

基于小波分析和多项式细分定位的超分辨率图像重建算法

贺清碧¹ 黄大荣¹ 杨永琴²

(重庆交通大学信息科学与工程学院 重庆 400074)¹ (重庆交通大学数学与统计学院 重庆 400074)²

摘要 图像超分辨率重建是图像增强和图像复原研究中的一重要课题,广泛应用于高清晰电视、医学成像和遥感成像等领域。在小波分析边缘检测的基础上,通过多项式细分算法定位亚像素边缘,将图像分为平滑区域、边缘区域和微细边缘区域。根据不同的区域特性,采用不同的插值方式进行超分辨率图像重建。仿真结果显示所提算法重建的高分辨率图像边界部分清晰自然,其主观判断和客观评价结果明显好于传统重建算法,从而验证了本算法的可行性和有效性。

关键词 小波分析,多项式细分,亚像素,超分辨率重建

中图法分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.3.059

Super-resolution Reconstruction Method Based on Wavelet Analysis and Polynomial Subdivision Location

HE Qing-bi¹ HUANG Da-rong¹ YANG Yong-qin²

(College of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)¹

(College of Mathematics and Statistics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)²

Abstract Image super-resolution reconstruction is an important task in the study of image enhancement and image restoration. It is widely used in the fields of high definition television, medical imaging and remote sensing imaging, etc. In this paper, the wavelet analysis was adopted to detect the pixel edges, and the polynomial subdivision algorithm was used to locate the sub-pixel edges. Therefore, the original image was divided into three parts, namely smoothing region, neighborhood edge region and minuteness edge region. According to different regional characteristics, the different interpolation methods were carried out to realize the image super-resolution reconstruction. The simulation results show that the boundary of reconstructed high resolution image is clear and natural, and the subjective judgment and objective evaluation are better than traditional reconstruction algorithm. The method in this paper achieves good effects and reaches good feasibility and validity.

Keywords Wavelet analysis, Polynomial subdivision, Sub-pixel, Super-resolution reconstruction

1 引言

图像超分辨率重建是指在不改变图像探测系统的前提下,通过采用某种方法,从一幅或者多幅低分辨率图像中重建出一幅较高分辨率的图像,以便人们可以更好地感知高分辨率图像的细节以及详细的分析判断^[1]。在提高图像分辨率上,人们常用的方法之一也是超分辨率重建,也即用图像处理技术来提高图像的空间分辨率^[2]。高分辨率图像具有广阔的应用前景,已经被广泛应用于高清晰电视、图像增强、视频监控、军事和遥感成像^[3]、医学图像处理^[4]等领域。

在图像超分辨率重建算法中线性插值技术主要有最邻近插值^[5]、双线性插值^[6]和双三次插值^[7-10]等,这些线性插值方法在提高图像质量的同时也呈现出了不同程度的缺陷,比如最邻近插值会使图像产生块状和锯齿,而双线性插值和双三次插值则会使图像边缘变得模糊。所以,研究者们引入了许多非线性的插值方法以克服线性插值带来的缺陷,典型的有

局部适应插值方法^[11,12]、Bayesian 估计^[13]等。当然,要提高图像质量,不能简单采用多种算法,还需同时综合采用锐化、降噪、空间滤波等技术。

近年来发展迅速的小波理论以其多分辨率分析能力在图像处理方面受到很大关注,出现了许多基于小波变换的超分辨率图像重建的新方法^[14]。

2 小波超分辨率图像重建思路

一般情况下,小波超分辨率重建算法^[10]流程如图 1 所示。其主要思想是:(1)对原始的低分辨率图像采取小波变换,得到 3 个方向上的高频分量;(2)在高频分量部分进行插值,从而增加细节信息;(3)将插值后的信息结合原图像又共同进行小波逆变换。通过以上 3 步最后得到高分辨率的图像。由于这种方法以原始图像直接作为低频部分来进行重建,因此容易出现重建图像高低频系数不均衡的现象,从而使得到的高分辨率图像出现灰度偏移,影响重建图像的质量。

到稿日期:2015-05-25 返修日期:2015-08-06 本文受国家自然科学基金项目(61004118),重庆市高等学校优秀人才技术计划项目(2014-18),重庆市教委自然科学基金项目(KJ120422)资助。

贺清碧(1970-),女,硕士,讲师,主要研究方向为图像处理,E-mail: cqjdhqb@163.com; 黄大荣(1978-),男,博士,教授,主要研究方向为图像处理; 杨永琴(1965-),女,博士,教授,主要研究方向为泛函和图像处理。

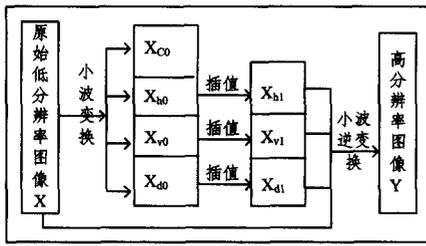


图1 常规小波超分辨率重建算法流程

本文的设想是在小波分析和多项式细分定位的基础上，通过频率域和空间域结合的方式来实现超分辨率重建，如图2所示。具体思路是：在小波分析和多项式细分定位的基础上，首先利用小波模板大值方法检测低分辨率图像的边缘，根据检测出的边缘将像素分成3个区域——平滑区域、边缘区域和微细边缘区域，根据区域特性，采用不同的插值算法。在平滑区域因为像素间相关性强、灰度值变换缓慢且与距离近似成线性关系，所以在该区域采取双线性插值方法的结果较精确；在边缘区域继续采用多项式细分算法取得亚像素边缘点坐标及灰度值，通过映射定位到超分辨率图像对应位置，对原始低分辨率图像进行双线性插值，并对双线性插值后图像的亚像素边缘区域进行自适应插值替换，进一步获得边缘清晰的超分辨率重建图像；在微细边缘部分，先进行边缘区域自适应插值，然后将亚像素边缘坐标映射取整，最后用亚像素边缘的灰度值直接插入替换对应位置的灰度值以增强图像细节分辨率。本文最后通过仿真实验及客观指标说明了本文设想的思路方法在提高图像超分辨率重建质量方面是可行的。

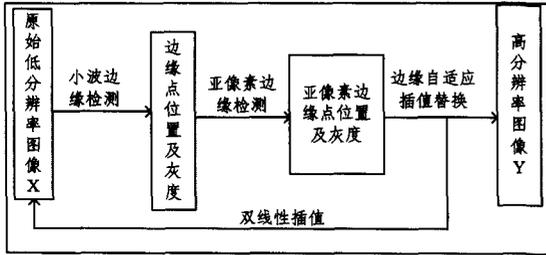


图2 小波与亚像素插值超分辨率重建算法流程

3 边缘检测原理及亚像素边缘定位

3.1 小波边缘检测原理

通过小波分析多尺度边缘检测得到的边缘具有多分辨特性，提高了像素之间的相关性，真实反映了图像的特征。小波分析多尺度边缘检测原理如下：设 $\phi(x, y)$ 为二维平滑函数，定义两个小波基函数 $\phi^1(x, y)$ 和 $\phi^2(x, y)$ 如下：

$$\phi^1(x, y) = \partial\phi(x, y)/\partial x \quad (1)$$

$$\phi^2(x, y) = \partial\phi(x, y)/\partial y \quad (2)$$

设：

$$\phi_\lambda^1(x, y) = \frac{1}{\lambda^2} \phi^1\left(\frac{x}{\lambda}, \frac{y}{\lambda}\right) = \frac{\partial\phi_\lambda(x, y)}{\partial x} \quad (3)$$

$$\phi_\lambda^2(x, y) = \frac{1}{\lambda^2} \phi^2\left(\frac{x}{\lambda}, \frac{y}{\lambda}\right) = \frac{\partial\phi_\lambda(x, y)}{\partial y} \quad (4)$$

其中， λ 为尺度参数，相应地 $\forall g(x, y) \in L^2(R^2)$ ，图像 $g(x, y)$ 的小波变换在 x 和 y 方向上的分量是：

$$\tau_\lambda^1(x, y) = g * \phi_\lambda^1(x, y) \quad (5)$$

$$\tau_\lambda^2(x, y) = g * \phi_\lambda^2(x, y) \quad (6)$$

$\tau_\lambda(x, y)$ 的模：

$$|\tau_\lambda(x, y)| = \sqrt{|\tau_\lambda^1(x, y)|^2 + |\tau_\lambda^2(x, y)|^2} \quad (7)$$

$\tau_\lambda(x, y)$ 的幅角（即在尺度 λ 下的梯度方向）：

$$\theta_\lambda(x, y) = \text{Arg}[\tau_\lambda(x, y)] = \arctan\left[\frac{\tau_\lambda^2(x, y)}{\tau_\lambda^1(x, y)}\right] \quad (8)$$

式(7)中模 $|\tau_\lambda(x, y)|$ 取极大值的点就是图像 $g(x, y)$ 的边缘点，其方向垂直于幅角 $\theta_\lambda(x, y)$ 。

3.2 多项式插值细分算法原理

多项式插值细分算法^[11]原理如下。

设原始灰度图像为 $g(x, y)$ ，则相应的梯度图像 $K(x, y)$ 为：

$$K(x, y) = |g(x-1, y-1) - g(x+1, y+1)| + |g(x-1, y+1) - g(x+1, y-1)| \quad (9)$$

$$K(x, y) = |g(x+1, y+1) + 2g(x, y+1) + g(x-1, y+1) - g(x-1, y-1) - 2g(x, y-1) - g(x+1, y-1)| + |g(x-1, y-1) + 2g(x-1, y) + g(x-1, y+1) - g(x+1, y+1) - 2g(x+1, y) - g(x+1, y-1)| \quad (10)$$

对边缘点 (i, j) ，梯度图像在 x 和 y 方向上取相邻3点进行多项式插值，即可求得该边缘点的亚像素边缘坐标 (x_i, y_i) ：

$$\begin{cases} x_i = i + \frac{K(i-1, j) - K(i+1, j)}{2[K(i-1, j) - 2K(i, j) + K(i+1, j)]} \\ y_i = j + \frac{K(i, j-1) - K(i, j+1)}{2[K(i, j-1) - 2K(i, j) + K(i, j+1)]} \end{cases} \quad (11)$$

$$K(i, j) > \max\{K(i-1, j), K(i+1, j), K(i, j-1), K(i, j+1)\} \quad (12)$$

对于多项式插值细分算法，一方面，由于未考虑到像素点灰度梯度的方向性，计算出的梯度图像缺少方向信息，亚像素边缘坐标存在较大误差；另一方面，式(12)成立的概率较小，所以单纯采用多项式插值细分算法难以获得较高的边缘定位精度。针对上述问题，根据小波的模值特性，在小波边缘算子的基础上利用在边缘点的灰度梯度方向上的多项式插值细分算法实现基于小波的亚像素边缘定位。

3.3 亚像素边缘定位

1) 小波边缘检测算法流程图

某尺度下小波边缘检测算法的流程图如图3所示。

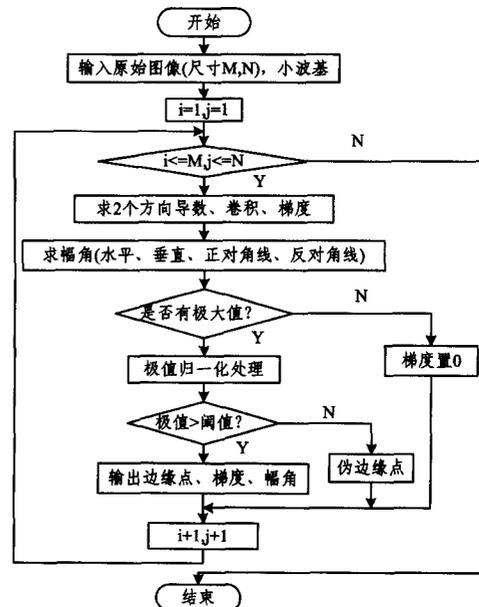


图3 小波边缘检测算法流程图

2) 亚像素边缘定位

设相邻像素点到边缘点 (x_i, y_j) 的距离为 d , 梯度方向上 (x_i, y_j) 点及其相邻像素点的幅值为 $K(i, j), K(i-d, j), K(i+d, j)$, 梯度方向与 x 轴正向夹角为 θ , 通过插值可求得图像边缘点的亚像素点坐标^[15]:

$$\begin{cases} x_i' = x_i + \frac{K(i-d, j) - K(i+d, j)}{K(i-d, j) - 2K(i, j) + K(i+d, j)} \cdot \frac{d}{2} \cos\theta \\ y_j' = y_j + \frac{K(i, j-d) - K(i, j+d)}{K(i, j-d) - 2K(i, j) + K(i, j+d)} \cdot \frac{d}{2} \sin\theta \end{cases} \quad (13)$$

亚像素边缘定位步骤: 求亚像素边缘点 x 坐标的步骤如图4所示; 参照 x 坐标的求法, 可求得亚像素边缘点的 y 坐标。

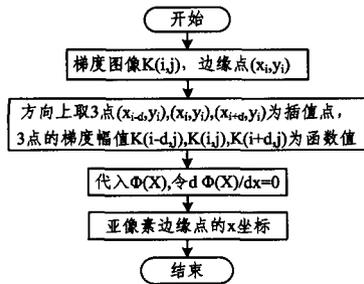


图4 求亚像素边缘点 x 坐标的步骤

4 超分辨率图像插值重建设计

在超分辨率图像重建过程中, 根据图像边缘定位的情况, 将像素分成3个区域: 平滑区域、边缘区域和微细边缘区域, 并根据这3个区域的特性, 采用不同的插值算法。

(1) 平滑区域双线性插值

在图像的平滑区域, 由于像素之间相关性较强、灰度值变换缓慢且与距离近似呈线性关系, 因此在该区域采取双线性插值方法获得的结果较精确。双线性插值法就是将新图像中的像素映射到原图像水平和垂直方向最邻近4个点的像素, 将它们的灰度值加权求和后得到插入点的灰度值。

设插值点坐标为 (i, j) , 其插值前的灰度值为 $f(i, j)$, (i, j) 坐标反向变换后得到的浮点坐标为 $(i+u, j+v)$, 其中 i, j 为非负整数, u, v 为 $[0, 1]$ 间的浮点数, 则插入点 (i, j) 的灰度值 $f(i+u, j+v)$ 为:

$$f(i+u, j+v) = (1-u)(1-v)f(i, j) + (1-u)vf(i, j+1) + u(1-v)f(i+1, j) + uvf(i+1, j+1) \quad (14)$$

式(14)表明, 插入点 (i, j) 的灰度值 $f(i+u, j+v)$ 是由周围4个点 $(i, j), (i+1, j), (i, j+1), (i+1, j+1)$ 的灰度值进行加权计算得到的, 权值与其到插入点的距离有关。

(2) 边缘区域自适应插值

由于图像边缘灰度值变化剧烈且像素之间的相关性较弱, 加上人眼对这部分又特别敏感, 图像边缘部分的分辨率对整个图像的重建就显得非常重要, 在边缘部分插值时既要考虑到边缘点灰度值的影响, 又要考虑到邻点间灰度值变化率的影响, 所以针对图像这部分像素级边缘点附近区域, 采取自适应插值方式会得到较好的效果^[10]。

设 f_e 为边缘区域某点灰度值, f_1 为双线性插值计算的

灰度值, f_2 为边缘点插值的灰度值, 则有:

$$f_e = (1-\lambda)f_1 + \lambda f_2, k=0, 1 \quad (15)$$

由式(15)可知, λ 分别取0和1时, 上式相应为双线性插值和边缘点插值。

在考虑 λ 的取值时, 考虑到图像重建质量和插值精度, 自适应地调整 λ 值来进行插值运算, 调整的依据是边缘点的直接邻点与间接邻点的灰度差是否大于一个给定的阈值, 以此来判断边缘区域中该映射点周围是属于高频区域还是低频区域, 即

$$\lambda = \begin{cases} 0.8, & 0 \leq f(i) - f(i-1) < 1 \\ 0.65, & 1 \leq f(i) - f(i-1) < 1.5 \\ 0.5, & 1.5 \leq f(i) - f(i-1) < \infty \end{cases} \quad (16)$$

(3) 微细边缘直接插值

在微细边缘部分, 先进行边缘区域自适应插值, 然后针对原图像计算出亚像素边缘坐标(即浮点坐标), 再进行映射取整, 最后用亚像素边缘的灰度值直接插入, 替换对应位置的灰度值, 从而可以增强图像细节分辨率。

5 实验结果与分析

本文在 Matlab 7.0 的实验平台上, 采用了3幅 256×256 的灰度标准的图像(cameraman、clock和lena)进行图像重建。其中, 在获取原始低分辨率图像时, 采用了与精确图像比较吻合的四邻域求平均方法, 重建插值倍数为2。对获取的低分辨率图像分别采用最邻近插值、双线性插值和本文的算法进行了对比图像重建, 结果如图5所示(以lena图为样例)。



图5 不同插值重建结果对比图

从图5的重建结果可以看出: 图5(b)的最邻近插值图像较暗, 若仔细观察会发现锯齿现象; 图5(c)的双线性插值图像又比较模糊; 采用本文方法获得的图5(d)在边缘和纹理方面处理得比较平滑和清晰, 更好地保持了原始图像的特征, 图像相对更自然, 在主观视觉上效果更好。

在客观上, 为了说明采用本文方法重建图像的质量, 下面从图像质量评价的2个指标(峰值信噪比 PSNR 和相似性度量 SM)来对重建后的图像进行定量的分析, 如表1和表2所列, 其中峰值信噪比 PSNR 和相似性度量 SM 分别由下面2个公式来计算:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\{\max[\max(f(i, j)), \max(f'(i, j))]\}^2}{\frac{1}{M \times N} \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - f'(i, j)]^2} \right\} \quad (17)$$

$$SM = 2 \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) f'(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j)^2 + f'(i, j)^2]} \quad (18)$$

其中, $f(i, j)$ 和 $f'(i, j)$ 分别表示重建前后的图像。

表 1 各种插值算法的 PSNR 比较

图像	cameraman	clock	lena
最邻近插值	66.4276	63.0443	68.2297
双线性插值	68.3504	64.3387	68.7987
本文算法	81.4296	81.8583	87.3791

表 2 各种插值算法的 SM 比较

图像	cameraman	clock	lena
最邻近插值	0.9808	0.9819	0.9780
双线性插值	0.9816	0.9827	0.9791
本文算法	0.9913	0.9939	0.9921

从表 1 和表 2 可看出,采用本文方法重建的 3 幅图像在峰值信噪比 PSNR 上分别提高了很多。以 lena 为例,本算法在 PSNR 上与最邻近插值相比提高了 19.1494db,与双线性插值相比提高了 18.5804db;本算法在相似性度量 SM 上也有不同程度的提高,其值更接近 1,说明本文算法的效果较好。

算法结果对比分析:传统的插值算法(最邻近插值和双线性插值)由于实质上都是采用多点加权的方法,因此在图像重建时,基本上都是通过平滑运算原始图像得到超分辨率图像中的像素。这种重建思路导致目标图像中的高频分量部分(及边缘)丢失较多,重建出的图像边缘区域由此变得比较模糊。而本文算法将边缘特征区域与平滑区域分别进行处理,根据区域特性采用不同的插值方法,这样做的结果是在映射插值过程中相对保持了亚像素边缘的灰度值完整性,尽可能地保留和重建了原始图像的边缘区域,从而使重建后的高分辨率图像在视觉效果上比较明亮清晰。

结束语 本文主要研究了一种基于小波分析和多项式细分定位的超分辨率图像重建算法。在图像重建中,为了获得图像更多的细节信息,一方面利用了小波模极大值方法在边缘检测方面的优势,另一方面,结合了亚像素细分技术来定位图像的亚像素边缘,并将其映射插值到超分辨率图像对应位置。仿真实验结果显示,使用本文算法对低分辨率图像进行重建时,重建出的图像边界部分清晰自然,在图像的主观判断和客观评价这两方面都明显好于传统重建方法。当然,由于图像边缘提取的计算复杂度较高,如何更好地优化实现图像快速重建还涉及很多问题,有待进一步的研究。

参 考 文 献

[1] LuZ W, Wu CD, Chen D Y, et al. Overview on image super resolution reconstruction[C]//2014 26th Chinese Control and Decision Conference(CCDC). 2014;2009-2014

[2] Jiang Jing, Zhang Xue-song. Overview of image super resolution reconstruction algorithm [J]. Infrared Technology, 2012, 34(1): 24-29(in Chinese)
江静,张雪松. 图像超分辨率重建算法综述[J]. 红外技术, 2012, 34(1):24-29

[3] Marwa M, Hala E, Ashraf H, et al. Satellite super resolution image reconstruction based on parallel support vector regression [J]. Communications in Computer and Information Science, 2014(488):223-235

[4] Zhang D, He J Z, Zhao Y, et al. MR image super-resolution reconstruction using sparse representation, nonlocal similarity and sparse derivative prior[J]. Computers in Biology and Medicine, 2015(58):130-145

[5] Su Heng, Zhou Jie, Zhang Zhi-hao. Survey of super-resolution image reconstruction method[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8):1202-1213(in Chinese)
苏衡,周杰,张志浩. 超分辨率图像重建方法综述 [J]. 自动化学报, 2013, 39(8):1202-1213

[6] Li X, Zhu X C. Image super-resolution based on sparse representation and nonlocal regularization[J]. Journal of Computational Information Systems, 2014, 10:2107-2116

[7] Sun Yan-yue, He Xiao-hai, Chen Wei-long. Image Super-resolution Reconstruction of Wavelet Local-adaptation Interpolation [J]. Computer Engineering, 2010, 36(13):183-185(in Chinese)
孙琰玥,何小海,陈为龙. 小波局部适应插值的图像超分辨率重建[J]. 计算机工程, 2010, 36(13):183-185

[8] Jia Jie, Zhang Xin. Bayesian denoising of visual images in the wavelet domain[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2003, 8(3):21-23(in Chinese)
贾杰,张新. 小波域中视频图像的 Bayesian 消噪[J]. 西安邮电学院学报, 2003, 8(3):21-23

[9] Temizel A, Machos T. Wavelet Domain Image Resolution Enhancement[J]. IEEE Trans. on Vision, Image and Signal Processing, 2006, 153(1):25-30

[10] Zhang Guo-feng. Super resolution reconstruction of remote sensing image based on Wavelet[J]. Wireless Internet Technology, 2013(9):125(in Chinese)
张国锋. 基于小波的遥感图像超分辨率重建[J]. 无线互联科技, 2013(9):125

[11] Xu Chun-lei, Yin Yu-long, Li Xiao-juan. Two time polynomial interpolation based on directional wavelet transform for image sub-pixel edge location [J]. Network Security Technology and Application, 2014(5):105-106(in Chinese)
许春雷,殷玉龙,李小娟. 基于方向可调小波变换的二次多项式插值图像亚像素边缘定位[J]. 网络安全技术与应用, 2014(5):105-106

[12] Ma Min, Zhao Liang, Wang Hua-xiang. Application research on adaptive interpolation algorithm in image restoration [J]. Acta Metrologica Sinica Measurement, 2014, 35(4):331-334(in Chinese)
马敏,赵亮,王化祥. 自适应插值算法在图像修复中的应用研究 [J]. 计量学报, 2014, 35(4):331-334

[13] Wang Chun-zhe, Li jie. Image quality evaluation based on edge information [J]. Journal of Changchun University, 2014(10):1330-1333(in Chinese)
王春哲,李杰. 基于边缘信息的图像质量评价研究[J]. 长春大学学报, 2014(10):1330-1333

[14] Mi Zeng-zhen. Image quality evaluation method based on CSF frequency and direction in wavelet domain [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7):1273-1276(in Chinese)
米曾真. 小波域中 CSF 频率与方向加权的图像质量评价方法 [J]. 电子学报, 2014, 42(7):1273-1276

[15] Li Qing-li, Zhang Shao-jun, et al. A Improved Subpixed Edge Detecting Algorithm Based on Polynomial Interpolation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(3):280-283(in Chinese)
李庆利,张少军,等. 一种基于多项式插值改进的亚像素细分算法[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(3):280-283