$

$$BOUND(H_0(j, k))$$

$$= \begin{cases} T(j, k) & \text{if } H_0(j, k) > T(j, k) \\ H_0(j, k) & \text{if } -T(j, k) \leq H_0(j, k) \leq T(j, k) \\ -T(j, k) & \text{if } H_0(j, k) < -T(j, k) \end{cases} \quad (7)$$

式(6)实现了对  $H_0$  包络检波,其中  $\text{abs}()$  是取绝对值操作,  $LP()$  表示低通滤波.所提取的包络跟随局部波动的灵敏度取决于所使用的低通滤波器的通带范围,通带较宽时,包络对局部幅度波动反应灵敏,通带较窄时检出的则是对应较大范围内幅度变化的缓变包络.

### 3 改进算法对一维及二维边缘的增强实验

一维边缘上的对比实验:从 lena 图像中抽取一行(图 3(a)),经过低通滤波即平滑处理后作为待增强波形  $I_0$ (图 3(b)).采用高斯脉冲响应的低通滤波器(截止频率约为  $\pi/8$ )对  $I_0$  滤波作子带分离以获取  $H_0$  分量.实验分别用全局阈值和包络阈值对  $I_0$  作增强处理,以期恢复出平滑之前的锐利边缘,对比结果如图 3(c)和(d)所示:图 3(c)是全局剪切阈值得到的增强结果,图 3(d)是包络剪切阈值得到的增强结果.实验结果表明改进后的包络阈值增强算法几乎使所有边缘都得到了适当的增强,有效地消除了马太效应,增强结果明显比全局阈值增强算法更逼近原始波形.考察 2 种算法外推出的高频分量可以进一步看到包络阈值的优越性(如图 4),图 4(a)表示了 2 种不同阈值对高频分量  $H_0$  的剪切情况,虚直线为全局阈值,虚曲线为包络阈值,图 4(b)是全局阈值剪得的  $Clip(x)$  经带通滤波外推出的频率分量,图 4(c)是包络阈值外推得到的频率分量.容易

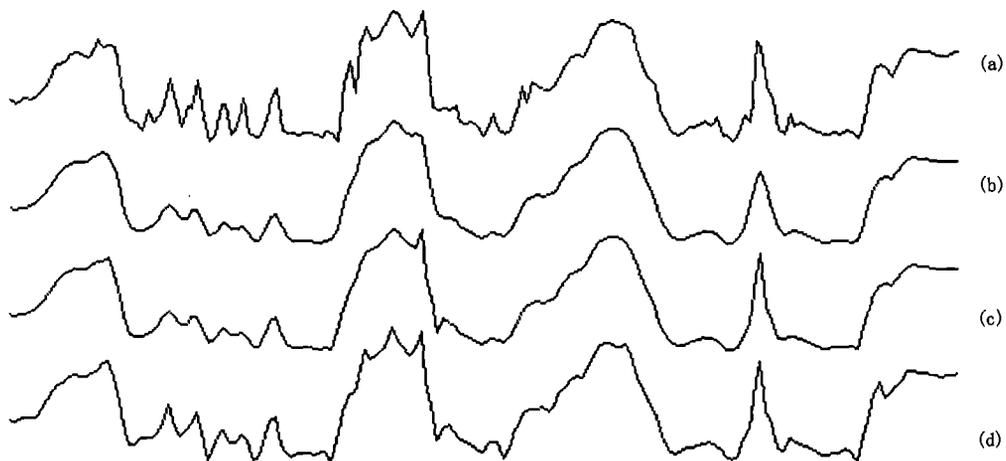


图 3 全局阈值和包络阈值边缘增强算法得到的对比结果

Fig. 3 The results contrast: uniform threshold versus contour threshold

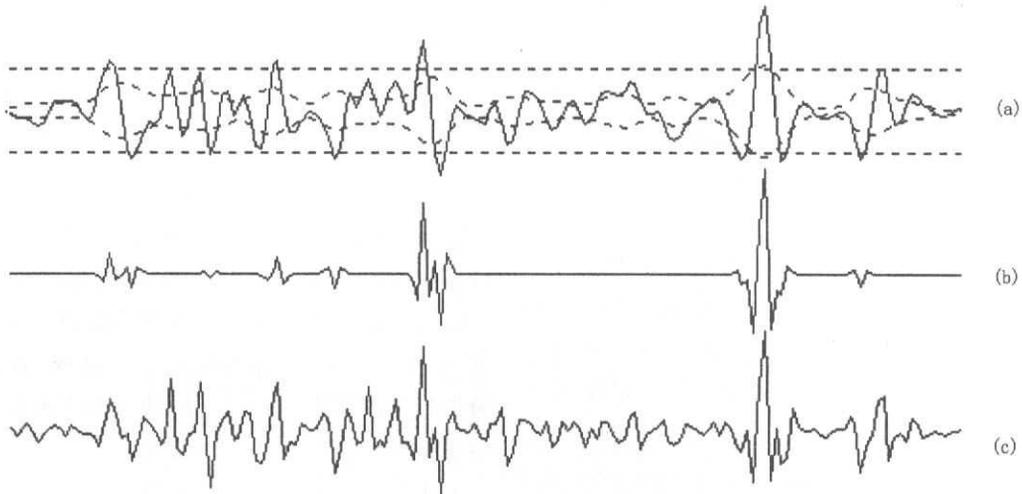


图4 一维情况下不同剪切策略外推得到不同的频率分量  
 Fig.4 The different frequency components yielded by different clip strategies

发现全局阈值在大多数区域并没有给予增强,增强的只是那些本来已很锐利的边缘.

二维图像上的增强实验:将一幅  $256 \times 256$  的 lena 图像经低通后作为待增强图像  $I_0$ . 如图 5(左), 图像下面为相应的幅度谱. 采用一维高斯脉冲响应低通滤波器(截止频率约为  $\pi/8$ )对  $I_0$  的  $x, y$  方向作二次滤波以分离  $H_0$  高频分量, 实验中使用同一滤波器对  $H_0$  作包络检波. 2 种剪切策略使用相同的剪切参数  $c=0.4$  和幅度参数  $s=3.5$ . 全局阈值剪切策

略得到的增强结果如图 5(中), 包络剪切策略得到的结果如图 5(右), 对比后不难发现全局阈值算法的增强效果并不明显, 频谱拓展非常有限; 在包络阈值的增强结果中, 无论是从图像的主观视觉锐利度还是频谱的拓展观察, 增强效果都非常显著.

#### 4 改进算法在高分辨率图像重建中的应用

Burt 和 Adelson 曾引入基本高斯函数的金字塔编码策略<sup>[6,7]</sup>: 用具有高斯脉冲响应的低通滤波器,

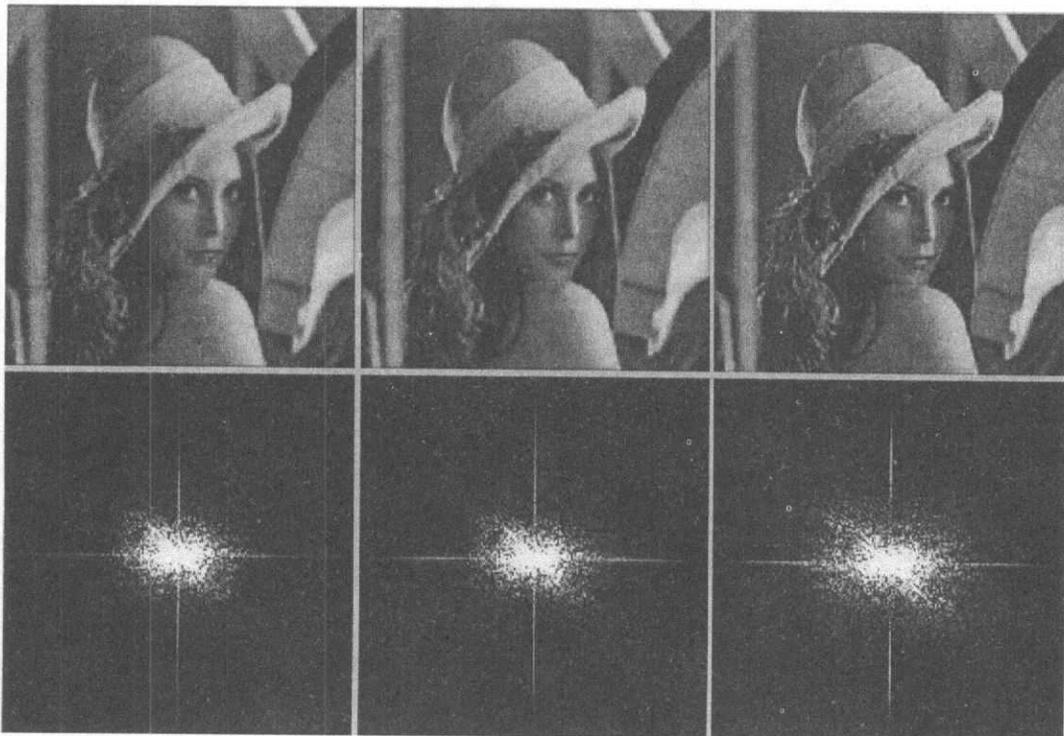
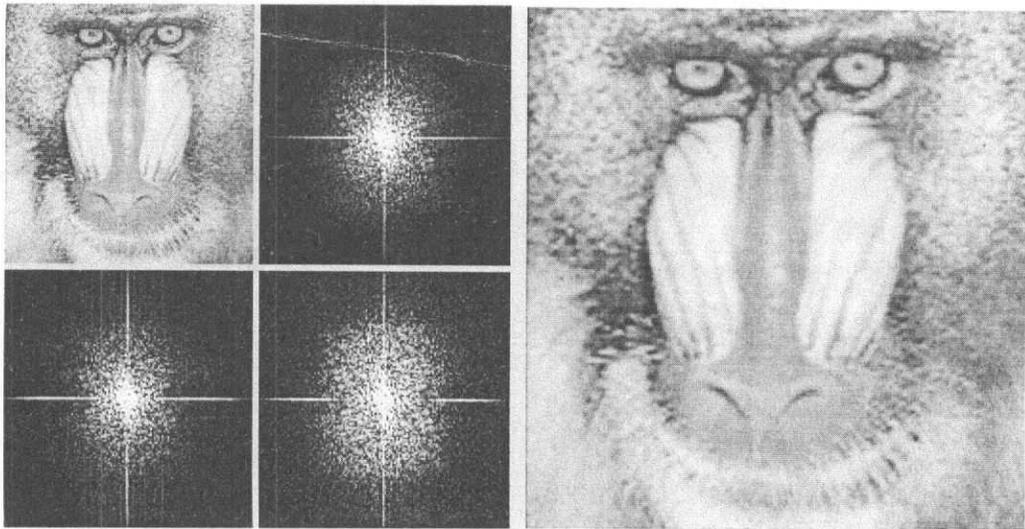
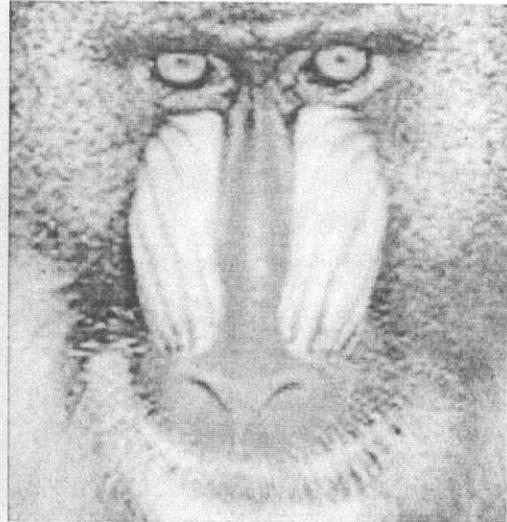


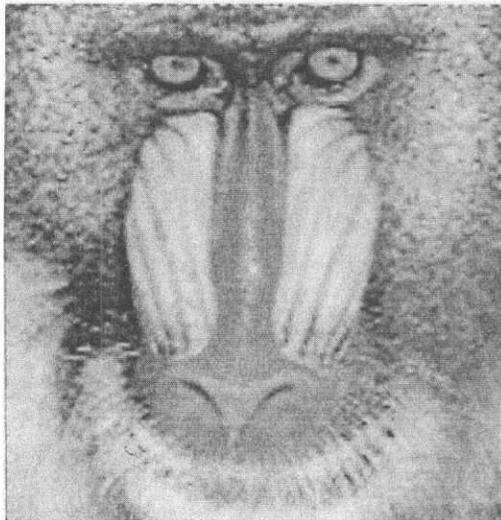
图5 用不同剪切策略的非线性外推图像增强算法得到不同的增强效果  
 Fig.5 The enhanced images and spectrums by different clip strategies



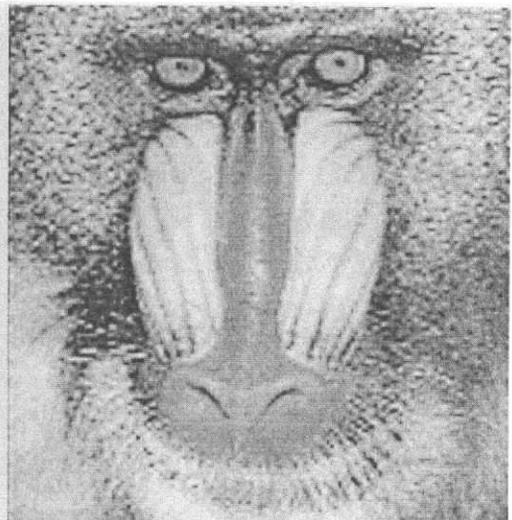
a 低分辨率原图 I<sub>0</sub> 及 b (右)、c (左下) 和 d (右下) 的频谱  
 a: original image with low resolution; b, c, d: spectra of the images shown right, bottom-left and bottom-right.



b 双线性内插后的图像  
 b: result using bilinear interpolation



c 双线性内插加全局阈值的图像  
 results using bilinear interpolation combined the enhancement algorithm by nonlinear extrapolation.  
 c: with unique threshold;



d 双线性内插加我们的方法得到的图像  
 results using bilinear interpolation combined the enhancement algorithm by nonlinear extrapolation.  
 d: with local threshold

图 6 直接插值以及结合不同剪切策略非线性外推方法重建得到的结果

Fig.6 The high resolution images reconstructed by different methods

传递函数为  $W$ , 对一幅图像  $I_0$  进行滤波得到低频图像  $I_1^0$  (式(8)), 原图  $I_0$  减去低频图像  $I_1^0$  得到高频图像  $H_0$  (式(9)),  $H_0$  保存了精细的边缘信息. 再对低频图像  $I_1^0$  降采样得到  $I_1$  (式(10)). 这一过程在降采样后的图像上迭代进行, 对一幅  $N \cdot N (N = 2^m)$  的图像进行  $m$  次迭代后, 将得到只包含一点 (直流分量) 的图像  $I_m$ . 迭代公式如下:

$$I_{n+1}^0 = W_n \times I_n, \tag{8}$$

$$H_n = I_n - I_{n+1}^0, \tag{9}$$

$$I_{n+1} = \text{Subsample}(I_{n+1}^0), \tag{10}$$

$$n = 0 \dots (m - 1).$$

$I_m, H_{m-1}, H_{m-2} \dots H_0$  组成了图像的金字塔表示. 同

编码过程相反, 对图像  $I_{n+1}$  进行增采样 (插值后再低通滤波), 恢复到降采样前的大尺度图像  $I_{n+1}^0$ , 然后迭加上相应频段的边缘信息图像  $H_n$  可以重建  $I_n$ . 迭代执行解码算法将重建原始图像  $I_0$ .

由金字塔结构的解码过程可知, 一幅低分辨率图像增采样后加上相位一致的高频边缘图像可以得到高分辨率图像. 如果能够构造一幅图  $I_0$  在更大尺度上具有一致相位的高频信息  $H_{-1}$  (对应更为精细的边缘), 就可以重建比简单插值更为理想的高分辨率图像  $L_{-1}$ , 基于非线性滤波的频率外推则为这种思想提供了有效的手段. 通过滤波提取  $I_0$  的高频分量  $H_0$ , 对  $H_0$  进行增采样后得到的大尺度图像  $H_0^0$

进行前述非线性滤波(式(1)~(4)),便可以外推得大尺度上相位一致的高频边缘信息 $H_{-1}$ 、 $H_{-1}$ 迭加到 $I_0$ 增采样后的图像 $I_0^0$ 上便重建得到高分辨率图像 $L_1^0$ ,外推得到的新增高频分量将使重建图像比典型插值重建结果具有更锐利更清晰的视觉效果。

在实际高分辨率图像重建实验中,首先将 $I_0$ (ape128×128)用双线性内插进行增采样得到一幅256×256的图像 $I_0^0$ ,然后在 $I_0^0$ 上直接提取高频分量 $H_0^0$ 。对 $H_0^0$ 进行前述非线性滤波处理外推用于改善重建质量的新增高频分量,全局阈值和包络阈值剪切策略使用相同的参数 $c=0.4$ 、 $s=3$ 。不同策略处理结果如图6所示。图6中a图左上位置是低分辨率图像 $I_0$ ,右上是直接插值重建结果(图6b)的幅度谱,左下是采用全局阈值重建结果(图6c)的幅度谱,右下是采用包络阈值重建结果(图6d)的幅度谱。

实验结果表明,迭加上外推频率分量后的重建图像比直接插值得到的高分辨率图像更清晰,主观视觉效果更为锐利。对比2种剪切策略,再次显示了包络阈值非线性外推方法的优点,全局阈值的结果中只有眼睛边缘等少数地方看出锐利度改善的效果;而我们的方法不仅在频谱上明显拓展,而且在胡须以及低对比的毛发边缘处都提高了视觉锐利度。

## 5 结论

本文对频率空间非线性外推图像增强算法中参

数对实际增强效果的影响进行进一步分析,研究了使用全局阈值进行整幅图像增强时带来的缺点,利用高频分量的局部信息对剪切策略作改进,并应用于高分辨率图像重建,实验结果证明包络阈值频率空间非线性外推增强算法显著优于原有算法,在拓展图像频谱提供更精细的边缘信息方面具有优越的性能。

## REFERENCES

- [1] Russo F, Ramponi G. A fuzzy operator for the enhancement of blurred and noisy images. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, 4: 1169—1174
- [2] Choi Y S, Krishnapuram R. A robust approach to image enhancement based on fuzzy logic. *IEEE Trans. Image Processing*, 1997, 6: 808—825
- [3] Stark J Alex. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, 9: 889—896
- [4] Agaian S S, Panetta K, Grigoryan A M. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure. *IEEE Trans. Image Processing*, 2001, 10: 367—382
- [5] Greenspan H, Anderson C H, Akber S. Image enhancement by nonlinear extrapolation in frequency space. *IEEE Trans. Image Processing*, 2000, 9: 1035—1048
- [6] Burt P J, Adelson E A. The laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Trans. Commun.*, 1983, 31: 532—540
- [7] Anderson C H. A Filter-subtract-decimate hierarchical pyramid signal analyzing and synthesizing technique. U S Patent 718104, 1987