http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2020.0118

基于形态学滤波的快速多通道图像 EMD

胡建平[1,2], 杜影[1], 谢琪[1], 王小超[2,3,*], 张道畅[1]

(1. 东北电力大学 理学院, 吉林 132012; 2. 北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100083;
3. 天津工业大学 数学科学学院, 天津 300387)

摘 要: 为了提高多通道图像经验模态分解(EMD)方法分解的效率,提出了一种基于形态学滤波的快速多通道图像 EMD 方法。利用形态学膨胀和腐蚀滤波可以计算图像上下包络这一重要特性,实现了多通道图像 EMD 的快速计算,形态学滤波窗口大小由各通道图像的平均极值距离确定,将一幅多通道图像自适应分解为若干个尺度从细到粗的内蕴模态函数(IMF)图像和一个体现图像整体变化趋势的余量。大量的实验结果与对比显示,所提方法不但能够加快 EMD 方法分解的速度,而且也能够有效地对多通道图像进行自适应分解。通过在图像融合和图像水印中的应用及大量的实验比较,说明了所提方法能够方便快捷地投入到具体的图像处理任务中。

关 键 词: 经验模态分解(EMD); 顺序统计滤波; 形态学滤波; 内蕴模态图像; 图像处理
中图分类号: TP391
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2020)11-2007-11

1998 年,美国工程院院士 Huang 等[1]提出了一种适用于处理非线性非平稳信号的经验模态分解(EMD)方法,其对输入的一维信号极大(小)值点进行三次样条插值得到上(下)包络,并进行重复筛分操作提取出若干个尺度由细到粗的内蕴模态函数(IMF)分量和一个余量。EMD 方法是完全数据驱动的自适应方法,能够避免傅里叶分析和小波分析对基函数选取的依赖,在气象、地质、电力、海洋、机械等领域的信号处理和分析中得到了广泛应用[2-7]。

为了将 EMD 方法推广到二维单通道图像(如灰度图像)上,Long[8]先对图像的行或列做拉伸变换生成一维信号,再对其进行一维 EMD 分解,损坏了图像信号间的关联性。为了在二维空间上获得更为准确的分解,研究者们尝试了径向基函数插值[9-10]、薄板样条插值[11]、基于 Delaunay 三角化的三次多项式插值[12]等多种方法提取二维图像的包络曲面,进而将一维 EMD 的理论直接推广到二维空间上。此外,Xu 等[13]通过引入结构极值点插值构建包络图像,并运用四元素 Hilbert 变换进行纹理分析。

为了解决通过插值构建包络图像的 EMD 方法在筛分处理过程中容易出现过冲和欠冲的问题,Huang 和 Kunoth[14]通过求解一个带有不等式约束的优化模型来构建包络图像。Colominas 等[15]提出了一种无约束优化的图像 EMD 方法,通过求解一个凸优化问题得到 IMF 图像,无需插值计算图像包络。尽管这些基于优化的 EMD 方法具有更好的数学理论基础,但是分解速度普遍偏慢。相对而言,基于顺序统计滤波的 EMD 方

收稿日期: 2020-04-01; **录用日期**: 2020-06-05; **网络出版时间**: 2020-06-17 09:27
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200616.1546.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(61672149, 61602341, 11901079); 吉林省教育厅"十三五"科学技术研究规划项目(JJKH20190690KJ); 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金(BUAA-VR-16KF-23, BUAA-VR-17KF-04)

* **通信作者**. E-mail: wangxiaochao18@163.com

引用格式: *胡建平, 杜影, 谢琪, 等. 基于形态学滤波的快速多通道图像 EMD[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 2007-2017. HU J P, DU Y, XIE Q, et al. A fast EMD for multi-channel images based on morphological filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(11): 2007-2017 (in Chinese).*

法[16-18]使用顺序统计滤波计算图像的上下包络，能够更加快速地提取图像的IMF图像。

对于多通道图像(如彩色图像)，文献[19]提出了一种多通道图像EMD方法，需要通过双拉普拉斯算子插值计算多通道图像上下包络，在处理较大尺寸图像时运算速度较慢。Bhuiyan等[20]将基于顺序统计滤波的单通道图像EMD方法[16]推广到多通道图像上，具有更快的分解速度，然而其在分解时会生成一些冗余的IMF图像，降低了EMD方法的自适应性，而且其在上下包络的计算效率方面仍然有提升的空间。

为此，本文提出了一种简单快速的多通道图像EMD方法。通过形态学滤波实现多通道图像上下包络的计算，其中形态学滤波窗口大小由各通道图像的平均极值距离确定，避免了顺序统计滤波中获取滤波窗口尺寸复杂的计算，最终能够快速地对一幅多通道图像进行自适应分解。首先，介绍与本文方法相关的基于顺序统计滤波的单通道图像EMD方法；然后，介绍本文提出的基于形态学滤波的快速多通道图像EMD方法；最后，通过实验对比分析及其在图像融合和图像水印中的应用说明本文方法的有效性。

1 基于顺序统计滤波的单通道图像EMD

Bhuiyan等[16]提出的基于顺序统计滤波的单通道图像EMD方法先通过计算图像的极大(小)值之间的距离映射确定顺序统计滤波窗口大小，再使用顺序统计滤波获得图像包络，进而提取IMF图像。该方法能够避免基于插值的EMD方法在包络计算时的复杂运算，也能减少筛分处理时容易出现的过冲和欠冲现象。

对于输入的单通道图像I，用R_k表示第k($k=1,2,\cdots$)个余量图像($R_0=I$)，使用该方法提取第k个IMF图像的主要步骤如下：

步骤1 提取余量图像R_{k-1}的局部极值点。如果某个像素点的灰度值比其所在邻域的灰度值都大(小)，则该像素点被视为局部极大(小)值点。该像素所在邻域选取为以其为中心的3×3窗口里的所有像素点。

步骤2 通过计算极大(小)值点之间的距离映射$d_{\text{adj-max}}$($d_{\text{adj-min}}$)确定顺序统计滤波窗口大小w。对于提取的每个局部极大(小)值点，该点处的距离映射值为距其最近的局部极大(小)值点所在位置之间的欧氏距离。通过对极大(小)值点之间的距离映射值进行排序，可以得到如下4种计算滤波窗口尺寸的方式：

$$\begin{cases} d_1 = \min\{\min\{d_{\text{adj-max}}\},\min\{d_{\text{adj-min}}\}\} \\ d_2 = \max\{\min\{d_{\text{adj-max}}\},\min\{d_{\text{adj-min}}\}\} \\ d_3 = \min\{\max\{d_{\text{adj-max}}\},\max\{d_{\text{adj-min}}\}\} \\ d_4 = \max\{\max\{d_{\text{adj-max}}\},\max\{d_{\text{adj-min}}\}\} \end{cases} \tag{1}$$

可根据实际应用选取对应的窗口尺寸作为滤波器窗口大小。该窗口尺寸越大，所提取的IMF图像的尺度越精细，反之则越粗略。

步骤3 通过基于顺序统计滤波计算图像上下包络。该包络通过在局部邻居窗口内统计像素点灰度的极大(小)值得到，即

$$\begin{cases} U_k(x,y) = \max\limits_{(s,t)\in Z_{xy}}\{R_{k-1}(s,t)\} \\ D_k(x,y) = \min\limits_{(s,t)\in Z_{xy}}\{R_{k-1}(s,t)\} \end{cases} \tag{2}$$

式中：Z_{xy}表示以像素点(x,y)为中心的$w\times w$窗口内像素点集合。

为了获得更加平滑的包络图像，可以通过均值滤波在Z_{xy}内对上述包络进行平滑，即

$$\begin{cases} U'_k(x,y) = \dfrac{1}{w\times w}\sum\limits_{(s,t)\in Z_{xy}} U_k(s,t) \\ D'_k(x,y) = \dfrac{1}{w\times w}\sum\limits_{(s,t)\in Z_{xy}} D_k(s,t) \end{cases} \tag{3}$$

步骤4 通过对平滑后的上下包络进行平均得到平均包络图像作为第k个余量图像$R_k=(U'_k+D'_k)/2$，则第k个IMF图像为$F_k=R_{k-1}-R_k$。

通过上述步骤迭代地提取图像不同尺度的IMF图像，直到提取指定数目的IMF图像或者余量图像R_k的极值点个数较少为止。

与经典的EMD方法对余量图像进行重复筛分处理不同，该方法在提取每个IMF图像时只进行一次上下包络的构造，就能得到较高质量的分解，加快了方法的运算速度。

2 本文多通道图像EMD方法

Bhuiyan等[20]将第1节基于顺序统计滤波的单通道图像EMD方法[16]推广到多通道图像上，先计算多通道图像的顺序统计滤波窗口尺寸向量，向量每个元素为每个通道图像的极大(小)距离映射的最小值(即式(1)中第1种顺序统计滤波窗口大小计算方式)；为了考虑各个通道图像的相关性，使用尺寸向量的最小值作为所有通道图像的顺序统计滤波的窗口尺寸，以保证各个通道图像能够生成相同尺度和数目的IMF图像。

为了进一步提高该方法的效率，本文提出

http://bhxb.buaa.edu.cn

了一种基于形态学滤波的多通道图像 EMD 方法,其关键技术包括如何确定形态学滤波窗口的大小及如何利用形态学滤波计算多通道图像上下包络。

2.1　形态学滤波窗口大小的计算

与基于顺序统计滤波的 EMD 方法计算滤波窗口尺寸时采取的复杂方式不同,本文使用如下图像平均极值距离[18]计算形态学滤波窗口大小:

$$c = \sqrt{\frac{WH}{N}} \tag{4}$$

式中:W 和 H 分别为图像的宽和高;N 为图像极大值点和极小值点数目的平均值。

该计算方式是在信号极大(小)值点均匀分布的假设下对极大(小)值点之间距离的一个近似估计,如图 1 给出的一维信号所示。图中:正弦信号长度为 $L = 1.5T$(T 为信号周期),极大值点与极小值点的平均数目为 $N = 1.5$,则通过式(4)在一维情形下的计算方式 $c = L/N$ 得到极值点的平均距离为 T,正是所要提取信号的特征尺度。

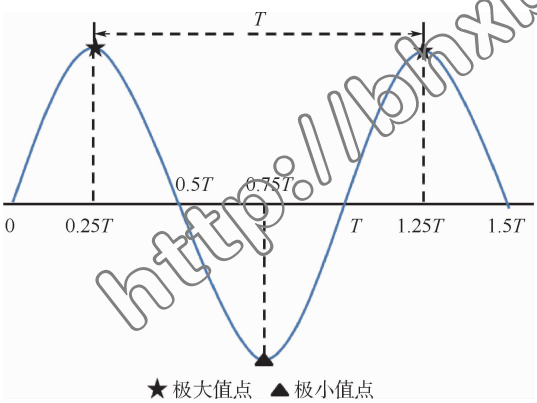


图 1　一维正弦信号平均极值距离的计算

Fig. 1　Computation of average extremum distance for a 1D sinusoidal signal

尽管式(4)需要在很强的假设下才能准确刻画信号的特征尺度,但是这种基于信号极值分布的滤波方式整体上考虑了信号极值点的特征分布,能够逐级提取原始信号的不同尺度特征,可当作是原始信号的一种自适应分解。此外,该方法与基于顺序统计滤波的 EMD 方法相比,不但能够避免在获取滤波窗口尺寸时复杂的计算,提高分解的效率,而且也能避免少量小尺度特征的干扰,提高分解的自适应性。

对于给定的多通道图像 $\boldsymbol{I} = (I_1, I_2, \cdots, I_n)$,其平均极值距离可以按照每个通道分别计算,得到一个极值距离向量 $\boldsymbol{c} = \{c_1, c_2, \cdots, c_n\}$。与文献[20]的方法一样,本文也采用各个通道的最小极值距离作为多通道图像形态学滤波窗口尺寸,即

$$w = \min\{c_1, c_2, \cdots, c_n\} \tag{5}$$

进而用其提取各个通道图像相同尺度特征的 IMF 图像。

2.2　基于形态学滤波的上下包络计算

数学形态学滤波是以形态表示为基础的图像分析和处理工具,自提出以来,已经广泛应用于图像去噪、增强、纹理分析等领域中[21]。膨胀和腐蚀是数学形态学滤波中 2 种最基本的操作。对于给定的一幅单通道图像 I 和结构元素 b,膨胀和腐蚀操作具体定义如下:

$$\begin{cases}(I \oplus b)(x,y) = \max\limits_{(s,t)\in Z_{xy}} \{I(x-s, y-t) + b(s,t)\} \\ (I \ominus b)(x,y) = \min\limits_{(s,t)\in Z_{xy}} \{I(x-s, y-t) - b(s,t)\}\end{cases} \tag{6}$$

式中:结构元素 b 可以根据实际应用选择。

通过式(2)可知,如果选择结构元素 b 为矩形窗口内的常值函数进行膨胀和腐蚀操作,则可获取基于顺序统计滤波 EMD 方法中图像的初始上下包络。由于形态学滤波是一种经典的图像处理工具,已经被 MATLAB、OpenCV 等多种著名软件快速实现,采用形态学滤波进行图像包络的构造非常有利于图像的快速 EMD 分解,如在 MATLAB 中可使用 imdilate 与 imerode 函数快速实现图像的膨胀和腐蚀操作[22]。

对于多通道图像 $\boldsymbol{I} = (I_1, I_2, \cdots, I_n)$,本文通过选取在 $w \times w$ 正方形窗口内定义的常值函数 1 作为结构元素 b 对各个通道图像进行膨胀和腐蚀操作,进而得到多通道图像的上下初始包络:

$$\begin{cases}\boldsymbol{U} = (U_1, U_2, \cdots, U_n) \\ \boldsymbol{D} = (D_1, D_2, \cdots, D_n)\end{cases} \tag{7}$$

式中:$U_i = I_i \oplus b$,$D_i = I_i \ominus b$。

在此基础上,通过使用类似于式(3)的均值滤波在窗口 $w \times w$ 内对各通道的包络图像进行平滑,以获得 $\boldsymbol{U}'$ 和 $\boldsymbol{D}'$。

2.3　方法步骤

对于给定多通道图像 $\boldsymbol{I} = (I_1, I_2, \cdots, I_n)$,令 $\boldsymbol{R}_k$ 表示第 k 个多通道余量图像($\boldsymbol{R}_0 = \boldsymbol{I}$),$k$ 初始化为 1,本文方法的具体步骤如下:

步骤 1　提取 $\boldsymbol{R}_{k-1}$ 每个通道图像的局部极大(小)值。

步骤 2　利用式(5)计算对 $\boldsymbol{R}_{k-1}$ 各个通道图像进行形态学滤波的窗口大小 w_k。

步骤 3　利用式(6)和式(7)在 $w_k \times w_k$ 正方

http://bhxb.buaa.edu.cn

形窗口对 $\boldsymbol{R}_{k-1}$ 进行形态学的膨胀和腐蚀操作，生成多通道图像 $\boldsymbol{R}_{k-1}$ 的上下初始包络 $\boldsymbol{U}_k$ 和 $\boldsymbol{D}_k$，并在相同的窗口内用均值滤波对该初始包络进行平滑得到 $\boldsymbol{U}'_k$ 和 $\boldsymbol{D}'_k$。

步骤 4 通过对平滑后的上下包络进行平均，得到平均包络图像作为第 k 个余量图像 $\boldsymbol{R}_k = (\boldsymbol{U}'_k + \boldsymbol{D}'_k)/2$，则第 k 个 IMF 图像为 $\boldsymbol{F}_k = \boldsymbol{R}_{k-1} - \boldsymbol{R}_k$。

步骤 5 判断 $\boldsymbol{R}_k$ 各个通道图像极值点的个数是否较少或者达到指定数目的模态图像，若不满足则令 $k = k+1$，返回步骤 1 对余量图像 $\boldsymbol{R}_k$ 再继续分解，最终多通道图像 $\boldsymbol{I} = (I_1, I_2, \cdots, I_n)$ 被分解为

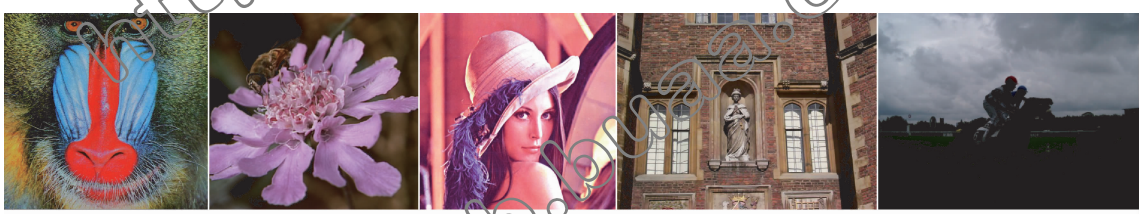
$$\boldsymbol{I} = \sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{F}_k + \boldsymbol{R}_N \tag{8}$$

3 实验结果及应用

本文在 CPU（2.66 GHz，2.66 GHz）内存、8 GB 的 PC 机上通过 MATLAB2018 编程实现了上述基于形态学滤波的快速多通道图像 EMD 方法。图 2给出了本文实验的 RGB 彩色图像（具体大小见表 1）。在分解过程中，如果有一个通道的余量图像极值点个数小于等于 3，则方法终止。当方法终止时，本文方法所实验的图像只包含少数几个 IMF 图像（不超过 6 个）。对于本文所实验图像，本文方法分解一次只需要 0.1 s 左右时间（见表 1），而且只需要 1 s 左右时间就能得到最终分解，具有极高的运行效率。

图 3 ~ 图 5 给出了采用本文方法分解得到的前 4 个 IMF 图像和分解停止时的最终余量结果。可以看出，本文方法能够有效地将多通道图像自适应分解为若干个尺度从细到粗的 IMF 图像和一个体现图像颜色整体变化趋势的余量。此外，与文献[19,20]一样，本文也采用 OI 量化评估 EMD 方法的分解结果。OI 表示分解所得到 IMF 图像分量之间的局部正交性，如果 OI 的值越低，表示分解结果局部正交性越好。通过图 6(c)可以看出，本文方法对所实验图像的 EMD 分解的 OI 值均在 0.1 以下，说明各个 IMF 图像之间具有较好的局部正交性。

为了进一步说明本文方法的有效性，同文献[19]提出的基于筛分的双拉普拉斯插值的多通道图像 EMD 方法（SMEMD 方法）和文献[20]提出的基于顺序统计滤波的多通道图像 EMD 方法（CBEMD 方法）进行比较。表 1 和图 6(a)给出了 3 种方法针对图 2 所实验图像的分解时间的比较。可以看出，本文方法具有明显的速度优势。由于 SMEMD 方法在计算图像包络时需要多次求解线性方程组，在处理较大尺寸图像时需要耗费大量的运算时间。为了统计方便，在图 6 统计时间时将该方法所实验图像缩小 1/4 后再进行统计。



(a) Monkey (b) Flower (c) Lena (d) Building (e) Horse

图 2 本文实验的 RGB 彩色图像

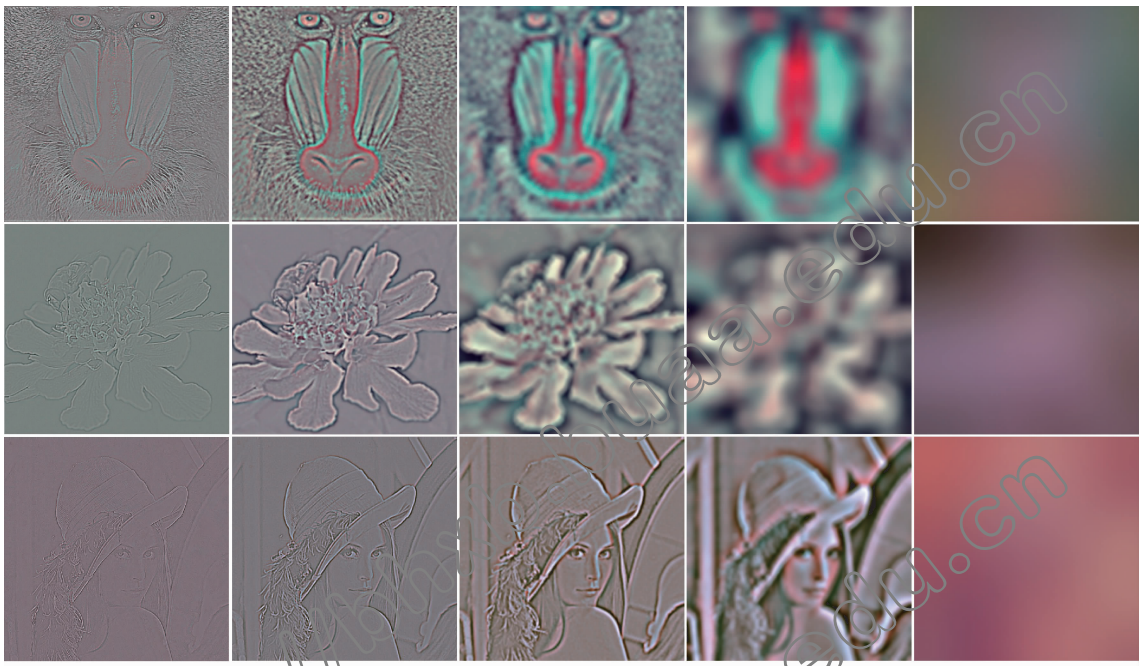
Fig. 2 RGB color images used in the experiments of this paper

表 1 不同多通道图像 EMD 方法生成第 1 个 IMF 图像所用时间

Table 1 Time comparison in generating the first IMF image among different EMD methods for multi-channel images

图像名称	尺寸/像素	极大值点数目	极小值点数目	时间/s		
				SMEMD	CBEMD	本文方法
Monkey	500 × 480	53 622	53 602	167.13	2.00	0.11
Flower	512 × 480	33 037	32 502	167.06	1.19	0.09
Lena	512 × 512	120 846	109 962	177.45	3.65	0.15
Horse	600 × 450	58 088	104 171	180.35	2.79	0.12
Building	816 × 616	53 731	52 584	436.50	2.24	0.21

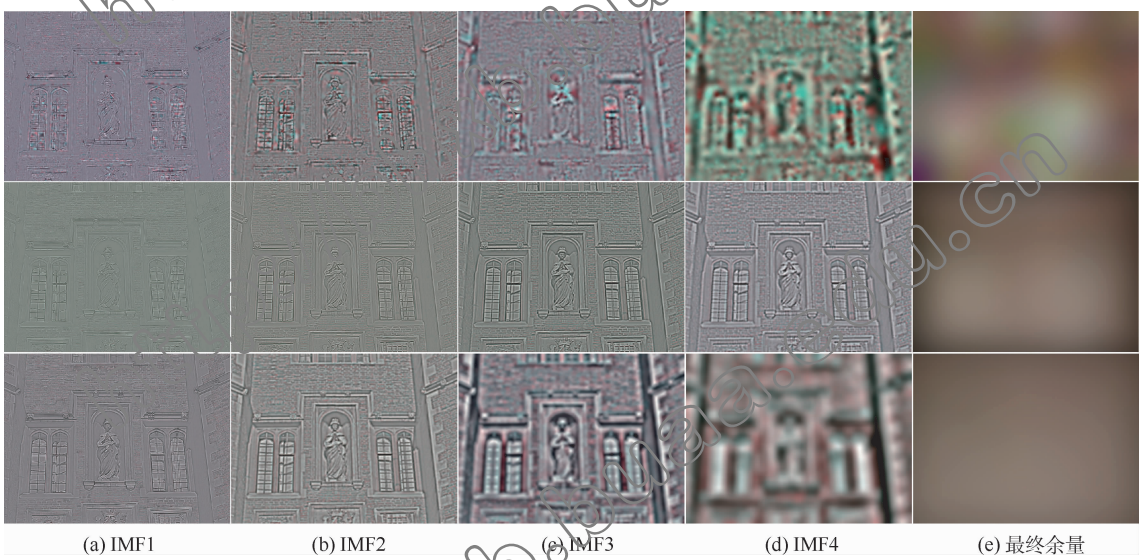
http://bhxb.buaa.edu.cn



(a) IMF1　(b) IMF2　(c) IMF3　(d) IMF4　(e) 最终余量

图 3　本文方法的分解结果

Fig. 3　Decomposition results of proposed method



(a) IMF1　(b) IMF2　(c) IMF3　(d) IMF4　(e) 最终余量

图 4　Building 图像分解比较

Fig. 4　Decomposition comparison of Building image

图 4 和图 5 给出了 Building 图像和 Horse 图像前 4 个 IMF 图像和分解停止时最终余量的结果比较,图 6(b)、(c)给出了 3 种方法针对图 2 所实验图像的 IMF 图像个数和 OI 值的比较。可以看出,3 种方法均能提取原始图像从细到粗的不同特征尺度的 IMF 图像,最终余量图像能够体现原始图像整体颜色变化趋势。SMEMD 方法(第一行图像)通过双拉普拉斯算子插值进行上下包络的构造,并进行了重复筛分的处理,因而其获得了 3 种方法中最低的 OI 值,但是其所提取的特征不如 CBEMD 方法(第 2 行图像)和本文方法(第 3 行图像)光滑,原因在于:CBEMD 方法和本文方法都使用了均值滤波对上下包络进行了平滑。CBEMD 方法选择最小极大(小)值距离作为顺序统计滤波进行图像包络的计算,获取了更多数目的 IMF 图像,出现了冗余特征尺度,相应的 OI 值也更高。本文方法则避免了 CBEMD 方法产生的分解冗余现象,得到了同 SMEMD 方法几乎相同个数和相同尺度的分解。

下面讨论如何将本文提出的多通道图像 EMD 方法应用在图像融合和图像水印中,以说明该方法能够方便快捷进行图像处理和分析。

http://bhxb.buaa.edu.cn

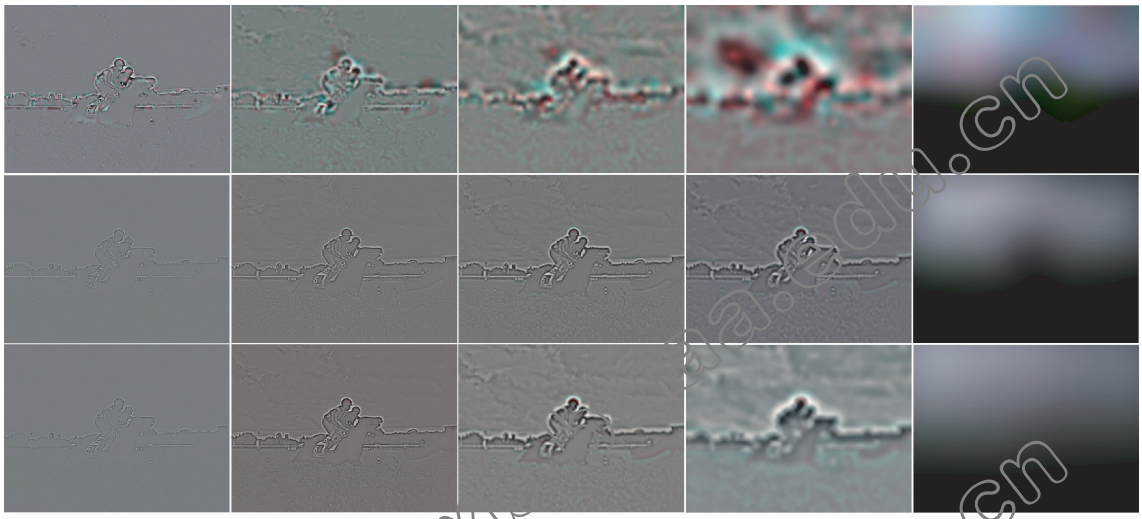


图5 Horse图像分解比较

Fig. 5 Decomposition comparison of Horse image

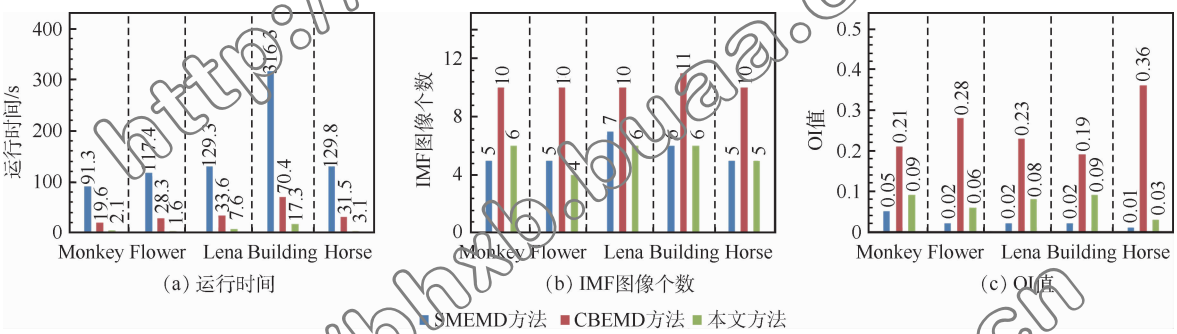


图6 图2中图像分解量化比较

Fig. 6 Decomposition quantitative comparison of images in Fig. 2

3.1 基于EMD的图像融合

图像融合通过将多源信道所采集到同一目标的图像数据进行整合成高质量的图像,能够更适用于人类视觉感知,已经被广泛应用于计算机视觉、军事和遥感等领域。本文提出一种具有图像增强功能的基于EMD图像融合方法。主要步骤是:首先,将2幅待融合图像组合成一个多通道图像,用本文提出的基于形态学滤波的快速多通道图像EMD方法对其进行分解,得到不同尺度的模态图像与余量图像;然后,对模态图像运用局部方差取最大值进行融合,对余量图像采用局部方差自适应加权方式进行融合;最后,通过如下图像增强的方式进行融合重建得到最终融合图像 I^*,即

$$I^* = \sum_{k=1}^{N} \alpha F_k^* + \beta R_N^* \tag{9}$$

式中:F_k^* $(k=1,2,\cdots,N)$ 为融合的模态图像;R_N^* 为融合的余量图像;α 和 β 分别为模态图像和余量图像的增强系数,其值越大,则增强强度越强。

为了说明基于形态学滤波的多通道图像EMD的融合方法的有效性,同多分辨率奇异值分解(MSVD)[23]、双树复数小波变换(DTCWT)[24]、引导滤波(GFF)[25]、基于DCT的奇异值分解(DCT_SVD_CV)[26]、基于DCT的相关性分析(DCT_CORR)[27]、基于筛分的双拉普拉斯插值的多通道图像EMD(SMEMD)[19]、基于顺序统计滤波的多通道图像EMD(CBEMD)[20]进行了比较,并给出了客观的量化评价指标比较结果,包括均值、标准差、平均梯度和信息熵。在比较过程中,所有基于EMD的图像融合方法均采用本文提出的具有图像增强功能的融合方式进行融合,并设置EMD分解次数为2,在融合图像重建时融合的模态图像增强系数设置为1.5,融合的余量图像增强系数设置为1.2,以评价不同EMD方法分解结果对融合方法的影响。

从图7~图9的比较结果可以看出,基于EMD的图像融合方法整体上具有更好的分解结果。尽管SMEMD方法取得了更好的量化结果,但是由于其所提取的IMF图像特征不太光滑,导致融合图像部分区域出现了异常,如图7(h)中靠墙的植物叶片及图8(h)中钟表图像中出现的伪

http://bhxb.buaa.edu.cn

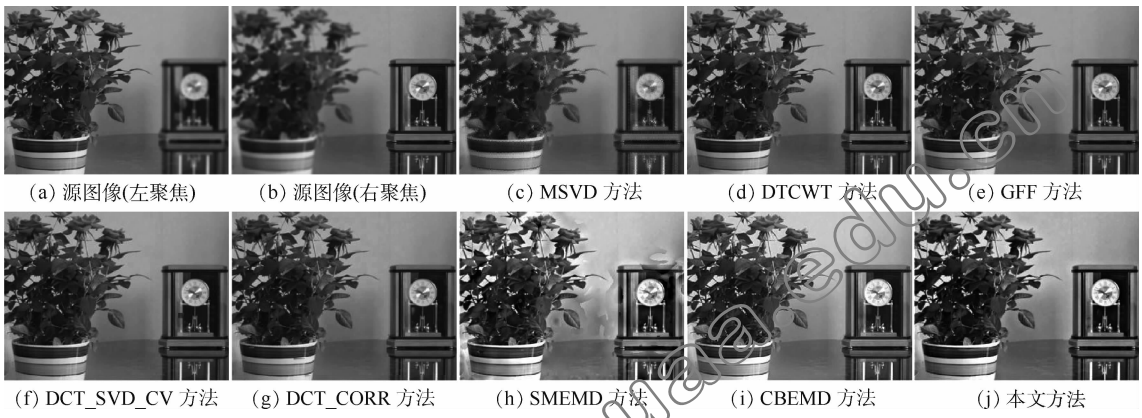


图 7　Potted plant 图像融合比较

Fig. 7　Comparison of Potted plant image fusion

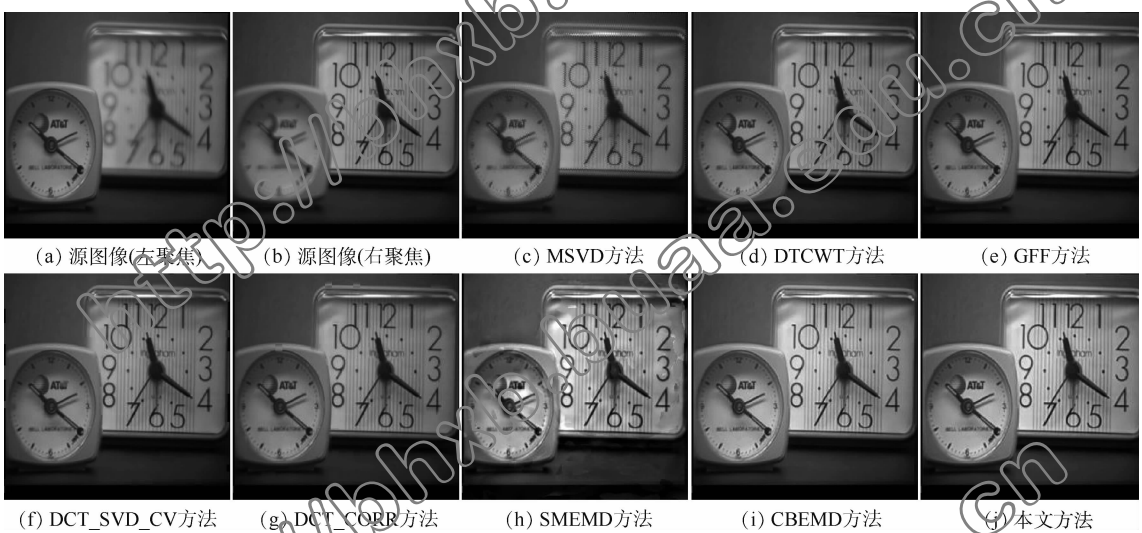


图 8　Clock 图像融合比较

Fig. 8　Comparison of Clock image fusion

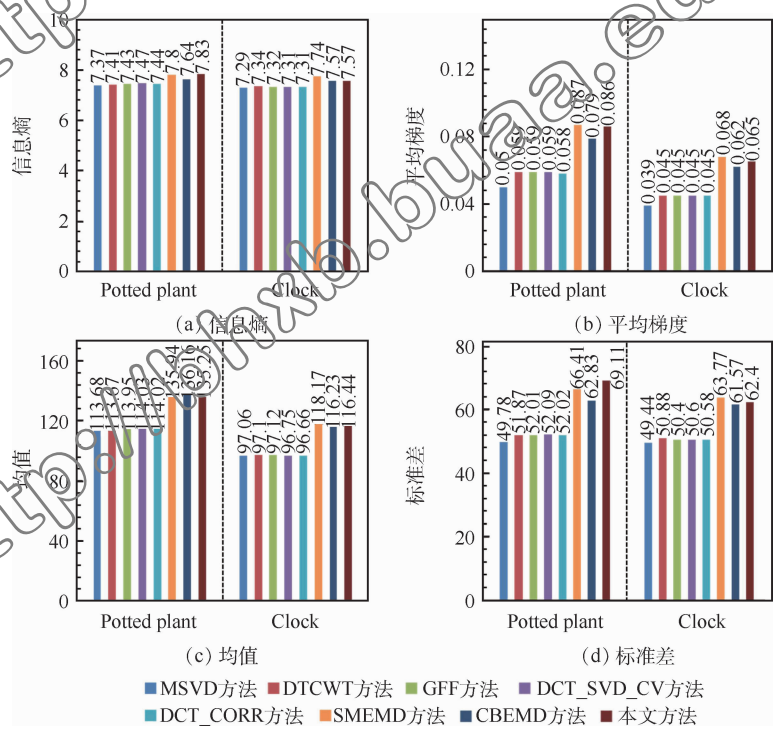


图 9　Potted plant 图像与 Clock 图像融合量化比较

Fig. 9　Fusion quantitative comparisons of Potted plant image and Clock image

http://bhxb.buaa.edu.cn

影,而本文方法和CBEMD方法则没有出现类似情况,无论是视觉还是量化指标上都取得了较好的结果。考虑到本文方法比CBEMD方法具有更快的分解速度,因此本文方法在图像融合中具有更大的优势。

3.2 基于EMD的图像水印

图像水印技术在数字图像的版权保护、防伪识别、信息安全等方面发挥着举足轻重的作用,是数字图像处理中重要的研究方向。根据文献[28]提出的基于EMD和Hilbert曲线的水印重复嵌入思想,将本文方法应用到彩色图像的水印中。首先,把待嵌入的水印图像用Arnold变换进行置乱处理,并对置乱图像利用Hilbert曲线降维得到一维水印信号;然后,对彩色的宿主图像利用本文提出的基于形态学滤波的多通道图像EMD方法进行多尺度分解,并检测第1个IMF图像的极值点作为水印嵌入位置;最后,把一维水印信号从左至右、自上而下依次重复地嵌入到第1个IMF图像的极值点中,进而得到嵌入水印后的图像。水印图像的提取为水印嵌入的逆过程。

为了说明基于形态学滤波的多通道图像EMD的水印方法的有效性,同时域水印算法LSB[29]、常规变换域水印算法DCT[30]和DWT[31]、其他2种多通道图像EMD水印算法(SMEMD)[19]和(CBEMD)[20]进行了比较,并采用归一化相关系数(NC)[28]来评价提取结果(NC值越接近于1,提取水印的质量越好)。在比较过程中,所有基于EMD的水印方法均采用文献[28]的思想进行水印嵌入和提取,以评价不同EMD方法分解结果对水印算法的影响。

图10和图11给出了不同方法比较的实验结果。其中,宿主图像大小统一变换为512×512,水印图像为32×32的带有“电”字样的二值图像,对含有水印的图像的攻击类型包括在图像中部进行35%的剪切(第1行图像)、加入方差为0.005的高斯噪声(第2行图像)和20%的椒盐噪声攻击(第3行图像)。从图10和图11可以看出,3种基于EMD的水印方法提取的水印质量效果非常接近(NC值几乎都为1),对于这3种攻击的鲁棒性整体都好于LSB算法[29]、DCT算法[30]和DWT算法[31]。考虑到本文EMD方法比其他2种方法具有更快的分解速度,因此本文方法在图像水印中具有更大的优势。

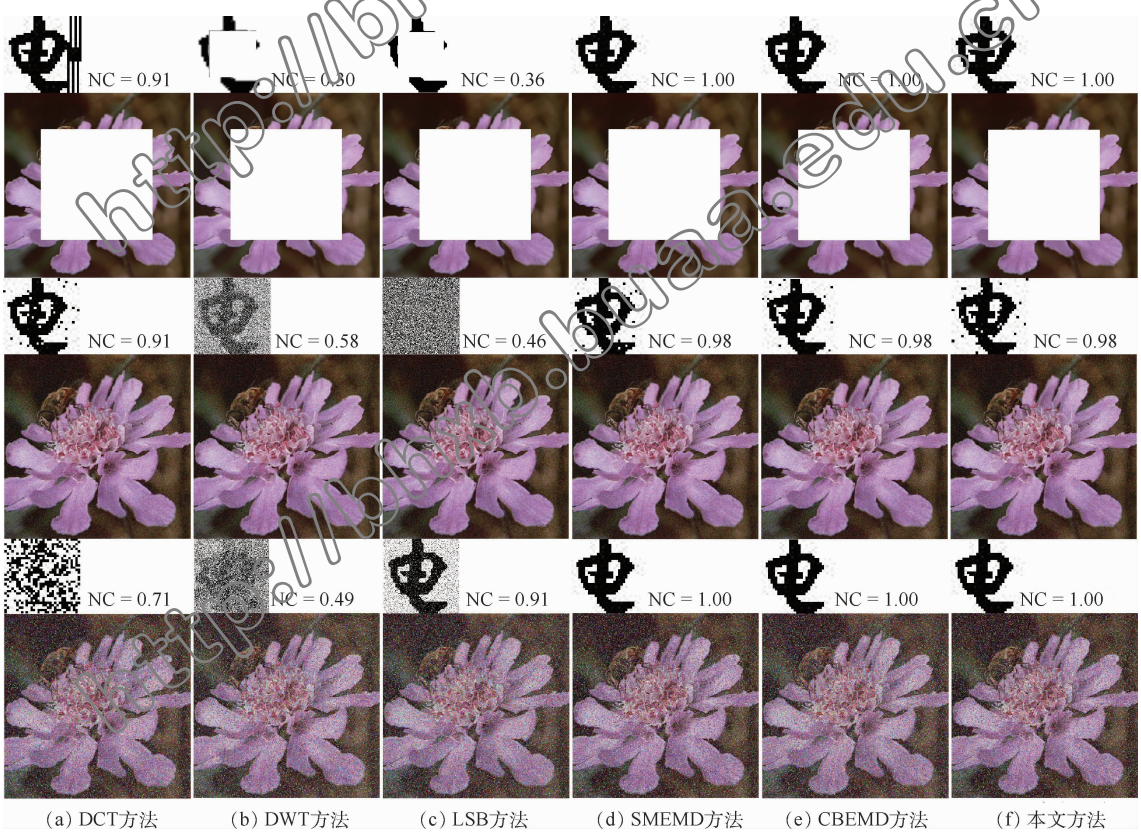


图10 不同攻击下Flower图像提取水印比较

Fig. 10 Comparison of watermark extraction for Flower image under different attacks

http://bhxb.buaa.edu.cn



图 11　不同攻击下 Lena 图像提取水印比较

Fig. 11　Comparison of watermark extraction for Lena image under different attacks

4　结　论

本文为了提高多通道图像 EMD 的运算效率,提出了一种基于形态学滤波的快速多通道图像 EMD 方法,主要工作如下:

1)通过形态学膨胀和腐蚀滤波计算多通道图像的上下包络,能够实现多通道图像(如 RGB 图像)EMD 的快速计算。

2)通过各通道图像的平均极值距离来估算形态学膨胀和腐蚀滤波窗口大小,能够较好地提取描述原始图像不同尺度特征信息的 IMF 图像和表示图像整体变化趋势的余量。

3)能够方便快捷地应用在图像融合和图像水印等数字图像处理任务中,实验对比显示该方法取得了较好的效果。

由于本文所提出的多通道图像 EMD 方法能够快速自适应地将多通道图像分解为若干个尺度从细到粗的 IMF 图像和一个体现图像整体变化趋势的余量,因此可考虑将该方法进一步应用到图像增强、图像去噪、图像分割等更多图像处理任务中。

参考文献(References)

[1] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454(1971): 903-995.

[2] HUANG N E, WU Z. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): 1-23.

[3] CHEN C, CHIANG W, LIU T, et al. Detecting the sensitivity of structural damage based on the Hilbert-Huang transform approach[J]. Engineering Computations, 2010, 27(7): 799-818.

[4] LEMMRICH J R, FARMER D M. Near surface turbulence in the presence of breaking waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(5): 1067-1086.

[5] 杨恭勇,周小龙,李家飞,等. 基于改进 EMD 频率族分离法的齿轮磨损故障诊断[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(5): 39-43.
YANG G Y, ZHOU X L, LI J F, et al. Fault diagnosis of gear wear based on improved EMD frequency family separation method[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(5): 39-43(in Chinese).

[6] DI C, YANG X, WANG X. A four-stage hybrid model for hydrological time series forecasting[J]. Plos One, 2014, 9(8): e104663.

[7] 肖白,房龙江,李介夫,等. 空间负荷预测中确定元胞负荷最大值的经验模态分解方法[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(3): 12-18.
XIAO B, FANG L J, LI J F, et al. An empirical mode decomposition method for determining the maximum cell load in space load prediction[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(3): 12-18(in Chinese).

http://bhxb.buaa.edu.cn

[8] LONG S R. Use of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform in image analysis[C]// World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, 2001: 67-71.

[9] NUNES J C, BOUAOUNE Y, DELECHELLE E, et al. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(12): 1019-1026.

[10] NUNES J C, GUYOT S, DELECHELLE E, et al. Texture analysis based on local analysis of the bidimensional empirical mode decomposition[J]. Machine Vision and Applications, 2005, 16(3): 177-188.

[11] LINDERHED A. 2D empirical mode decompositions in the spirit of image compression[J]. Wavelet and Independent Component Analysis Applications, 2002, 4738(7): 1-8.

[12] DAMERVAL C, MEIGNEN S, PERRIER V. A fast algorithm for bidimensional EMD[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(10): 701-704.

[13] XU G, WANG X, XU X. Improved bi-dimensional EMD and Hilbert spectrum for the analysis of textures[J]. Pattern Recognition, 2009, 42(5): 718-734.

[14] HUANG B Q, KUNOTH A. An optimization based empirical mode decomposition scheme[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2013, 240: 174-183.

[15] COLOMINAS M A, HUMEAU-HEURTIER A, SCHLOTTHAUER G. Orientation-independent empirical mode decomposition for images based on unconstrained optimization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(5): 2288-2297.

[16] BHUIYAN S M A, ADHAMI R R, KHAN J F. Fast and adaptive bidimensional empirical mode decomposition using order-statistics filter based envelope estimation[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 2008(164): 1-18.

[17] CHEN C Y, GUO S M, CHANG W S, et al. An improved bidimensional empirical mode decomposition: A mean approach for fast decomposition[J]. Signal Processing, 2014, 98(5): 344-358.

[18] TRUSIAK M, WIELGUS M, PATORSKI K. Advanced processing of optical fringe patterns by automated selective reconstruction and enhanced fast empirical mode decomposition[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1): 230-240.

[19] 胡建平,李玲,谢琪,等. 多通道图像EMD及应用[J]. 计算机工程与应用,2019,55(5):1-10.
HU J P, LI L, XIE Q, et al. Multi-channel image EMD and its application[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(5): 1-10(in Chinese).

[20] BHUIYAN S M A, KHAN J F, ALAM M S. Color image trend adjustment using a color bidimensional empirical mode decomposition method[J]. Journal of Electronic Imaging, 2012, 21(3): 234-242.

[21] 阮秋琦,阮宇智. 数字图像处理[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2006:440-448.
RUAN Q Q, RUAN Y Z. Digital image processing[M]. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 440-448 (in Chinese).

[22] 赵小川,赵斌. MATLAB数字图像处理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
ZHAO X C, ZHAO B. MATLAB digital image processing[M]. Beijing: Beihang University Press, 2015(in Chinese).

[23] NAIDU V P S. Image fusion technique using multi-resolution singular value decomposition[J]. Defence Science Journal, 2011, 61(5): 479-484.

[24] LEWIS J J, ROBERT J O C, NIKOLOV S G, et al. Pixel- and region-based image fusion with complex wavelets[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 119-130.

[25] LI S, KANG X, HU J. Image fusion with guided filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(7): 2864-2875.

[26] AMIN-NAJI M, RANJBAR-NOIEY P, AGHAGOLZADEH A. Multi-focus image fusion using singular value decomposition in DCT domain[C]// 10th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing, 2017: 22-25.

[27] AMIN-NAJI M, AGHAGOLZADEH A. Multi-focus image fusion in DCT domain using variance and energy of Laplacian and correlation coefficient for visual sensor networks[J]. Journal of AI and Data Mining, 2018, 6(2): 233-250.

[28] 王小超,胡坤,胡建平. 结合BEMD与Hilbert曲线的重复嵌入图像水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2020,32(2):289-296.
WANG X C, HU K, HU J P. Repeated embedding image watermarking algorithm combining BEMD and Hilbert curves[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2020, 32(2): 289-296(in Chinese).

[29] VAN SCHYNDEL R G, TIRKEL A Z, OSBORNE C F. A digital watermark[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE Press, 1994: 86-90.

[30] SINGH S P, BHATNAGAR G. A new robust watermarking system in integer DCT domain[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, 53: 86-101.

[31] 叶天语. DWT-SVD域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法[J]. 中国图象图形学报,2012,17(6):644-650.
YE T Y. Perfectly blind self-embedding robust quantization based watermarking scheme in DWT-SVD domain[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(6): 644-650(in Chinese).

作者简介:

胡建平 男,博士,教授。主要研究方向:计算机图形学、图像处理。

王小超 男,博士,副教授。主要研究方向:计算几何、图形图像处理。

http://bhxb.buaa.edu.cn

A fast EMD for multi-channel images based on morphological filter

HU Jianping[1,2], DU Ying[1], XIE Qi[1], WANG Xiaochao[2,3,*], ZHANG Daochang[1]

(1. School of Science, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100083, China;
3. School of Mathematical Sciences, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the existing multi-channel image Empirical Mode Decomposition (EMD) methods, this paper presents a fast multi-channel image EMD method based on morphological filter. It uses the morphological expansion and erosion filters to compute the upper and lower envelopes of an image, which can accelerate the implementation of EMD for multi-channel images. The size of the morphological filter window is determined by the average extremum distance of each channel image. The proposed EMD method can decompose a multi-channel image adaptively into several Intrinsic Mode Function (IMF) images with scales from fine to coarse, and a residue representing the overall change trend of the image. A number of experimental results and comparisons show that the proposed method can not only accelerate the decomposition of EMD method, but also generate a good multi-scale adaptive decomposition for a multi-channel image. Its applications in image fusion and image watermarking and many experimental comparisons show that the proposed EMD method can be used to solve some specific image processing tasks conveniently and promptly.

Keywords: Empirical Mode Decomposition (EMD); order statistics filter; morphological filter; intrinsic mode image; image processing

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2020-04-01; **Accepted**: 2020-06-05; **Published online**: 2020-06-17 09:27

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200616.1546.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61672149, 61602341, 11901079); "Thirteenth Five-Year Plan" Science and Technology Project of Education Department of Jilin Province (JJKH20190690KJ); The Open Funding Project of State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University (BUAA-VR-16KF-23, BUAA-VR-17KF-04)

* **Corresponding author**. E-mail: wangxiaochao18@163.com