

文章编号:1671-6833(2014)05-0015-04

# 基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建

毛晓波, 张志超

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对已有的单幅图像超分辨率重建算法大都无法同时兼顾重建质量和运算速度的问题, 提出了基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建算法. 首先用二维经验模态分解法将一幅低分辨率图像分解为不同复杂程度的图层; 然后对包含高频细节信息的第一个图层用改进核岭回归法重建, 以保证重建质量; 对包含较少信息的后几个图层用双三次插值法重建, 以提高重建速度; 最后用二维经验模态分解逆变换将重建后的各层图像合成一幅完整的高分辨率图像. 实验结果表明该算法充分结合了三者的优势, 在保证重建图像质量的同时, 提高了算法的运算速度.

**关键词:** 超分辨率重建; 二维经验模态分解; 改进核岭回归; 双三次插值

**中图分类号:** TP311 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.004

## 0 引言

图像超分辨率重建是指用信号处理和图像处理的方法, 通过软件算法的方式将已有的低分辨率图像转换成高分辨率图像的技术<sup>[1]</sup>. 它在视频监控、图像打印、刑侦分析、医学图像处理、卫星成像等领域有较广泛的应用<sup>[2]</sup>, 因而具有很高的研究应用价值. 输入与输出均为单幅图像的超分辨率重建称为单幅图像超分辨率重建. 根据是否依赖训练样本, 超分辨率重建分为图像增强的超分辨率重建(无训练样本)与基于学习的超分辨率重建(有训练样本)<sup>[1]</sup>. 图像增强的超分辨率重建, 只对图像的显示效果进行增强, 可将其归为图像插值<sup>[1]</sup>. 此类方法的计算复杂度低, 未从本质上提高分辨率, 适用于对重建图像质量要求不高但速度要求较高的场合. 基于学习的单幅图像超分辨率重建是近年来研究的一个热点<sup>[3]</sup>. 如 Chang 等提出基于流形学习的方法<sup>[4]</sup>, Freeman 等提出用马尔科夫网络的方法<sup>[5]</sup>, Kim 等提出改进核岭回归方法<sup>[6]</sup>. 这类算法重建图像质量高, 但通常算法复杂度高、速度较慢, 且需要大量的训练数据, 不适用于实时性要求较高的场合.

针对这一问题, 笔者提出一种基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建算法, 该算法

将图像插值的超分辨率算法与基于学习的超分辨率算法相结合, 充分利用二维经验模态分解能分层提取图像信息的特点, 改进核岭回归法对图像高频细节信息的高质重建优势及双三次插值运算速度快的优势. 首先用二维经验模态分解法将一幅低分辨率图像分解为不同复杂程度的图层; 然后对包含图像高频细节信息的第一层用改进核岭回归法进行超分辨率重建, 以保证重建质量, 对包含趋势信息和亮度信息的其它层用双三次插值法进行超分辨率重建, 以提高运算速度; 最后将各层重建图像合成一幅完整的高分辨率重建图像.

## 1 原理及方法

### 1.1 二维经验模态分解

二维经验模态分解(Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD)能将图像逐步分解为一系列具有不同频率的 IMF 分量和残余项  $R$ , 先提取出的 IMF 分量包含主要的高频细节信息, 最后的残余项  $R$  包含了图像的大致走向和亮度信息. 对于一幅大小为  $M \times N$  的图像  $f(x, y)$ , 二维 EMD 实现过程如下<sup>[7]</sup>:

(1) 对所给图像曲面求取所有局部极大值和极小值;

(2) 对极大值点和极小值点分别用径向基函

收稿日期:2014-05-16; 修订日期:2014-07-21

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114101110005);河南省重大科技攻关计划资助项目(102101210100);河南省教育厅科学技术研究重点项目资助项目(14A410001)

作者简介:毛晓波(1965-),男,河南开封人,郑州大学教授,博士,研究方向:仿生机器视觉、智能仪器仪表,E-mail:mail-mxb@zzu.edu.cn.

数法进行曲面拟合,得到极大值点包络曲面和极小值点包络曲面,将两曲面数据求平均得到均值包络曲面数据;

(3)用原曲面减去均值包络曲面;

(4)判断是否满足终止条件,即每个 IMF 满足(1)信号极值点与过零点数量必须相等,或最多相差一个,(2)在任一时间点上,由信号极大值定义的上包络和极小值定义的下包络局部均值为零.

重复(1)~(3),直到满足给定的终止条件,得到第 1 层二维固有模态函数 IMF1,用原图像减去第 1 层模态函数得到第 1 层残差  $R$ . 对残差重复(1)~(4),依次得到图像的  $N$  层固有模态函数和第  $N$  层残差, $N$  取 4.

1.2 改进的核岭回归方法

Kim 等将高频细节重建看成回归问题,提出一种基于学习的单幅图像超分辨率重建算法,将核匹配追踪和梯度下降相结合,对核岭回归法的正则化代价函数进行优化,同时采用自然图像先验模型进行边缘清晰化处理<sup>[6]</sup>.

首先对高分辨率图像进行模糊和下采样得到低分辨率图像,然后分别对高、低分辨率图像采样得到图像块对,组成训练图像对集. 对于给定的训练数据点集  $\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\} \subset \mathbb{R}^M \times \mathbb{R}^N$ , 对每一个回归量的独立凸代价函数求和并分别最小化:

$$o(\{f^1, \dots, f^N\}) = \sum_{i=1, \dots, N} (\frac{1}{2} \sum_{j=1, \dots, l} (f^i(x_j) - y_j^i)^2 + \frac{1}{2} \lambda \|f^i\|_H^2).$$

(1)

式中: $y_j = [y_j^1, \dots, y_j^N]^T$ ;  $H$  为再生核希尔伯特空间. 正则化代价函数的最小值可表示为

$$f^i(\cdot) = \sum_{j=1, \dots, l} a_j^i k(x_j, \cdot).$$

(2)

式中: $i = 1, \dots, N$ ;  $k$  为希尔伯特空间  $H$  的再生核. 将式(2)代入式(1)可得

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Y}.$$

(3)

式中: $\mathbf{Y} = [y_1^T, \dots, y_l^T]^T$ ;  $\mathbf{A}$  的第  $i$  列是第  $i$  次回归的系数向量  $\mathbf{a}^i = [a_1^i, \dots, a_l^i]^T$ <sup>[6]</sup>. 由上式知,核岭回归的训练和测试时间复杂度很高,分别为  $o(l^3)$  和  $o(M \times l)$ . 采用 Tappen 提出的自然图像先验模型框架解决重建图像主边缘有振铃伪影的问题.

改进核岭回归法是基于学习的单幅图像超分辨率重建算法中的典型算法,其对高频细节丰富的图像重建质量较高,但时间复杂度高,运算量大.

1.3 基于二维 EMD 的单幅图像超分辨率重建

改进的核岭回归法对高频细节丰富的图像重建效果很好,但其耗时较长. 而双三次插值法运算简单,对包含低频信息的图像重建质量较好<sup>[8]</sup>. 结合二者的优势,笔者提出了基于二维 EMD 的单幅图像超分辨率重建算法.

先对高分辨率图像 Butterfly 进行高斯模糊和 4 倍下采样,得到一幅低分辨率图像,如图 1 所示. 用二维 EMD 分解此 LR 图像,得到 IMF1、IMF2、IMF3 和残余项  $R$ ,为了便于观察,只给出其中的细节图,如图 2(a)~(d)所示,IMF1 包含了主要的高频细节信息. 对包含高频细节信息的 IMF1,采用改进核岭回归的方法重建,重建放大 4 倍,如图 2(e)所示. 对 IMF2、IMF3 和残余项  $R$  用双三次插值法重建,重建放大 4 倍,如图 2(f)~(h)所示. 可看出,由改进核岭回归法重建的重建 IMF1 效果很好.

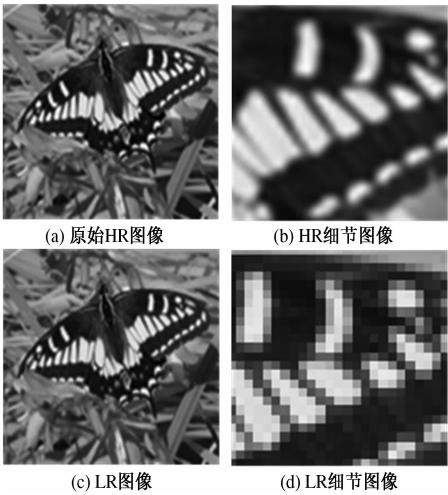


图 1 HR 与 LR 图像  
Fig. 1 HR and LR image

2 实验结果与分析

笔者算法对图像中包含高频细节信息的部分用改进核岭回归法重建,可以保证重建图像质量;在包含较少信息的部分用运算简单的双三次插值方法,可以减少运算时间,提高算法的效率. 相比于改进核岭回归法对整个图像进行重建,笔者算法运算量小且速度快,更具优势.

为了进一步验证本文算法的有效性,将本文算法和改进核岭回归法、双三次插值法的重建效果进行对比. 选 peppers、fabric、butterfly 和 lotus 四幅图像进行实验,重建效果如图 3 所示. 由于图像的峰值信噪比 PSNR、视觉效果及运算速度是衡

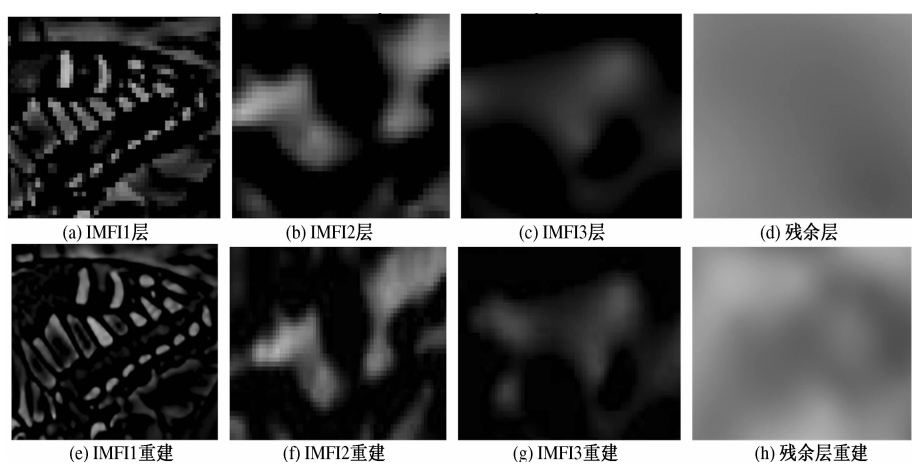


图 2 LR 图像的二维 EMD 分解及其重建图像

Fig. 2 BEMD of the LR image and the reconstructed image

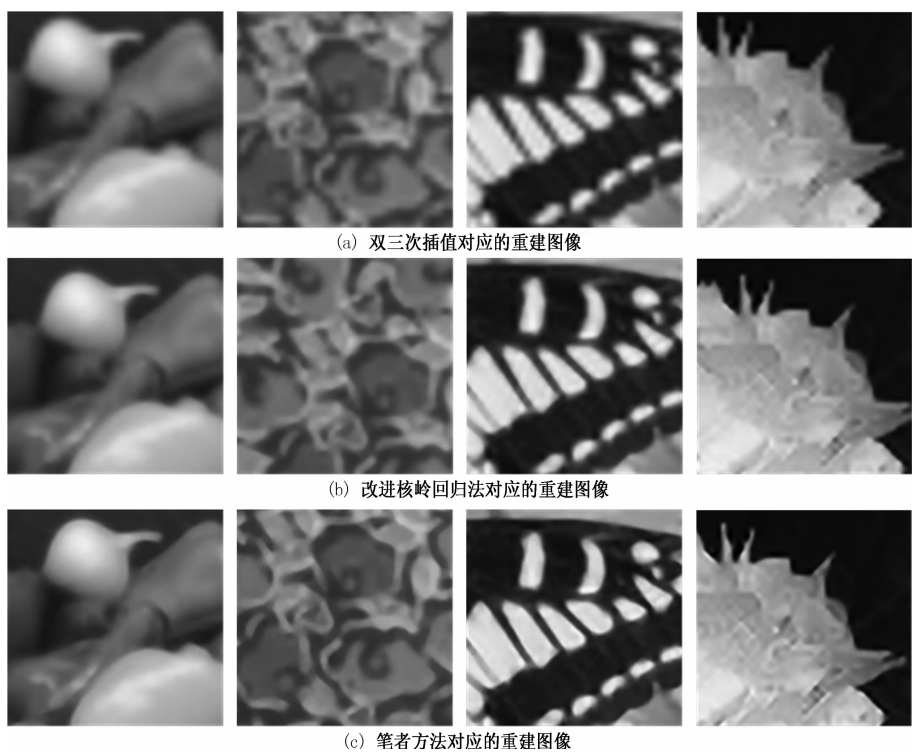


图 3 三种算法的重建效果比较

Fig. 3 The simulation results of the three algorithms

量重建图像质量的常用标准<sup>[8]</sup>,笔者给出了三种说明本文算法的有效性,如表 1 所示. 算法的峰值信噪比 PSNR 及各自的耗时,以客观

表 1 3 种算法的重建性能指标比较

Tab. 1 The reconstruction performance comparison of the three algorithms

		peppers	fabric	butterfly	lotus
PSNR/dB	双三次插值方法	28.897 9	21.577 1	22.312 4	24.942 3
	改进核岭回归法	29.126 8	21.878 0	23.328 1	26.342 1
	笔者方法	29.254 7	22.074 1	24.024 8	27.068 9
耗时/s	双三次插值法	0.348 5	0.359 6	0.359 1	0.358 4
	改进核岭回归法	44.730 3	213.984 8	166.485 4	137.480 4
	笔者方法	27.193 3	105.899 4	100.545 4	84.819 5

由图 3 可以看出,双三次插值方法重建出的图像边缘呈锯齿状,重建效果较差;笔者算法和改进核岭回归法重建出的图像边缘清晰,说明本文算法有较好的视觉效果.由表 1 的 PSNR 这一指标看出,双三次插值方法的 PSNR 最小,改进核岭回归法的 PSNR 居中,笔者方法的 PSNR 最大,一般认为峰值信噪比越大,图像质量越好<sup>[8]</sup>,因而笔者算法在 PSNR 这一指标上优于其它两种方法.由表 1 中的耗时指标可以看出,双三次插值法耗时最少,本文算法居中,核岭回归法耗时最长,表明笔者算法在运算速度上优于核岭回归法.

综合上述三项指标看出,双三次插值法运算速度快,但重建质量较差;改进的核岭回归法重建质量较高,但运算速度慢;笔者算法的重建质量显著高于双三次插值法,与改进的核岭回归法相当,且在运算速度上显著优于改进的核岭回归法.

3 结论

将二维经验模态分解法能分层提取图像高频细节信息的特点,改进核岭回归法对图像高频细节信息的高质重建的优势和双三次插值运算简单的特点结合起来,提出基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建算法.实验结果和衡量指标表明,笔者算法不仅有着较好的视觉效果,且有效地提高了峰值性噪比和运算速度,是一种实时

有效的图像超分辨率重建方法.

参考文献:

[1] 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.

[2] 吴炜,杨晓敏,余艳梅,等.核偏最小二乘算法的图像超分辨率算法[J].电子科技大学学报,2011,40(1):105-110.

[3] 陈杰,朱秀昌.一种基于彩色化的单幅彩色图像超分辨率重建[J].南京邮电大学学报:自然科学版,2013,33(4).

[4] CHANG Hong, YEUNG Dit-yan, XIONG Yi-min. Super-resolution through neighbor embedding[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2004:275-282.

[5] FREEMAN W T, PASZTOR E C, CARMICHAEL O T. Learning low-level vision[J]. International journal of computer vision, 2000, 40(1):25-47.

[6] KIM K I, KWON Y. Example-based learning for single-image super-resolution[M]//Pattern Recognition. Springer Berlin Heidelberg, 2008:456-465.

[7] 宋立新,高凤娇,郝朝晖.二维 EMD 分解方法的比较与改进[J].电子与信息学报,2008,30(12):2890-2893.

[8] 杨宇翔.图像超分辨率重建算法研究[D].合肥:中国科学技术大学自动化系,2013.

Single Image Super-resolution Reconstruction Based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition

MAO Xiao-bo, ZHANG Zhi-chao

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that most learning-based super-resolution algorithms are not competent to take both the reconstruction quality and computing speed into account, a novel single image super-resolution reconstruction based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD) is proposed. Firstly, a low-resolution image is decomposed into several layers with different complexities by BEMD, which contains various details. Then, the first IMF be reconstructed with high frequency details by improved kernel ridge regression algorithm in order to ensure the quality of image and the other IMFs containing fewer details be reconstruct by bicubic interpolation in order to improve the speed. Finally, the reconstructed IMFs are merged into a high-resolution image. Experimental results demonstrate that the proposed method make full use of the advantages of the above algorithms, which not only ensure the quality of the reconstruction image, but also improves the computational speed.

**Key words:** single image super-resolution reconstruction; BEMD; improved kernel ridge regression; bicubic interpolation