

文章编号:1001-9081(2014)06-1735-03

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.06.1735

## 基于张量的单幅图像超分辨率算法

王 峰\*

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

(\*通信作者电子邮箱 plqwf19880902@163.com)

**摘要:** 图像的边缘细节信息直接影响图像的视觉质量。为了尽可能地保持图像边缘结构信息, 提高超分辨率图像的质量, 提出了一种基于张量的单幅图像超分辨率算法。该方法利用张量对图像局部几何特征进行描述, 然后根据采样点的局部特征估计待插值点的局部特征, 最后通过这一估计的特征计算待插值点的灰度值。实验结果表明基于张量的超分辨率方法能够较好地保持图像中的边缘结构信息, 峰值信噪比(PSNR)、结构相似性系数(SSIM)等客观评价指标和主观视觉效果都比较好。

**关键词:** 超分辨率; 张量; 图像插值; 局部结构

**中图分类号:** TP391.41    **文献标志码:** A

### Tensor-based super-resolution algorithm for single image

WANG Feng\*

(School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010)

**Abstract:** Edge details of the image directly affect the visual quality of the image. In order to maintain structure information of the image edges as much as possible, and then improve the quality of super-resolution images, a tensor-based single image super-resolution algorithm was proposed. Firstly, the local geometric characteristics of image were described by tensor, then the local characteristics of the interpolation points were estimated according to that of the sampling points. Finally, the gray values of the interpolation points were calculated by the estimated characteristics. The experimental results show that the super-resolution method based on tensor can better preserve the structure information edges in the image, and perform better in Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Structural SIMilarity (SSIM) and subjective visual effect.

**Key words:** super-resolution; tensor; image interpolation; local structure

## 0 引言

图像的超分辨率技术就是在不改变图像观测系统的前提下, 利用已有的低分辨率图像通过某种方法获得对应场景高分辨率图像的技术<sup>[1]</sup>。图像的超分辨率技术一直都处于热点研究现状<sup>[2]</sup>, 在医学影像、视频监控和传输、卫星遥感图像的生成和高清电视等领域有广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。

目前图像超分辨率方法主要可大致分为三类: 基于插值的超分辨率方法<sup>[5]</sup>、基于重建的超分辨率方法<sup>[6-7]</sup>和基于学习超分辨率方法<sup>[8-9]</sup>。传统的插值方式有最近邻点插值、双线性插值和双立方插值等<sup>[10-11]</sup>。这些方法均能实现图像的超分辨率, 但它们未能考虑到图像的边缘与纹理方向信息, 使得插值后的图像存在边缘模糊或产生锯齿等现象。基于重建的超分辨率技术<sup>[12]</sup>是利用某种局部性先验假设来实现超分辨, 能在一定程度上克服插值方法的上述缺陷。但这类方法能获得的先验知识很少, 使得重建效果改进潜力不大。基于学习的超分辨率技术是在基于重建的方法遇到困难的情况下发展起来的, 能够弥补基于重建方法的很多不足。它只需要输入单幅图像便可以通过事先建立的图像库进行超分辨还原。文献[13-20]提出了一些基于学习的超分辨率算法, 如基于高斯金字塔和拉普拉斯金字塔模型的方法<sup>[13, 18-19]</sup>、基于多尺度和多方向特征的人脸超分辨率算法<sup>[14]</sup>、基于小波变

换<sup>[15, 20]</sup>和Contourlet变换<sup>[16-17]</sup>的超分辨率复原方法等。这些基于学习的超分辨率算法对训练样本的依赖性较大, 容易造成“量化”误差, 对先验知识的学习也需要大量的训练时间。

为了减少边缘模糊和锯齿等现象, 提高超分辨率图像质量, 本文提出了一种基于张量的单幅图像超分辨率算法。该算法根据张量能够保持局部邻域结构信息的特点, 通过对像素在局部邻域内的特征进行估计, 能更好地识别边缘、角点等局部特征。算法能有效地保持原始图像的边缘信息, 提高了图像的空间分辨率。

## 1 基于张量的单幅图像的超分辨率算法

虽然图像的梯度向量也包含了局部的方向信息, 且方向可用梯度表示, 但是对于某些图像的特殊结构, 平均梯度为零。这是由于下降边缘的梯度和上升边缘的梯度符号恰好相反, 使它们之间的差异互相抵消。而局部结构的张量特征对图像数据进行适当分析和描述, 能够区分结构不同的图像区域, 张量这一良好性质使其成为图像处理中的常用工具<sup>[20-22]</sup>。

### 1.1 局部张量计算

设  $\psi \subset \mathbf{R}^2$  表示一幅二维图像数据矩阵, 该二维图像的灰度映射为  $I: \psi \rightarrow \mathbf{R}$ 。此图像中每一个像素的初始结构张量是

一个  $2 \times 2$  的对称矩阵,通过该矩阵可以求出包括边缘、方向等图像的有关信息。该初始矩阵由图像的梯度信息求出,设图像中坐标为  $(x, y)$  的像素点的梯度<sup>[22]</sup> 向量为  $\nabla I = (I_x, I_y)^T$ ,则该点的初始张量表示为:

$$G(\nabla I) = \nabla I \times \nabla I^T = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{12} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

求解结构张量的像素信息,也就是对式(1)的矩阵进行谱分解。这样可以得到两个特征值  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ (设  $\lambda_1 > \lambda_2$ ),它们分别为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{1}{2}[g_{11} + g_{22} + \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}^2}] \\ \lambda_2 = \frac{1}{2}[g_{11} + g_{22} - \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}^2}] \end{cases} \quad (2)$$

局部结构张量包括当前邻域内信号改变的方向和大小等信息,能很好地刻画图像复杂的特征。特征向量的方向和特征值的大小反映了局部区域内梯度的方向和变化的强度。对一个二维的图像,可用一个不规则的圆形来表示其几何特性,结构张量分解的两个特征向量与椭圆的两个长短轴的方向一致,两个特征值与椭圆长短轴大小的平方成反比。可以根据结构张量特征值的不同来区分图像的不同区域<sup>[23-24]</sup>。设图像结构张量的两个特征值分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,且  $\lambda_1 \geq \lambda_2$ ,则:

- 1)  $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx 0$ ,对应图像的平滑(均匀)区域;
- 2)  $\lambda_1 \gg \lambda_2 \approx 0$ ,对应图像的边缘区域;
- 3)  $\lambda_1 \approx \lambda_2 \gg 0$ ,对应图像的角点区域。

## 1.2 基于张量的插值计算

因为图像的局部结构特征也会影响采样点所占的权重,而双线性插值和双立方插值方法只是凭借待插值点与采样点之间的距离作为权重函数的变量,所以这会造成一定的误差。这就也是传统插值方法产生边缘模糊的原因。

为了在一定程度上保留图像的边界特征,本文方法不仅考虑了待插值点与采样点的距离,还考虑了采样点局部结构。它根据采样点局部结构的变化自动调整本身权重的高低,与文献[25]相比,本文方法不需要估计全部待插值点的结构张量,只需要根据采样点的局部结构信息估计出待插值点的结构信息,所以本文方法能更快速地重建图像的实际内容。

图 1 为张量计算示意图。

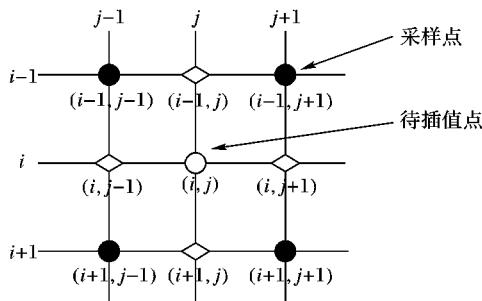


图 1 张量计算示意图

设采样点与待插值点的距离为  $d_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),采样点在局部结构中所占的权重  $w'_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),采样点的综合权重为  $w_i = w'_i/d_i$ ,灰度值为  $I_i$ ,则待插值点的灰度值为:

$$I_0 = \sum_{i=1}^4 I_i w_i / \sum_{i=1}^4 w_i \quad (3)$$

这里把待插值点分四类:第一类点是  $(i, j)$ ,它周围有四个采样点(黑色);第二类是位于点  $(i, j)$  上方与下方的点  $(i-1, j)$  和  $(i+1, j)$ ,它左右最近有两个是采样点;第三类

是位于  $(i, j)$  左边和右边点  $(i, j-1)$  和  $(i, j+1)$ ,它的上下方最近有两个采样点;第四类点是边界点,插值时只要计算出这四类待插值点的灰度值,即完成了对图像的超分辨。

### 1.3 $w'$ 的确定与插值步骤

图像中通常存在噪声,图像处理往往需要对图像先进行高斯去噪,再对得到的张量与高斯核进行卷积<sup>[2]</sup>。为了计算方便,本文假设图像的噪声为零。由线性代数可知,采样点的张量所对应的特征值至少一个为零,故把采样点分为处于平滑区域内和处于非平滑区域内。根据待插值点周围采样点的张量,计算出它们对应的特征值,并对采样点  $w'$  作如下处理。

#### Step1 第一类待插值点的处理。

若  $w'$  周围的四个采样点都处于平滑区域或都不处于平滑区域,则这四个采样点对应的权重  $w' = 1$ ;若它周围有三个点处于平滑区域,则这三个点对应的权重  $w' = 1$ ,另一点对应的权重  $w' = 0$ ;若它周围有两个点处于平滑区域,则这两个点对应的权重  $w' = 1$ ,另外两个点对应的权重  $w' = 0$ ;若只有一个点处于平滑区域,则这个点对应的权重  $w' = 0$ ,另外三个非平滑区域的点对应的权重  $w' = 1$ 。然后通过式(3)计算出第一类点的灰度值。

#### Step2 第二类和第三类待插值点的处理。

这里只考虑待插值点左右或上下两个最近的采样点是否处于平滑区域。通过 Step1 已经计算出第二类点  $(i-1, j)$ 、 $(i+1, j)$  的上下待插值点的灰度值和第三类点  $(i, j-1)$ 、 $(i, j+1)$  的左右待插值点的灰度值,但它们没有对应的结构张量,把这两点归为本步骤的采样点。为了区分这两类采样点,本文将这两点定义为已插值采样点,定义先前带有结构张量的采样点为先前采样点,这样保证了待插值点周围最近有四个采样点。

若这两个先前采样点都处于平滑区,则这两个先前采样点对应的权重  $w' = 1$ ,另外两个已插值采样点对应的权重  $w' = 0$ ;若只有一个先前采样点处于平滑区并且此点与待插值点成一条直线上最近的一个先前采样点也处于平滑区,则这个先前采样点对应的权重  $w' = 1$ ,其他采样点的权重为零,即待插值点的灰度值等于此先前采样点的灰度值,否则与另一个先前采样点的灰度值相等;若两个先前采样点都处于非平滑区域,首先计算先前采样点和已插值采样点中任意两个点差值绝对值,对于绝对值最小的两个点,它们对应的权重  $w' = 1$ ,另外两个点对应的权重  $w' = 0$ 。然后再通过式(3)的计算,得到第二类和第三类待插值点的灰度值。

#### Step3 边界上点处理。

保证边界点的灰度值与最近的非边界点的灰度值相等。



图 2 Lena 灰度图像采用不同算法得到的超分辨率结果

## 2 实验结果分析

所提超分辨率算法采用 Matlab R2012a 平台实现,处理器为 Intel Xeon 2.53 GHz,内存 4 GB。为验证所提超分辨率算法的有效性,本文采用了三种算法分别对标准图库中的 Lena(512 ×

512)图像进行了实验。为了避免过多主观因素,本文先把被测试图片大小缩小为 $256 \times 256$ ,然后利用双线性插值、双立方插值和本文算法分别对缩小后的图像进行放大并和原图像进行比较。图2显示了Lena图像的一部分,并采用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似性系数(Structural SIMilarity, SSIM)来定量分析图像放大后的效果。 $PSNR$ 定义如下:

$$PSNR = 10 \lg \left[ \frac{MN \times 255^2}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I(x, y) - I_0(x, y))^2} \right] \quad (4)$$

其中: $M$ 和 $N$ 分别指图像的长和宽, $I(x, y)$ 是指放大后的图像的灰度值, $I_0(x, y)$ 是指原图的灰度值。所得到图像的峰值信噪比越大,说明图像的效果越好。

$SSIM$ 是一种用以衡量两张数位影像相似程度的指标。当两张影像其中一张为无失真影像,另一张为失真后的影像,二者的结构相似性可以看成是失真影像的影像品质衡量指标,结构相似性在影像品质的衡量上更能符合人眼对影像品质的判断。 $SSIM$ 定义如下:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (5)$$

其中: $\mu_x$ 和 $\mu_y$ 、 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 分别为 $x$ 和 $y$ 的平均值和标准差, $\sigma_{xy}$ 为 $x$ 和 $y$ 的共变异数。 $C_1$ 和 $C_2$ 为常数。 $SSIM$ 的值在0和1之间,数值越大表示两个图像相似度越高。

由图2(a)~(b)可看出,双线性插值和双立方插值都不能很好地保持图像边缘,使得插值后的图像边缘模糊,有明显的锯齿现象,特别在眼睛周围模糊区域更加明显,影响视觉效果;图(c)除了轮廓较为清晰,而且眼睛比较锐利,图像特征更接近原始图。本文考虑了像素点的全局相关性,可以得到清晰的纹理细节,从而提高图像的视觉效果。本文算法除了在 $PSNR$ 值和 $SSIM$ 值高于双线性算法和双立方算法,在执行效率上也比这两种算法好。双线性算法、双立方算法和本文算法所需要的计算时间分别为0.4871 s、2.7612 s和1.5545 s,可看出:本文算法在时间上优于双立方算法,在图像质量上优于其他两个算法。

表1 不同算法的实验效果对比

图片	方法	PSNR/dB	SSIM
Lena	双线性插值算法	31.7734	0.9415
	双立方插值算法	32.1992	0.9336
	本文算法	34.7933	0.9706
Barbara	双线性插值算法	25.4246	0.9161
	双立方插值算法	25.1813	0.9086
	本文算法	28.5154	0.9543
Baboon	双线性插值算法	20.1996	0.8594
	双立方插值算法	21.7638	0.8676
	本文算法	25.1570	0.9307
pepper	双线性插值算法	28.2307	0.9505
	双立方插值算法	29.1151	0.9398
	本文算法	30.3080	0.9784

对彩色图像的处理是对彩色图像的RGB空间分别作上述处理,也得到了很好的超分辨效果。将Flowers图像缩小为原来的 $1/4$ ,再分别用双立方插值算法和本文算法恢复到原来大小,得到了图3所示的结果。两幅图像的峰值信噪比分别为28.1 dB和31.1 dB,本文算法的结果显然要好于双立方插值算法。从放大的局部图可看出,本文方法比双立方算法

所得结果的边缘要更加清晰、锐利。双立方插值算法耗用时间为5.084 s,而本文方法耗用时间为3.887 s,显然执行效率上本文方法也更高。

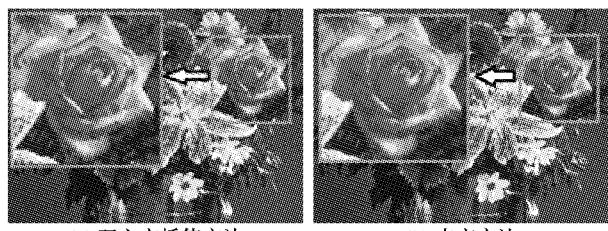


图3 Flowers 彩色图像的放大效果

### 3 结语

本文提出一种基于张量的单幅图像超分辨率算法,提高了图像的峰值信噪比,得到了更好的图像的空间分辨率、纹理信息和边缘清晰度,并且减少了图像基本信息的损失。本文算法放大倍数灵活,可以一次得到任意倍数放大的图像。实验结果表明,该算法优于传统的插值算法,可以广泛应用于遥感图像处理、高清电视、医学影像、视频监控和传输、卫星遥感图像的生成和高清电视等超分辨领域。

### 参考文献:

- [1] TAO H, LIU J, TIAN J. Super-resolution image processing algorithm based on wavelet transform and interpolation [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(8): 63–66. (陶洪久,柳健,田金文. 基于小波变换和插值的超分辨率图像处理算法[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(8): 63–65.)
- [2] VAN OUWERKERK J. Image super-resolution survey [J]. Image and Vision Computing, 2006, 24(10): 1039–1052.
- [3] ZHANG X, SHEN L. Super-resolution restoration technology development [J]. Control Technology, 2002, 21(5): 33–35. (张新明,沈兰荪. 超分辨率复原技术的发展[J]. 测控技术, 2002, 21(5): 33–35.)
- [4] FARSIU S, ROBINSON D, ELAD M, et al. Advances and challenges in super-resolution [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2004, 14(2): 47–57.
- [5] RAJAN D, CHAUDHURI S. Generalized interpolation and its application in super-resolution imaging [J]. Image and Vision Computing, 2001, 19(13): 957–969.
- [6] IRANI M, PELEG S. Super resolution from image sequences [C]// Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 1990, 2: 115–120.
- [7] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration [J]. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(3): 231–239.
- [8] FREEMAN W T, JONES T R, PASZTOR E C. Example-based super-resolution [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(2): 56–65.
- [9] FREEMAN W T, PASZTOR E C, CARMICHAEL O T. Learning low level vision [J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(1): 25–47.
- [10] CASTLEMAN K R. Digital image processing [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- [11] PARKER J A, KENYON R V, TROXEL D E. Comparison of interpolating methods for image resampling [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1983, 2(1): 31–39.
- [12] QIN F, HE X, WU W. Image super-resolution reconstruction based on sub-pixel registration and iterative back projection [C]// Proceedings of the Title International Conference 2007 on Information Computing and Automation. Chengdu: [s:n], 2007.

(下转第 1752 页)

- Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2010: 2360 – 2367.
- [9] ZHAO R, OUYANG W, WANG X G. Unsupervised salience learning for person re-identification[ C]// Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2013: 3586 – 3593.
- [10] KAI J, ARENS M. View-invariant person re-identification with an implicit shape model [ C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-based Surveillance. Piscataway: IEEE Press, 2011: 197 – 202.
- [11] EISENBACH M, KOLAROW A, SCHENK K, et al. View invariant appearance-based person reidentification using fast online feature selection and score level fusion[ C]// Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Advanced Video and Signal-based Surveillance. Piscataway: IEEE Press, 2012: 184 – 190.
- [12] KATO J, WATANABE T, JOGA S, et al. An HMM-based segmentation method for traffic monitoring movies [ J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(9): 1291 – 1296.
- [13] LEE J M, KIM S J, HWANG Y, et al. Diagnosis of mechanical fault signals using continuous hidden Markov model[ J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276(3/4/5): 1065 – 1080.
- [14] BICEGO M, CASTELLANI U, MURINO V. A hidden Markov model approach for appearance-based 3D object recognition [ J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(16): 2588 – 2599.
- [15] BISWAS S. Segmentation based compression for gray level images [ J]. Pattern Recognition, 2003, 36(7): 1501 – 1517.
- [16] ARORA S, ACHARYA J, VERMA A, et al. Multilevel thresholding for image segmentation through a fast statistical recursive algorithm[ J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(2): 119 – 125.
- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [ J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62 – 66.
- [18] BIRCHFIELD S T, RANGARAJAN S. Spatiograms versus histograms for region-based tracking[ C]// Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2005, 2: 1158 – 1163.
- [19] CONG D N T, KHOUDOUR L, ACHARD C, et al. People re-identification by means of a camera network using a graph based approach[ C]// MVA2009: IAPR Conference on Machine Vision Applications. Tokyo: MVA Conference Committee, 2009: 152 – 155.
- [20] BUCHSBAUM G. A spatial processor model for object color perception[ J]. Journal of the Franklin Institute, 1980, 310(1): 1 – 26.
- [21] YANG H H, MOODY J. Feature selection based on joint mutual information[ C]// Proceedings of the 1999 International ICSC Symposium on Advances in Intelligent Data Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 22 – 25.
- [22] BALTIERI D, VEZZANI R, CUCCHIARA R. 3DPes: 3D people dataset for surveillance and forensics[ C]// Proceedings of the 2011 Joint ACM Workshop on Human Gesture and Behavior Understanding. New York: ACM Press, 2011: 59 – 64.
- [23] SCHWARTZ W R, DAVIS L S. Learning discriminative appearance-based models using partial least squares[ C]// Proceedings of the 2009 XXII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 322 – 329.

(上接第 1737 页)

- [13] BAKER S, KANADE T. Limits on super-resolution and how to break them [ J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(9): 67 – 83.
- [14] SU C, ZHUANG Y, HUANG L, et al. Steerable pyramid based face hallucination[ J]. Pattern Recognition, 2005, 38(6): 813 – 824.
- [15] JIJI C V, JOSHI M V, CHAUDHURI S. Single-frame image super-resolution using learned wavelet coefficients[ J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2004, 14(3): 105 – 112.
- [16] JIJI C V, CHAUDHURI S. Single-frame image super-resolution through contourlet learning [ J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, 2006: 235 – 235.
- [17] NI K S, NGUYEN T Q. Image super-resolution using support vector regression [ J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(6): 596 – 610.
- [18] ZHENG L, WU W, YANG X, et al. The research of face hallucination based on multi-resolution pyramid structure [ J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(9): 1244 – 1249. ( 郑丽贤, 吴炜, 杨晓敏, 等. 基于多分辨率塔式结构的幻觉脸技术的研究 [ J]. 光电子 · 激光, 2008, 19(9): 1244 – 1249. )
- [19] WU W, YANG X M, CHEN M, et al. Novel method of face hallucination [ J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 815 – 821. ( 吴炜, 杨晓敏, 陈默, 等. 一种新颖的人脸图像超分辨率技术 [ J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 815 – 821. )
- [20] QIAO J, LIU J, YAN H, et al. Face image super-resolution reconstruction based on Log-WT [ J]. Electronics and Information Technology, 2008, 30 (6): 1276 – 1280. ( 乔建萍, 刘据, 同华, 等. 基于 Log-WT 的人脸图像超分辨率重建 [ J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1276 – 1280. )
- [21] CASTANO - MORAGA C A , RODRIGUEZ - FLORIDO M A , ALVREZ L, et al. Anisotropic interpolation of DT-MRI[ C]// MICCAI 2004: Proceedings of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 343 – 350.
- [22] YANG Z, LU F, LI Y. Image gradient and divergence calculation and their application in the edge extraction [ J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2002, 41(6): 6 – 9. ( 杨朝霞, 遂峰, 李岳生. 图像梯度与散度计算及在边缘提取中的应用 [ J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41(6): 6 – 9 )
- [23] WABG Y, LU B, MIAO C. Image fusion based on nonlinear structure tensor[ C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Multimedia Technology. Piscataway: IEEE Press, 2011: 6390 – 6393.
- [24] GAO H. Based on structure tensor nuclear regression non-uniform interpolation algorithm and its application in image processing [ D]. Nanjing: Nanjing University, 2009. ( 高红. 基于结构张量的核回归非均匀插值算法及其在图像处理中的应用 [ D]. 南京: 南京大学, 2009. )
- [25] LU Z, HU G. Image interpolation method based on structure tensor [ J]. Journal of Computer Applications, 2006, 26 (7): 1570 – 1576. ( 鲁志波, 胡国恩. 基于结构张量的图像插值方法 [ J]. 计算机应用, 2006, 26(7): 1570 – 1576. )