

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)12-2117-07

论文索引信息: 王孝通, 金鑫, 徐晓刚, 张美玉. 联合双边图像插值 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(12): 2117-2123

## 联合双边图像插值

王孝通<sup>1) 3)</sup>, 金鑫<sup>1) 3)</sup>, 徐晓刚<sup>2) 3)</sup>, 张美玉<sup>1) 3)</sup>

<sup>1)</sup> (海军大连舰艇学院航海系, 大连 116018) <sup>2)</sup> (海军大连舰艇学院装备系统与自动化系, 大连 116018)

<sup>3)</sup> (海军大连舰艇学院光电技术研究所, 大连 116018)

**摘要:** 传统的图像插值算法及其改进算法都存在边缘模糊、边缘锯齿或局部扭曲变形等问题。提出联合双边图像插值, 首先采用传统插值算法对原始图像进行插值, 将其结果作为导引图像对原始图像进行联合双边上采样, 并给出其核函数方差的自适应确定算法。实验结果表明, 与传统插值算法相比, 该算法明显改进插值图像质量, 与已有的绝大多数非线性改进算法相比还提高了插值速度。

**关键词:** 图像插值; 双边滤波; 联合双边上采样; 边缘保护

## Joint bilateral image interpolation

Wang Xiaotong<sup>1) 3)</sup>, Jin Xin<sup>1) 3)</sup>, Xu Xiaogang<sup>2) 3)</sup>, Zhang Meiyu<sup>1) 3)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018 China)

<sup>2)</sup> (Department of Arming System and Automation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018 China)

<sup>3)</sup> (Laboratory of Photo Electricity Technology, Dalian Naval Academy, Dalian 116018 China)

**Abstract:** Conventional improved interpolation introduces blurs, jagged edges, or artifacts. The Joint Bilateral Interpolation (JBI) is proposed in this paper. The low-resolution (LR) input image is first being interpolated with a fast and simple algorithm and then the interpolated result is used as a guidance image to apply the joint bilateral filter to upsample the LR image. And the parameters of Gaussian kernel function are given in the paper. Experiment results demonstrate that our new interpolation algorithm substantially improves the quality of the interpolated images and costs less calculation time than most existing nonlinear improved interpolation algorithms.

**Keywords:** image interpolation; bilateral filter; joint bilateral upsampling; edge preserving

## 0 引言

图像插值广泛应用于遥感图像处理、军事侦察、高清晰数字电视(HDTV)、数字摄影图像处理以及工业印刷等领域。传统的插值算法是利用邻近像素点的灰度值加权平均来计算未知像素点的灰度值,而这种加权平均一般表现为信号的

离散采样值与插值核函数之间的 2 维卷积。如最近邻插值(Nearest)<sup>[1]</sup>、双线性插值(BiLinear)<sup>[1]</sup>、三次 B 样条插值(B-Splines)<sup>[2]</sup>、双立方插值(BiCubic)<sup>[3]</sup>、多结点样条插值(MkSpline)<sup>[4]</sup>、2 维分段三次卷积插值(2D-PCC)<sup>[5]</sup>等都是通过图像与核函数进行卷积运算实现图像插值,这类算法统称为线性插值。线性插值对于带宽有限信号的重建结果是精确的。

收稿日期: 2010-11-08; 修回日期: 2011-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(60975016); 辽宁省自然科学基金项目(20082176); 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金项目(A0906)。

第一作者简介: 王孝通(1962—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为图像处理、计算机仿真、电子海图等。

E-mail: dljtxywx@163.com。

但数字图像信号频谱通常不满足带宽有利条件,则线性插值将丢失图像的高频信息,导致边缘锯齿、边缘模糊、局部扭曲等问题,插值图像不能满足主观视觉要求。

为解决图像插值的边缘锯齿和边缘模糊,提出很多非线性插值算法。基于协方差的边缘导向插值<sup>[6]</sup>(EDI)估计低分辨率图像的局部协方差系数,再根据高、低分辨率局部协方差之间的几何对偶关系实现局部最小均方差意义下的图像插值。Warp Distance 插值<sup>[7]</sup>利用图像的局部不对称性(local asymmetry features)对插值点的空间距离进行非线性修正,并将修正距离应用于传统的双线性和三次卷积插值(WaDi-Bilinear, WaDi-Bicubic)。梯度插值<sup>[8]</sup>通过权值函数将图像局部梯度特征融合到传统的线性插值(A-Bilinear, A-Bicubic),这样线性插值能够根据图像的梯度自适应调整临域点的权值。局部特征插值<sup>[9-40]</sup>综合利用图像的局部不对称性和梯度特征,进一步改善了插值图像质量。以上非线性插值主要思想是根据图像的局部特征调节待插值点周围临域点参与插值计算的权值,进而实现图像边缘信息的保护。

此外,常见的非线性插值还有基于神经网络的图像插值<sup>[11-42]</sup>、基于小波分析的图像插值<sup>[13-45]</sup>、偏微分方程(PDE)插值<sup>[16]</sup>和分形插值<sup>[17]</sup>。这些插值算法通过分析图像局部的频率成分和连续性以调节插值系数,建立局部自适应的插值算法,一定程度上改善了重建图像的质量。

1998年,Tomasi和Manduchi提出双边滤波<sup>[18]</sup>,平滑图像的同时较好地保留了图像的边缘信息。2004年,Petschnigg等人提出联合双边滤波<sup>[19]</sup>,用于合成同一场景闪光和不闪光的照片,取得了较好的视觉效果。基于这一启示,Kopf等人提出联合双边上采样算法<sup>[20]</sup>(JBU),用于大尺寸图像的分析 and 增强。文献[21]提出多尺度联合双边纹理上采样,对合成纹理图像进行上采样。应用JBU的前提是原始高分辨图像必须已知,而高分辨图像是图像插值的目标图像,因而不能应用JBU实现图像插值。本文提出图像的联合双边插值算法(JBI),首先采用一般的高效插值算法快速得到高分辨率的图像,将该图像作为联合双边上采样的导引图像(guidance

image),再对原始图像进行联合双边上采样,得到最终的插值结果。

## 1 联合双边上采样

高斯滤波器处理图像噪声,导致图像边缘模糊,而双边滤波综合考虑了滤波窗口中心点与临域点的空间距离和像素值差异,有效保护了图像边缘。对于某点的像素 $I_p$ ,其滤波结果如下<sup>[18]</sup>

$$J_p = \frac{1}{k_p} \sum_{q \in \Omega} I_q f(\|p - q\|) g(\|I_p - I_q\|) \quad (1)$$

式中, $f$ 、 $g$ 分别为距离和像素差核函数, $\Omega$ 为核函数支撑域, $k_p$ 为距离权值和像素差权值乘积之和,即归一化参数。

双边滤波处理不闪光照片时,将同一场景的闪光照片作为导引图像,保持了不闪光图像的亮度特征,同时具备闪光图像清晰的边缘特征。双边滤波形式为

$$J_p = \frac{1}{k_p} \sum_{q \in \Omega} I_q f(\|p - q\|) g(\|\tilde{I}_p - \tilde{I}_q\|) \quad (2)$$

式(2)称为联合双边滤波<sup>[19]</sup>(JBF),其中 $I$ 、 $\tilde{I}$ 分别为不闪光和闪光照片, $f$ 、 $g$ 分别为距离和像素差核函数, $\Omega$ 为核函数支撑域, $k_p$ 为归一化参数。

对大尺寸图像进行分析和增强,通常先将原始图像降采样为小尺寸图像,对小尺寸图像进行相应的图像处理,然后再将小尺寸图像的处理结果上采样到原始图像大小。因此,Kopf等人<sup>[20]</sup>提出联合双边上采样,即将已知的原始高分辨率图像作为导引图像对小尺寸图像的处理结果进行双边上采样,算法如下

$$\tilde{S}_p = \frac{1}{k_p} \sum_{q_s \in \Omega} S_{q_s} f(\|p_s - q_s\|) g(\|\tilde{I}_p - \tilde{I}_q\|) \quad (3)$$

式中, $S_{q_s}$ 为降采样的小尺寸图像的处理结果, $\tilde{S}_p$ 为欲求的原始大尺寸图像的处理结果, $\tilde{I}$ 为原始大尺寸图像, $p_s$ 和 $q_s$ 为小尺寸图像空间位置, $p$ 、 $q$ 为大尺寸图像中与 $p_s$ 、 $q_s$ 对应的空间位置。

## 2 联合双边图像插值

在文献[20]中,采用联合双边上采样的前提

是高分辨率图像已知。而对于图像的插值,高分辨率图像是求解的目标图像,因此图像插值是联合双边上采样处理的逆问题。考虑到高分辨率图像是作为联合双边上采样的导引图像,本文提出图像的联合双边插值(JBI)算法,其基本思想是:以一般高效插值算法得到的高分辨率图像为联合双边上采样的导引图像(guidance image),对原始图像进行联合双边上采样。传统插值算法通过图像与某一核函数进行卷积实现场景复原。联合双边插值采用联合双边滤波的核函数取代传统插值算法的核函数,与图像进行卷积,有效地保护了图像的边缘。具体步骤如下:

- 1) 应用一般高效图像插值算法对原始低分辨率图像  $I$  进行插值放大,得到高分辨率图像  $\tilde{I}$ ;
- 2) 将高分辨图像  $\tilde{I}$  作为原始图像  $I$  的导引图像进行联合双边上采样,得到最终的高分辨率插值图像

$$I_H = \frac{1}{k_p} \sum_{q \in \Omega} I_q f(\|p - q\|) g(\|\tilde{I}_p - \tilde{I}_q\|) \quad (4)$$

式中, $I$  为原始低分辨率图像, $\tilde{I}$  为采用传统的图像插值算法得到的高分辨率导引图像, $I_H$  为插值结果, $p$  为已知点空间位置, $q$  为插值点空间位置, $f, g$  分别为距离和像素差核函数, $\Omega$  为核函数支撑域, $k_p$  为归一化参数。

在双边滤波中,通常以高斯函数作为核函数,则可得到以高斯函数作为核函数的联合双边插值

$$I_H = \frac{1}{k_p} \sum_{q \in \Omega} I_q \exp\left(-\frac{\|p - q\|^2}{2\sigma_d^2}\right) \times \exp\left(-\frac{\|\tilde{I}_p - \tilde{I}_q\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (5)$$

式中, $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  分别为空间距离方差和像素值方差。

### 2.1 获取导引图像 $\tilde{I}$

考虑到导引图像的作用,获取导引图像的插值算法应满足简单、高效、快速,而且具有一定的边缘保护能力。本文选用 Ramponi 的 WaDi-Bicubic 插值<sup>[7]</sup>作为获取导引图像的插值算法。该算法的边缘保护能力优于传统的 Bicubic 插值,且运算速度较快。WaDi-Bicubic 插值对插值点空间距离  $s$  修正(如图 1)为

$$s' = s - kAs(s - 1) \quad (6)$$

式中, $A$  为插值点邻域的几何相似性参数,由下式定义

$$A = \frac{|f(x_{k+1}) - f(x_{k-1})| - |f(x_{k+2}) - f(x_k)|}{M - 1} \quad (7)$$

式中, $M$  为灰度级最大值 8 位图像取 256  $k$  为修正因子,通常选 1 或 2。将式(6)中  $s'$  取代 Bicubic 插值中的  $s$ ,则可得到 WaDi-Bicubic 插值算法。

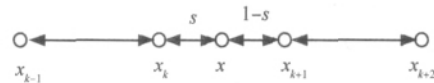


图 1 插值点空间距离

Fig. 1 Spatial distance of interpolation pixel

采用 WaDi-Bicubic 插值算法,对原始图像进行插值放大,获得高分辨率的导引图像  $\tilde{I}$ 。

对于彩色图像插值,通常对图像 R、G、B 3 个通道分别插值,这种处理方式计算量大,而且导致边缘区域的颜色扩散。考虑到导引图像  $\tilde{I}$  只是为插值过程进行边缘引导,而彩色图像的边缘信息可通过其亮度图像来反映。因此,对彩色图像进行联合双边插值时,先获取其在 YIQ 彩色空间中的亮度信息

$$Y = 0.301R + 0.586G + 0.113B \quad (8)$$

并通过 WaDi-Bicubic 插值获取导引图像  $Y'$ ,将  $Y'$  同时作为彩色图像 R、G、B 3 个通道的导引图像进行联合双边插值。

图 2 给出了通过 WaDi-Bicubic 算法得到的导引图像  $\tilde{I}$  与最终插值结果的对比。 $\tilde{I}$  提供了联合双边上采样算法中的像素亮度差核函数,由于边缘具有像素亮度差别大的特点,因此最终的插值结果能够很好的消除边缘模糊的问题。

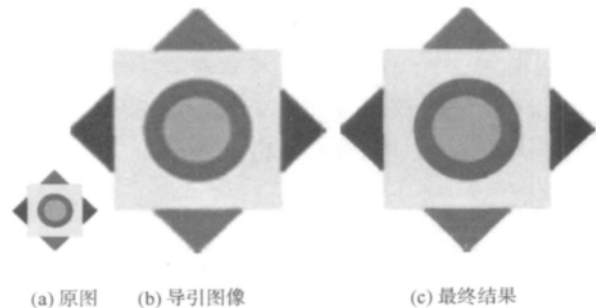


图 2 WaDi-Bicubic 算法得到的导引图像  $\tilde{I}$  与最终结果对比

Fig. 2 Comparison of the guidance image by WaDi-Bicubic and the final interpolation result

## 2.2 确定 $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$ 参数

式(5)中  $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$  是待定的参数,文献[20]中给出了联合双边上采样窗口大小  $L$  以及  $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$  的经验值 ( $L = 5$ ,  $\sigma_d = 0.5$ ,  $\sigma_r = 0.1$ )。本文算法将根据窗口大小及图像的局部特征自适应调整  $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$  参数值。

如图3所示,在方差为1的情况下,高斯核函数的值域集中在区间  $[-2, 2]$  内,区间外则迅速衰减至零。在插值计算中,与插值点距离越大,其距离权值越小。因此,最大距离点取权值  $\exp(-2)$  较为合适

$$f_{\text{Gauss}}(d_{\max}) = \exp\left(-\frac{d_{\max}^2}{2\sigma_d^2}\right) = \exp(-2) \quad (9)$$

即

$$\sigma_d = \frac{d_{\max}}{2} = \frac{\sqrt{2(0.5L+0.5)^2}}{2} = \frac{\sqrt{2(L+1)}}{4} \quad (10)$$

式中,  $L$  为插值窗口大小。

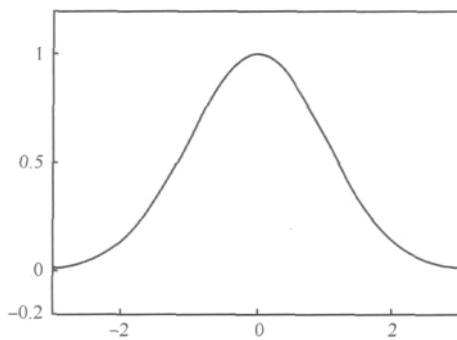


图3 高斯核函数

Fig. 3 Gauss kernel function

在式(5)中,像素差高斯核函数体现了像素差对权值的影响,而图像在不同区域的像素局部差异是不一样的,  $\sigma_r$  不宜采用固定值。为突出图像边缘,像素差大小为均方差的像素点应对应较小的权值  $\exp(-2)$ :

$$g_{\text{Gauss}}(std_{\Omega}) = \exp\left(-\frac{std_{\Omega}^2}{2\sigma_r^2}\right) = \exp(-2) \quad (11)$$

即

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{std_{\Omega}^2}{4}} = 0.5std_{\Omega} \quad (12)$$

式中,  $std_{\Omega}$  为图像  $I$  在插值窗口  $\Omega$  内的均方差。

图4给出了当  $L = 4$ ,  $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$  取不同值时的

插值结果,其中图4(b)为文献[20]给出的取值,由于  $\sigma_d$  较小,加大了距离权值对插值的影响,导致边缘锯齿现象;图4(c)增大了  $\sigma_d$ ,突出了像素差权值对插值的影响,得到较光滑的边缘,却丢失了图像细节信息。本文给出的  $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$  具有局部自适应能力,有效保护了图像的细节信息,同时也保护了图像边缘。

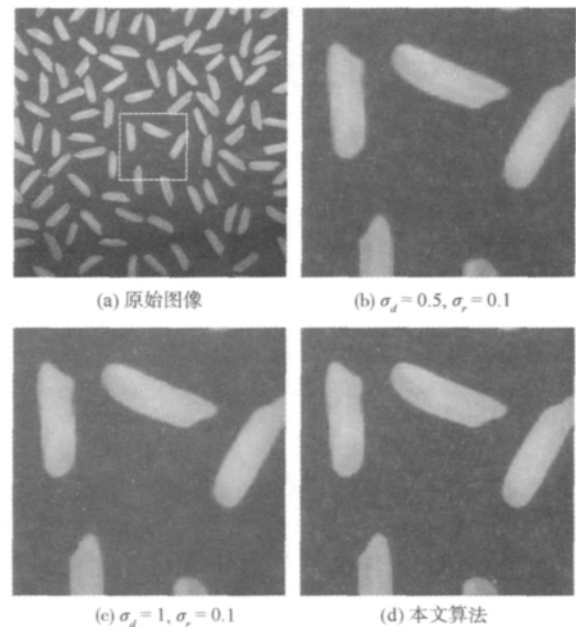


图4 各种方差取值插值结果对比

Fig. 4 Comparison of interpolation results using different deviation

## 3 实验与分析

联合双边插值算法的步骤如下:

1) 通过 WaDi-Bicubic 算法<sup>[7]</sup>对原始图像  $I$  插值获取高分辨图像  $\tilde{I}$ ;

2) 将  $\tilde{I}$  作为导引图像,对原始图像  $I$  进行基于高斯核函数的联合双边上采样,得到最终的高分辨率插值图像  $I_H$ 。

下面通过实验就本文算法与 Bilinear 插值<sup>[1]</sup>、Bicubic 插值<sup>[3]</sup>、局部特征 Bicubic 插值 (L-Bicubic)<sup>[9]</sup>,以及边缘方向插值 (NEDI)<sup>[6]</sup> 进行对比分析。

实验1 对彩色图像 Lena ( $512 \times 512$ ) 和 Peppers ( $512 \times 512$ ) 隔行隔列降采样缩小 2 倍后再插值放大到原始图像大小,插值结果如表 1 所示。

表 1 不同算法插值结果对比

Tab. 1 Comparing interpolation results of different algorithms

	峰值信噪比(PSNR)					运行时间(以 Bicubic 耗时为单位时间)				
	Bilinear	Bicubic	L-Bicubic	NEDI	JB1	Bilinear	Bicubic	L-Bicubic	NEDI	JB1
Lena	32.25	32.46	32.58	32.65	32.79	0.40	1.00	4.67	14.98	2.23
Peppers	29.98	30.30	30.03	30.27	30.66	0.40	1.00	4.82	17.28	2.25

实验 2 对灰度、彩色图像进行了局部高倍插值,插值结果如图 5—图 6 所示。

对比分析表 1 中数据和图 5—图 7 中插值结果可知:

1) 传统的 Bilinear 插值和 Bicubic 插值计算速度快,但插值图像存在明显的边缘锯齿和边缘模糊(如 Lena 帽檐等)。

2) NEDI 算法改善了插值结果,但需要进行大量的矩阵求逆,速度较慢;插值图像在细节特征较明显的区域存在局部扭曲变形(如 Lena 的睫毛)。

3) L-Bicubic 算法通过分别处理 R、G、B 3 个通道实现彩色图像插值,计算速度仍较慢,约为 Bicubic 插值的 3 倍。插值结果存在边缘小锯齿和

边缘模糊。

4) 联合双边插值(JB1)在处理彩色图像时,由于将亮度图像  $Y$  作为导引图像同时处理 R、G、B 3 个通道,计算速度明显优于 NEDI 和 L-Bicubic;同时,有效避免了彩色插值图像的颜色扩散(如 Airplane 的飞机边缘等)。

5) 本文算法的插值图像峰值信噪比(PSNR)明显优于传统的 Bilinear 和 Bicubic,较 NEDI 和 L-Bicubic 也有较大改进。

6) 本文算法根据插值窗口大小和图像的局部特征自适应选择高斯核函数的方差,有效保护了图像边缘和图像细节,较好解决了插值图像的边缘锯齿和边缘模糊问题,在高倍插值时(如 Lena 的局部 8 倍插值)仍能得到较清晰的插值结果。



图 5 灰度 Lena 图像局部 8 倍插值结果

Fig. 5 Results of local grey Lena image interpolation by 8 times



图 6 彩色 Airplane 图像局部 4 倍插值结果

Fig. 6 Results of local color Airplane image interpolation by 4 times

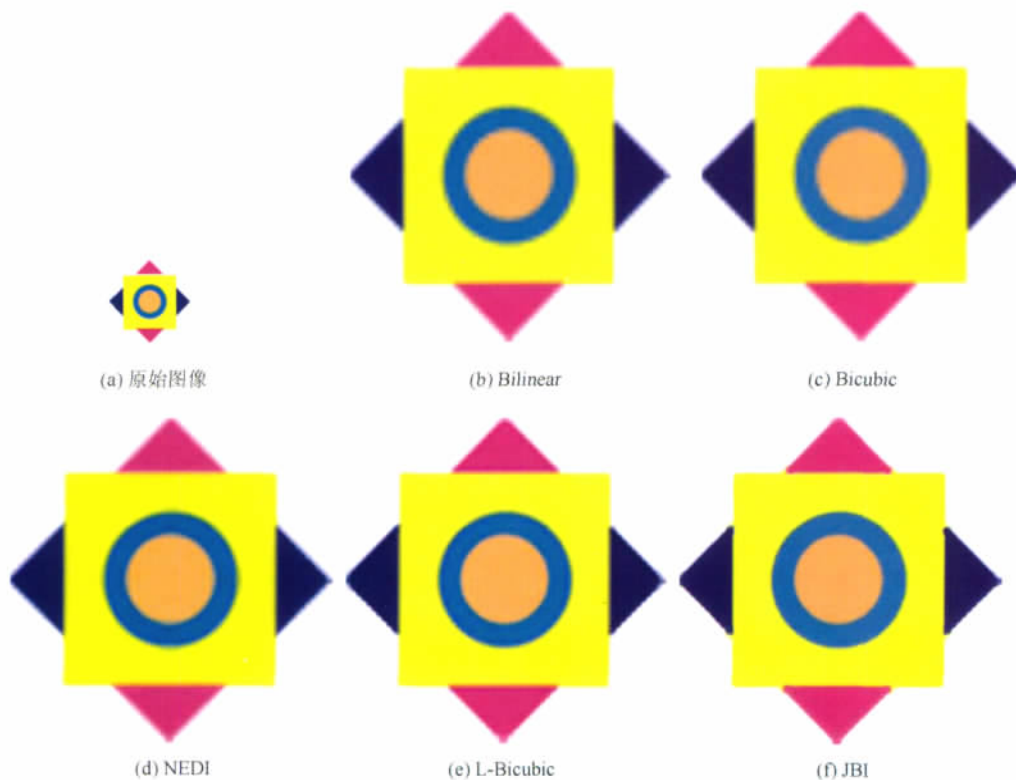


图 7 彩色图像 4 倍插值结果

Fig. 7 Results of color image interpolation by 4 times

## 4 结 论

提出联合双边图像插值 (JBI), 先将原始图像进行简单快速的插值放大, 将插值结果作为导引图像对原始图像进行联合双边上采样。该算法相对一般插值算法而言, 在插值中加入了导引图像, 使插值核函数具有较强的边缘适应能力, 能够较好的保留图像的边缘信息。文中给出了高斯核函数方差的自适应确定算法。实验结果表明, 本文算法较好的解决了插值图像的边缘锯齿、边缘模糊和局部扭曲等问题; 获得了较清晰的插值图像; 插值图像峰值信噪比明显优于传统插值, 较已有改进算法也有较大改进; 在彩色图像插值中本文算法在速度上也明显优于已有算法。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Rifman S S. Digital rectification of ERTS multispectral imagery [J]. In Proceedings of the Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1, 1973, 1(B): 1131-1142.
- [ 2 ] Hou H, Andrews H. Cubic splines for image interpolation and digital filtering [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1978, 11(6): 508-517.
- [ 3 ] Keys R G. Cubic convolution interpolation for digital image processing [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1981, ASSP-29(6): 1153-1160.
- [ 4 ] Zhao Qianjin, Hu Min, Tan Jieqing. Adaptive many-knot splines image interpolation based on local gradient features [J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(9): 1537-1542. [赵前进, 胡敏, 檀结庆. 基于局部梯度特征的自适应多结点样条图像插值 [J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(9): 1537-1542.]
- [ 5 ] Shi Jiazhen, Reichenbach S E. Image interpolation by two-dimensional parametric cubic convolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1857-1870.
- [ 6 ] Li Xin, Orchard M T. New edge-directed interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1521-1527.
- [ 7 ] Ramponi G. Warped distance for space-variant linear image interpolation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(9): 1293-1297.
- [ 8 ] Hwang J W, Lee H S. Adaptive image interpolation based on local gradient features [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(3): 359-362.
- [ 9 ] Yuan Shuai, Abe M, Taguchi A, et al. High accuracy bicubic interpolation using image local features [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2007, E90-A(8): 1611-1615.
- [ 10 ] Fattal R. Image upsampling via imposed edge statistics [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): Article 95, 8 pages, DOI = 10.1145/1239451.1239546.
- [ 11 ] Plaziac N. Image interpolation using neural networks [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(11): 1647-1651.
- [ 12 ] Nguyen M Q, Atkinson P M, Lewis H G. Superresolution mapping using a hopfield neural network with fused images [J]. IEEE Transactions on geosciences and remote sensing, 2006, 3(44): 736-749.
- [ 13 ] Gopinath R A, Burrus C S. Wavelet-based lowpass bandpass interpolation [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. San Francisco, California, USA: IEEE Computer Society, 1992: 385-388.
- [ 14 ] Wahed W El-Sayed. Image enhancement using second generation wavelet super resolution [J]. International Journal of Physical Sciences, 2007, 2(26): 149-158.
- [ 15 ] Asamwar R S, Bhurchandi K, Gandhi A S. Successive image interpolation using lifting scheme approach [J]. Journal of Computer Science, 2010, 6(9): 961-970.
- [ 16 ] Chuah ChengSoon, Leoum JinJang. An adaptive image interpolation algorithm for image/video processing [J]. Pattern Recognition, 2001, 34: 2383-2393.
- [ 17 ] Honda H, Haseyama M, Kitajima H. Fractal interpolation for natural images [C]//1999 International Conference on Image Processing. Kobe, Japan: IEEE Computer Society, 1999: 657-661.
- [ 18 ] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision. Washington D C, USA: IEEE Computer Society, 1998: 839-846.
- [ 19 ] Petschnigg G, Szeliski R, Agrawala M, et al. Digital photography with flash and no-flash image pairs [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 664-672.
- [ 20 ] Kopf J, Cohen M F, Lischinski D, et al. Joint bilateral upsampling [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 839-846.
- [ 21 ] Xiao Chunxia, Nie Yongwei, Hua Wei, et al. Fast multi-scale joint bilateral texture upsampling [J]. The Visual Computer, 2009, 26(4): 263-275.