



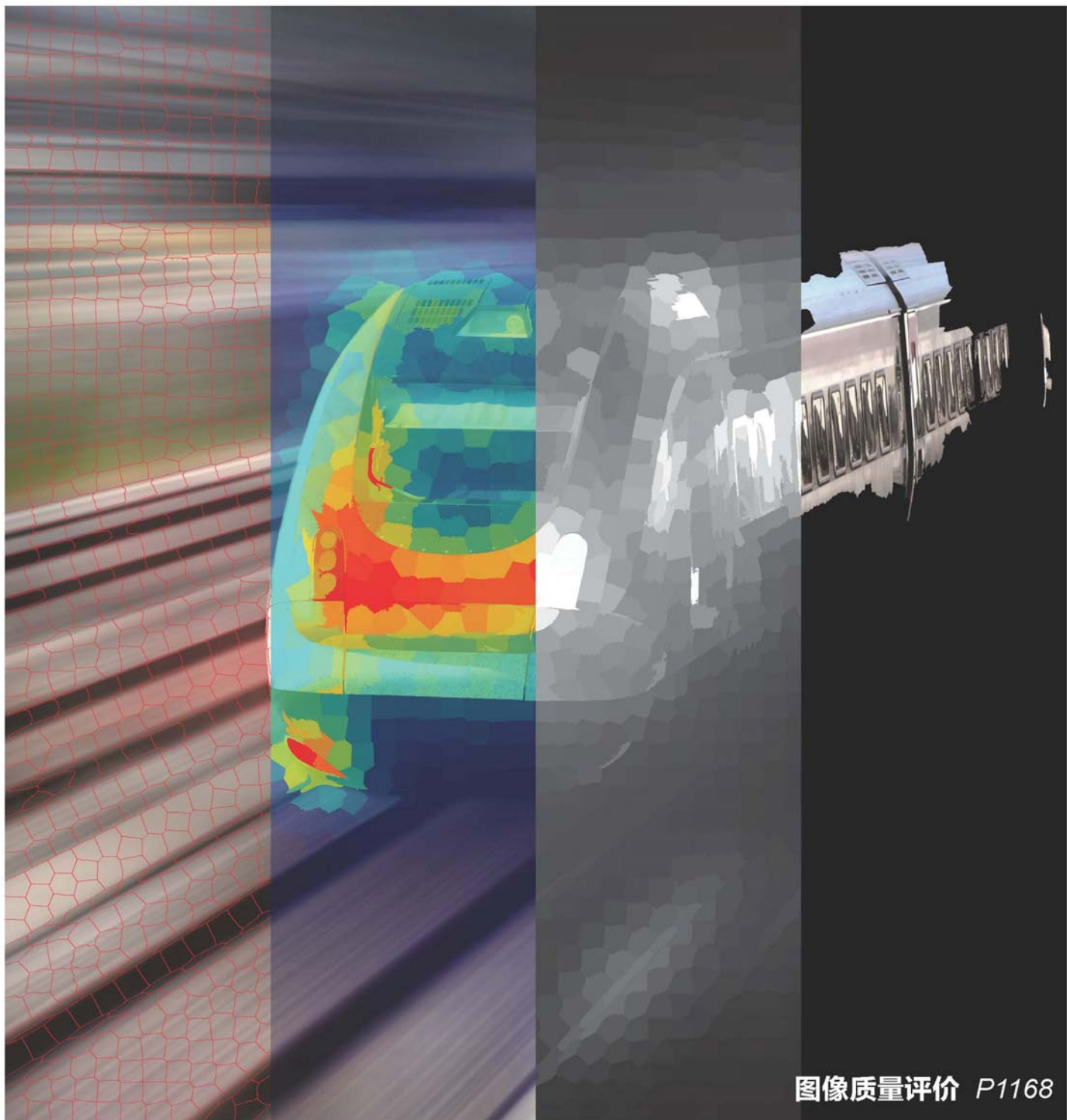
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
08
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

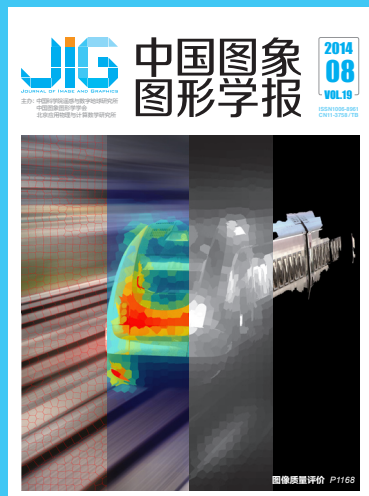


图像质量评价 P1168

中国图象图形学报

刊名题字: 宋健

月刊 (1996年创刊)



第19卷第8期 (总第220期)

2014年8月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

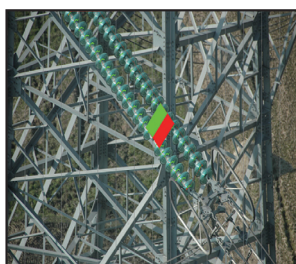
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



基于色调优化的图像视频细节增强(第1149页)



形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断(第1194页)



基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建(第1210页)

图像处理和编码

利用纹理和空间相关性的HEVC帧内预测模式选择

齐美彬, 朱广辉, 杨艳芳, 蒋建国 1119

方向滤波抗混叠的低冗余图像多尺度变换

张湃, 王丽侠, 张银蒲 1126

L_{∞} 准则的最大误差图像压缩算法

李晓云, 庞超逸, 黎彤亮, 黄世中 1135

利用无参考图像内容量度优化非局部均值去噪方法的参数

侯鑫, 陆耀, 李建武 1142

基于色调优化的图像视频细节增强

王津航, 刘春晓, 朱臻阳, 金剑秋, 唐佳娣 1149

结合图像融合与分割的快速去雾

王伟鹏, 戴声奎 1155

彩色图约束的二阶广义总变分深度图超分辨率重建

邸维巍, 张旭东, 胡良梅, 段琳琳 1162

重要区域保持的图像缩放质量评价方法

梁云, 傅贤超, 刘财兴 1168

图像分析和识别

图嵌入正则化投影非负矩阵分解人脸图像特征提取

杜海顺, 张旭东 1176

基于稀疏编码的动态纹理识别

刘洋, 李一波, 姬晓飞, 王杨扬 1185

形状感知的绝缘子识别与缺陷诊断

张晶晶, 韩军, 赵亚博, 刘浪, 王万国, 朱铭武 1194

迭代最小二乘椭圆拟合的锥套图像检测与跟踪

黄斌, 孙永荣, 杨博文, 王潇潇, 刘晓俊 1202

图像理解和计算机视觉

基于自适应权值滤波的深度图像超分辨率重建

杨宇翔, 曾毓, 何志伟, 高明煜 1210

医学图像处理

应用球形算子层次聚类的3维冠脉跟踪提取

郑永昌, 耿辰, 宋爽, 杨健 1219

遥感图像处理

波段排序的高光谱影像3维混合树编码方法

王相海, 解天, 宋传鸣, 张智迪 1228

多线程遥感影像实时渐进传输

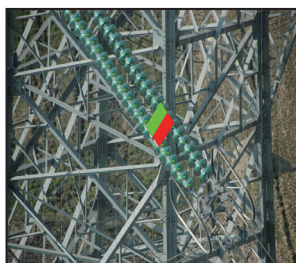
刘万军, 孟煜, 曲海成, 石翠萍 1237

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Image and video detail-enhancement via tone optimizationimage morphing(P1149)



Insulator Recognition and Defects Detection Based On Shape Perceptual (P1194)



Depth map super-resolution via adaptive weighting filter (P1210)

Image Processing and Coding

- HEVC intra-prediction mode selection by using texture and spatial correlation
Qi Meibin, Zhu Guanghui, Yang Yanfang, Jiang Jianguo 1119
- Low redundant image multiscale transform with anti-aliasing direction filtering
Zhang Pai, Wang Lixia, Zhang Yinpu 1126
- Algorithm for maximum error image compression based on L_{∞} norm
Li Xiaoyun, Pang Chaoyi, Li Tongliang, Huang Shizhong 1135
- Optimizing the parameters of non-local means via no-reference image content metric for image denoising
Hou Xin, Lu Yao, Li Jianwu 1142
- Image and video detail-enhancement via tone optimization
Wang Jinhang, Liu Chunxiao, Zhu Zhenyang, Jin Jianqiu, Tang Jiadi 1149
- Fast haze removal method based on image fusion and segmentation
Wang Weipeng, Dai Shengkui 1155
- Depth image super-resolution based on second-order total generalized variation constrained by color image
Di Weiwei, Zhang Xudong, Hu Liangmei, Duan Linlin 1162
- Image retargeting quality assessment by preserving important regions
Liang Yun, Fu Xianchao, Liu Caixing 1168

Image Analysis and Recognition

- Graph embedding regularized projective non-negative matrix factorization for face image feature extraction
Du Haishun, Zhang Xudong 1176
- Dynamic texture recognition based on sparse coding
Liu Yang, Li Yibo, Ji Xiaofei, Wang Yangyang 1185
- Insulator recognition and defects detection based on shape perceptual
Zhang Jingjing, Han Jun, Zhao Yabo, Liu Liang, Wang Wanguo, Zhu Mingwu 1194
- Droque image detecting and tracking based on iterative least squares ellipse fitting
Huang Bin, Sun Yongrong, Yang Bowen, Wang Xiaoxiao, Liu Xiaojun 1202

Image Understanding and Computer Vision

- Depth map super-resolution via adaptive weighting filter
Yang Yuxiang, Zeng Yu, He Zhiwei, Gao Mingyu 1210

Medicine Image Processing

- Novel 3D coronary artery extraction method using hierarchical clustering of spherical operator
Zheng Yongchang, Geng Chen, Song Shuang, Yang Jian 1219

Remote Sensing Image Processing

- Hyperspectral image coding with band ordering and 3D hybrid tree
Wang Xianghai, Xie Tian, Song Chuanming, Zhang Zhidi 1228
- Remote sensing image real-time progressive transmission based on multi-threads
Liu Wanjun, Meng Yu, Qu Haicheng, Shi Cuiping 1237

中图法分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)08-1126-09

论文引用格式: Zhang P, Wang L X, Zhang Y P. Low redundant image multiscale transform with anti-aliasing direction filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(8): 1126-1134. [张湃, 王丽侠, 张银蒲. 方向滤波抗混叠的低冗余图像多尺度变换[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(8): 1126-1134.] [DOI: 10.11834/jig.20140802]

方向滤波抗混叠的低冗余图像多尺度变换

张湃, 王丽侠, 张银蒲

唐山学院信息工程系, 唐山 063000

摘要: 目的 为了兼顾图像变换的低冗余性和方向滤波时抗频谱混叠特性, 设计一种新型基于抗混叠方向滤波的低冗余图像多尺度变换。方法 该变换由小波级联频域方向滤波器组组成。由于频域内构造的方向滤波器的频谱支撑满足紧支撑性, 因此滤波后形成的图像方向子带之间不会存在频谱混叠现象, 并且根据其特点采用一种新颖的降采样方式, 使得各个方向子带在降采样操作后仍具有平移不变性。结果 该变换可有效降低冗余, 同时能够消除因移变性导致的频谱混叠现象, 提高了方向滤波器组的方向选择性。结论 仿真实验结果表明, 新型图像多尺度变换在图像稀疏表示、压缩等领域均获得良好效果。

关键词: 图像多尺度变换; 抗混叠方向滤波器组; 频域方向滤波; 低冗余性

Low redundant image multiscale transform with anti-aliasing direction filtering

Zhang Pai, Wang Lixia, Zhang Yinpu

Department of Information Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China

Abstract: **Objective** To reduce redundancy and generate anti-aliasing subbands, we design a low redundant image multiscale transform with new anti-aliasing direction filtering. **Method** The new transform combines wavelet with frequency directional filter banks. The directional filter bank has compact support in frequency domain. The filtered directional subbands lack the spectrum aliasing phenomenon. A novel decimation method is adopted to make the decimated directional subbands with shift invariance avoid the aliasing. **Result** The new transform can reduce redundancy efficiently and improve the direction selectivity of directional filter banks. **Conclusion** The simulation results show that, in sparse representation, compression and other fields, the novel image multiscale transform achieves good results.

Key words: image multiscale transform; anti-aliasing directional filter bank; frequency direction filtering; low redundant property

0 引言

多尺度和多方向性是图像处理的重要特性。2维小波变换基函数是各向同性的, 不能稀疏地表示图像特征。Bamberger 和 Smith^[1]提出的方向滤波

器组(DFB)能够实现对图像的多方向信息的提取。然而由于其过多的级联结构, 使得频谱泄露和混叠现象严重。近年来, 人们又相继提出一系列具有各向异性基函数的图像多尺度几何分析方法, 如 Ridgelet、Curvelet、Contourlet、Shearlet^[2-5]等。其中, Shearlet 变换是根据合成小波理论构建的, 利用仿射

收稿日期: 2013-12-03; 修回日期: 2014-02-28

第一作者简介: 张湃(1982—), 女, 讲师, 2013年于燕山大学获仪器科学与技术专业博士学位, 主要研究方向为图像稀疏表示、压缩感知。E-mail: raindrop_pai@qq.com

系统将几何和多尺度分析关联,实现对图像边缘“最稀疏”表示。Easley 等人^[6]构造的离散 Shearlet 变换(DST),是利用拉普拉斯金字塔算法^[7](LP)级联一组定义在伪极向格频域内的带通滤波器,实现对图像的多尺度和多方向分析。然而随着高频尺度的方向数目的增加,其冗余度会陡峭上升,过冗余的 DST 不适用于图像压缩等领域。Yi 等人^[8]提出的 Cascade 算法利用二进小波对图像多尺度剖分,通过进一步细化水平、垂直方向的方向滤波器构造出的 DST 适用于边缘检测等方面,但高冗余的问题依然未能得到良好解决。Goossens 等人^[9]提出的低冗余 DST,根据频域方向滤波器构造特点进行降采样操作,有效降低了冗余,并消除了方向滤波的频谱混叠,然而由于其采用定义在频域内的严格带限滤波器进行多尺度分解,虽然消除了尺度间的频谱混叠,但这种分解会产生冗余,同时滤波器在频域内的严格带限性会造成空域局部化性能的降低。

为了兼顾空域局部化性能同时进一步降低冗余,设计一种新型的基于抗混叠方向滤波的低冗余图像多尺度变换(ADBLMT):首先令 2 维离散小波变换(DWT)对图像进行多尺度分解以“捕获”点奇异,并在伪极向频域坐标系(PPFC)^[10]中计算高频子带的离散傅里叶变换(DFT),利用定义在 PPFC 中的角度滤波器通过角度的平移生成一系列的方向滤波器构成频域方向滤波器组(FDFB)^[6],在高频子带的方向滤波时,FDFB 将分布在同一方向的奇异点合成为一个系数。在 FDFB 中每个方向滤波器对应的频谱均满足紧支撑性,因而方向滤波不会产生频谱混叠现象。在方向滤波器的通带外,图像的频谱被置为 0,利用这一特性,可以采用一种称之为“Folding”的去冗余策略实现对方向子带的降采样操作。并使得降采样操作后的子带仍具有平移不变性,消除了因移变性导致的频谱混叠现象,提高了方向滤波器组的方向选择性。由 DWT 级联 FDFB 得到的 ADBLMT 具有低冗余特性,其基函数满足各向异性,相比于现有的图像稀疏表示方法,能够实现对图像边缘、纹理等更加有效的稀疏表示。

1 ADBLMT 的设计原理

1.1 ADBLMT 的多尺度分解

ADBLMT 将多尺度分析和方向分析分开进行。首先利用由 1 维小波变换的张量积生成的 2 维可分

离 DWT 对图像进行多尺度分解,每一级变换都将上一级的低频分量分解为一个低频子带 LL 和高频 3 个方向的子带(水平子带 LH、垂直子带 HL、对角子带 HH)。由于 DWT 只具有有限的方向,不能充分利用图像本身特有的几何特性,限制了小波对 2 维图像的表示。其次由于小波的分解滤波器组和重构滤波器组为 2 维可分离正交滤波器组,临界采样的小波结构会产生频谱混叠,因此低频子带和高频子带均存在频谱混叠现象,而各方向子带是由高频子带经过高、低通滤波器形成的,同样存在频谱混叠现象。“混杂”的频谱造成同一方向的信息会在其他子带中同时出现,削弱了小波的方向选择性。对图 1(a)的 zoneplate 图像进行 2 层小波分解得到图 1(b)。

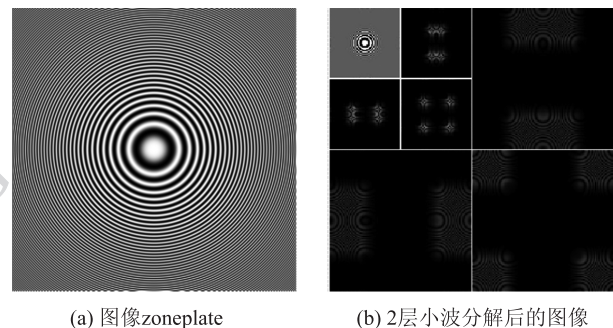


图 1 Zoneplate 图像的小波分解

Fig. 1 The wavelet decomposition of zoneplate image

由图 1 可以看出,图 1(b)中,图像左上角的低频子带是平滑均匀的部分;高频子带(图 1 中除低频子带外的所有区域)主要由边缘信息和纹理组成。小波能很好地表示图像中的光滑区域以及规则的纹理信息。然而在逼近边缘时会产生振铃现象,模糊了边缘;并且正交小波的采样运算还导致图像中出现了伪吉布斯现象。

为了克服小波的限制,必须增加基函数的方向敏感性,因此采用新型 FDFB 在 2 维 Fourier 平面上对高频子带的频谱进行方向剖分。FDFB 中每一个滤波器在频域内的支撑区间都是“对角三角形”,支撑区间外的频谱为 0,因此在进行方向滤波时无频谱混叠,可以准确地判断每个方向子带所代表的方向性。在小波分解时产生了大量大幅度的不可忽略的小波系数,FDFB 将分布在同一方向的奇异点合成为一个系数,能够更加稀疏地表示图像。

1.2 FDFB 的设计及特性分析

研究表明,一组能够完全重构的分解和重构滤波器,其分析滤波器 $\{H_i(z)\}_{i=0}^{m-1}$ 与合成滤波器

$\{G_i(z)\}_{i=0}^{m-1}$ 必须满足贝佐 (Bezout) 方程, 即 $\sum_{i=0}^{m-1} G_i(z) \cdot H_i(z) = 1$ 。目前, 关于贝佐方程的典型解法是通过 1 维可分离滤波器来构造多维的滤波器组的方法实现的。Goossens 等人^[9] 基于上述理论构造了一组定义在 PPFC 中的方向滤波器。PPFC 是由极径和极角来表示图像的傅里叶频谱, 极径的伸缩和极角的平移分别对应于传统笛卡儿坐标系中频谱尺度的变换和频谱的旋转, 若要提取图像的频域特征, 将傅里叶频谱在 PPFC 表示更便于处理; 同时相比于现有的极坐标系, 在 PPFC 中能够实现伪极快速傅里叶变换 (PPFFT) 算法^[11], 该算法降低了计算复杂度。因此在 PPFC 中表征图像傅里叶频谱具有简便、高效等优势。图 2 表征的是笛卡儿坐标系和 PPFC 系统。

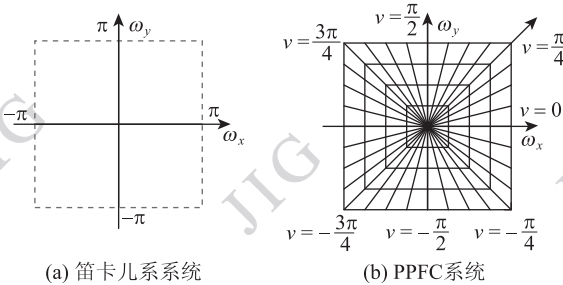


图 2 笛卡儿坐标系系统和 PPFC 系统

Fig. 2 Cartesian coordinates system and PPFC system

(ω_x, ω_y) 代表在笛卡儿坐标系中的坐标, (ω_r, v) 代表 PPFC 中的坐标。式 (1) (2) 表征的是 (ω_x, ω_y) 与 (ω_r, v) 之间的映射关系。

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1 + \max(|\omega_x|^2, |\omega_y|^2)}{1 + \pi^{-2}}} \quad (1)$$

$$v(\omega_x, \omega_y) = \begin{cases} \frac{\omega_y}{\omega_x} & |\omega_x|^2 > |\omega_y|^2 \\ \frac{\omega_x}{\omega_y} & |\omega_x|^2 \leq |\omega_y|^2 \end{cases} \quad (2)$$

在 PPFC 中, 可以由一个角度滤波器通过极角的平移, 构造方向滤波器组。这个角度滤波器可以看做是 1 维带通滤波器 $W(v - \frac{k}{K} \cdot \pi)$, 式中 $W(\cdot)$ 是窗函数, K 是方向滤波的总数目, k 代表第 k 个方向滤波。通常是采用光滑的“Bump”函数实现角度滤波器的构造。选取一个具有 C^3 光滑的插值函数

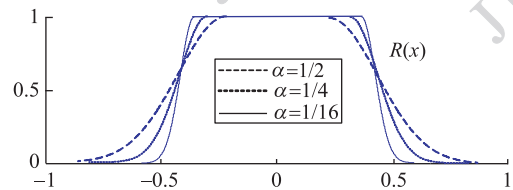
$$v(x) = \begin{cases} x^2 & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0 \\ 1 & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

利用其构造角度滤波器 $R(x)$, 即

$$R(x) = \begin{cases} 0 & x < -\frac{1+\alpha}{2} \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{\alpha+2x+1}{2\alpha}\right)\right) & \left|x + \frac{1}{2}\right| \leq \frac{\alpha}{2} \\ 1 & |x| < \frac{1-\alpha}{2} \\ \cos\left(\frac{\pi}{2}v\left(\frac{\alpha+2x+1}{2\alpha}\right)\right) & \left|x - \frac{1}{2}\right| \leq \frac{\alpha}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

常量参数 $\alpha \in [0, \frac{1}{2}]$ 决定角度滤波器带宽。由图 3 可见, α 值越小, 则窗函数频域紧支撑性越好, 对应的空域的局部化性能越差。平移的角度不受限制, 因此, 这种频谱划分方式没有方向数目的限制。角度滤波器经一系列平移后, 构造的方向滤波器组能够完成对图像频谱的无泄漏分割, 即满足

$$\sum_{k=1}^K \left| W\left(v - \frac{k}{K}\right) \right|^2 = 1。$$

图 3 α 对 $R(x)$ 的支撑的影响Fig. 3 The impact of $R(x)$ support of α

利用多通道解卷积 (MDP) 方式^[12] 可以实现滤波器组的完全重构。图 4 表征的是在 PPFC 内, 由 6 个方向滤波器构成的方向滤波器组无泄露的分割图像频谱的例子。

由图 4 可见, 定义在 PPFC 内每一个方向滤波器的通带对应图像内一个“对角三角形”的频谱区间, 且满足频域紧支撑性, 即在滤波器的通带外, 图像的频谱被置为 0, 因此, 方向滤波不会产生频谱混叠。依此, 当滤波的方向数目 ≥ 2 时, 利用一种称之为“折叠” (Folding) 的方式可以去除滤波后方向子带的部分冗余, 如图 5 所示。利用剪切操作 (shear)^[13] 将滤波后子带中楔形通带区间旋转集中在中心的矩形内。

选择合适的降采样因子 d 通过 Folding 去除子带的部分冗余, 这种降采样方式使得各个方向子带在降采样操作后仍具有平移不变性, 同时消除了因移变性导致的频谱混叠现象。在合成端, 利用对应



图 4 方向滤波器组 (包含 6 个方向滤波器) 无泄露的分割图像的频谱

Fig. 4 DFB (with six directional filters) divides the frequency spectrum without leak

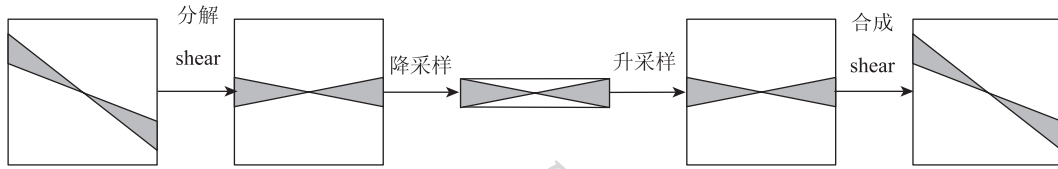


图 5 ADBLMT 的 Folding 去冗余策略以及合成端的完美重构

Fig. 5 The Folding strategy of ADBLMT and perfect reconstruction in synthesis end

的升采样及 shear 可以实现子带的完美重构。 d 可由式(5)求得,具体推导参见文献[9]。

$$d = \max\left(1, \frac{N}{(1 + 2\alpha) \cdot N/(K/2)}\right) \quad (5)$$

式中, N 是滤波子带的尺寸, K 是当前滤波子带对应的方向滤波总数目。由式(5)得, N/d 表征的是降采样后,每行每列应保留的频域方向子带系数。 d

的选取还与 α 成反比,这说明窗函数的频域紧支撑性越好,越能够去除频域内的冗余。

1.3 ADBLMT 的实现及冗余性分析

由于 ADBLMT 的设计满足贝佐公式,因此,其分析滤波器组可由对应的合成滤波器组实现完全重构。图 6 表征了 ADBLMT 的实现过程,其分析与合

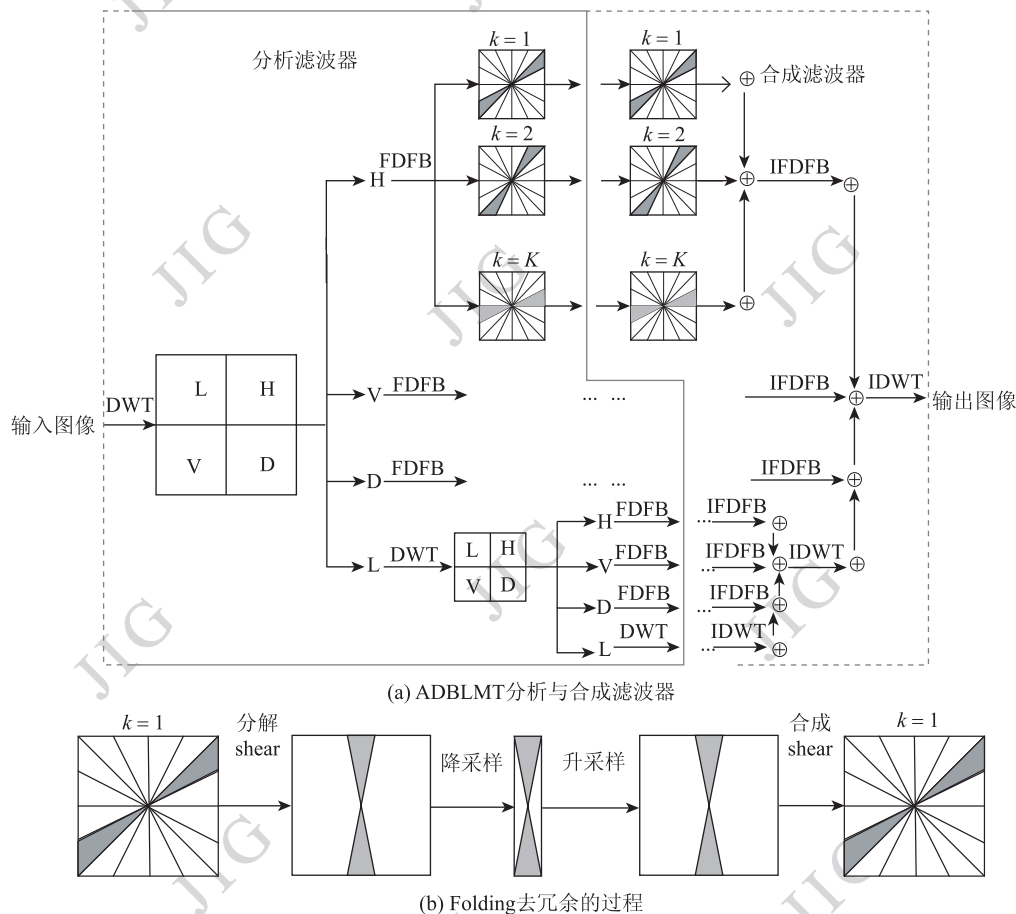


图 6 ADBLMT 的实现过程

Fig. 6 ADBLMT implementation process

成滤波器组的构造如图 6(a) 所示,“ $\oplus$ ”表征各个尺度和方向进行合并的过程。以分析滤波器组滤波后的某方向子带为例,图 6(b) 演示了 Folding 去冗余的过程。由图 6 反映的 ADBLMT 的具体实现过程如下:

1) 原始图像 f 经 DWT 多尺度分解,得到一个低频子带 f_a^{j-1} 和相应的高频方向子带 f_d^j 。

2) f_d^j 在 PPFC 中计算 PPFFT, 得到系数频谱 Pf_d^j 。

3) 应用 FDFB 于 Pf_d^j 上执行方向滤波得到方向子带频谱 $Pf_{d_k}^j$ 。

4) 利用 Folding 去冗余策略完成对 $Pf_{d_k}^j$ 降采样, 将降采样后的 $Pf_{d_k}^j$ 由 PPFC 直接映射到笛卡儿坐标系, 并执行 2 维 FFT 逆变换, 得到 ADBLMT 的高频系数 $f_{d_k}^j$, 与 f_a^{j-1} 联合构成 ADBLMT 系数。

ADBLMT 在进行图像表示时, 对每个尺度允许不同数目的分解方向, 是一种灵活的多尺度、多方向的图像变换。其基函数的支撑区间具有随尺度而大小变化“对角三角形”结构(如图 7 所示)适于捕捉图像中的高度方向性信息。

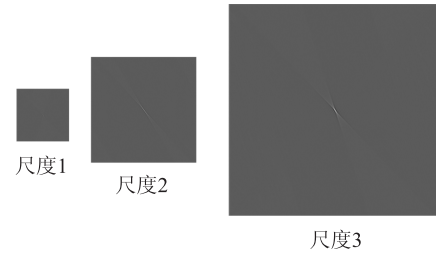


图 7 ADBLMT 的基函数

Fig. 7 ADBLMT basis function

图像经 ADBLMT 的分解系数, 从最低尺度到最高尺度是一个由粗到精的过程。高频方向子带内的系数代表了在这个尺度内该方向上系数的能量大小, 所以每个方向子带系数完全能够表示这个方向的特征。对 256×256 像素的 zoneplate 图像进行 ADBLMT, 图 8 表征的是 3 层小波分解后高频对角方向子带内, 经 FDFB 进一步分解为 6 个方向后, 各个方向子带系数分布情况。为清晰对比各个尺度间系数分布情况, 将低尺度的系数图放大, 使其等同于高尺度系数图像的大小。

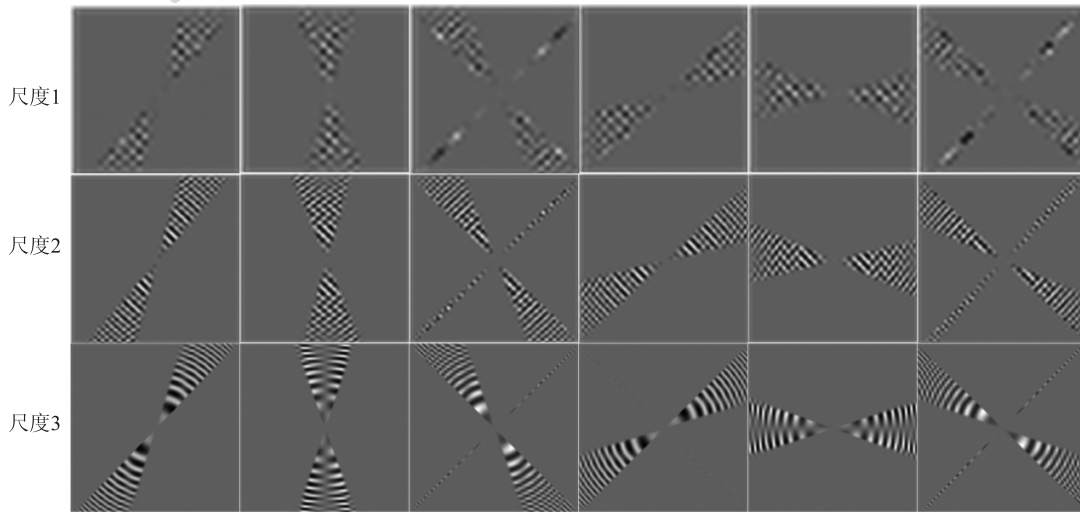


图 8 图像 zoneplate 经 ADBLMT 后的系数分布图像

Fig. 8 The coefficient distribution image of zoneplate via ADBLMT

可以看出, 分解后各层系数之间体现了由粗到细的 ADBLMT 基函数的尺度特征, 而在单个尺度中的每个分量体现了划分细致的角度特征。

ADBLMT 的冗余度由多尺度分析和方向分析共同决定。多尺度分解 DWT 是无冗余的, 其冗余度为

$$R_{\text{DWT}} = \left(\sum_{j=1}^J \frac{3}{2^{2j}} \right) + \frac{1}{2^{2J}} = 1 \quad (6)$$

式中, J 代表 DWT 分解的总尺度值, j 是当前对应的尺度值。根据式(5)的推导可得 $\frac{K}{d} \approx 2(1 + 2\alpha)$, 式

中, $\frac{K}{d}$ 代表冗余度, 其大小与方向子带的数目无关, 与 α 值成正比关系。因此 ADBLMT 冗余度为

$$R = \left[\sum_{j=1}^J \left(\frac{3}{2^{2j}} \cdot 2(1 + 2\alpha) \right) \right] + \frac{1}{2^{2J}} \quad (7)$$

式中,当 $J=3, \alpha=1/4$ 时, R 近似为 2.96。

2 ADBLMT 在图像稀疏表示中的应用及其算法时间有效性的分析

为了证明 ADBLMT 基函数具备良好的各向异性, 选用 ring 和 flower 图像作为测试图像, 图像大

小为 256×256 像素。为实现图像的 ADBLMT, 首先采用 2 维正交 DWT 对图像进行 3 层小波分解并选取最高层 J 及次高层 $J-1$ 的 3 个方向子带进行方向滤波, K_J, K_{J-1} 分别表征最高层 J 和次高层 $J-1$ 划分的方向子带数目, 分别取 $K_J=10, K_{J-1}=6, \alpha=1/4$ 。鉴于篇幅所限, 图 9 仅例举 ring 图像经 ADBLMT 变换后, 最高层的对角子带经滤波后生成各个方向子带。

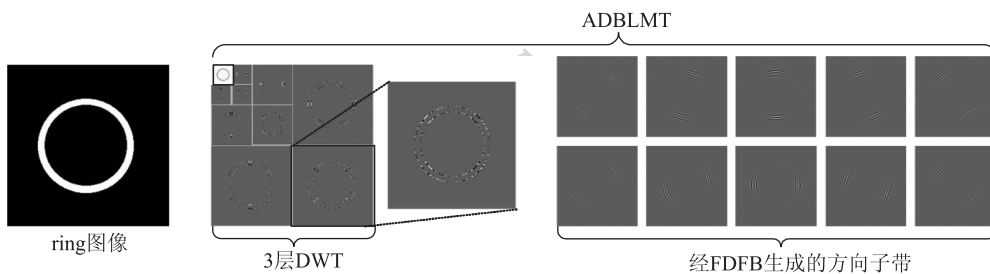


图 9 图像 ring 的 ADBLMT 及生成的部分高频方向子带信息

Fig. 9 The ADBLMT of ring image and its high frequency directional subbands

由图 9 可见, 对角子带对应的 FDFB 包含 10 个方向, 因此相应的基函数能够表征 10 个方向的信息。方向子带表明了 ADBLMT 基函数良好的各向异性可充分表征图像“圆环”信息。由此可见, ADBLMT 能够更好地表示图像的边缘、纹理等细节特征。

图 10 例举 flower 图像最高层的对角子带上进行方向滤波时, FDFB 所对应的基函数的形式和相应的方向子带。这里的方向子带是频域方向子带经 DFT 的逆变换后生成的空域方向子带, 为了说明

ADBLMT 基函数良好的各向异性, 频域子带不进行 Folding 降采样操作。

由图 10 可见, 10 个频域内的方向滤波器滤波的方向与空域子带内的信息方向是垂直关系。由于 FDFB 在频域内的紧支撑特性使得空域子带信息几乎不存在频谱混叠现象, 即 FDFB 可以近乎完美地表征图像高频子带内的不同方向的信息。

图 11 反映的是在 zoneplate 图像最高层对角子带上进行方向滤波时, 方向数目分别为 $K=10$ 和

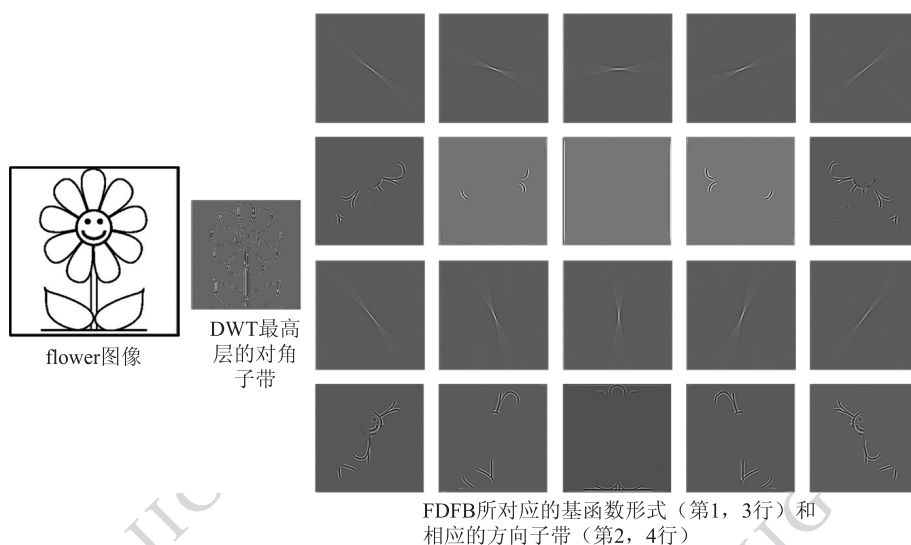


图 10 图像 flower 经 ADBLMT 后生成的最高层的对角子带所对应方向子带信息

Fig. 10 ADBLMT of flower image and its high frequency directional subbands

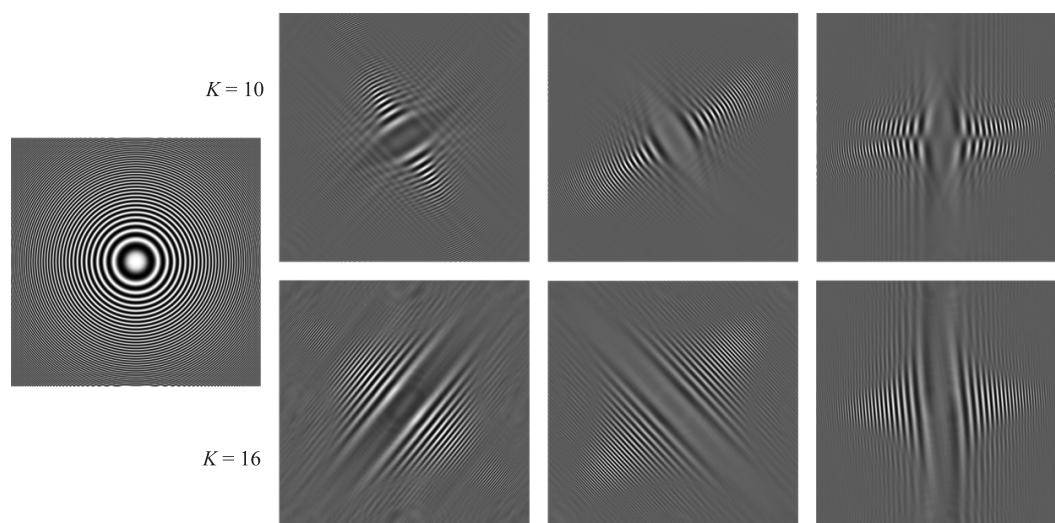


图 11 图像 zoneplate 最高层对角子带的部分方向子带信息

Fig. 11 The part of directional subband information of the finest level of zoneplate image

$K=16$ 时部分空域子带信息。

由图 11 可见,理论上,ADBLMT 频域划分的方向数目不受限制,但当方向数目 $K \geq 16$ 时,对应的空域内边缘等信息扩散严重,在进行 Folding 操作时,会使得高频细节丢失严重,因此通常选择子带滤波的方向数目 $K \leq 10$ 。

为了验证 ADBLMT 的 Folding 降采样操作不会过度增加 ADBLMT 的计算量,选用图像尺寸为 256×256 标准测试图像 Lena、Barbara、pepper、cameraman 作为测试图像,实验平台为 Matlab 7.1,仿真计算机的主频 3.01 GHz,内存 2 GB。通过与 DST、低冗余 DST 的算法持续时间的比较,证明 ADBLMT 算法的时间有效性,即验证了 Folding 降采样是有效的去冗余策略。

图 12 反映了 ADBLMT 与其他方法时间的比较,由于传统的 DST 不存在 Folding 降采样操作,因而算法实现的时间最短,低冗余 DST 与 ADBLMT 存在 Folding 降采样操作,其中,由于 ADBLMT 采用了 DWT 实现多尺度分解,与低冗余 DST 有冗余的多尺

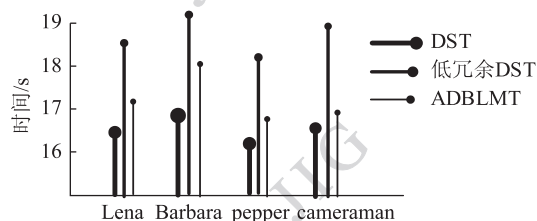


图 12 ADBLMT 与其他方法算法实现时间的比较

Fig. 12 The time comparison of ADBLMT with other algorithms

度分解相比较,降低了算法复杂度,因而在时间上接近传统的 DST。4 幅图像的 DST 与 ADBLMT 算法的时间差平均为 0.7 s。说明 Folding 降采样操作不会过度增加算法计算复杂度。由上述分析得,Folding 降采样操作是一种有效的去冗余策略。

3 ADBLMT 在图像压缩中的应用

由变换编码的非线性逼近思想^[14]可知,保留图像变换后得到的 K 个最大系数(又称为重要系数)并将余下系数置 0,再通过反变换即可得到这 K 个系数对原始图像的非线性逼近。但若想重建图像,必须对该 K 个系数位置进行编码。可见非线性逼近能力强并不能直接使图像压缩性能得以提高,因为重要系数的位置需要进行有效的熵编码^[15]。

本文主要是验证 ADBLMT 相比其他图像变换在图像压缩中的优势,因此对重要系数的位置只进行简单的游程编码^[16]。首先要对重要系数进行“一位二进制”标记,即二进制‘1’表示为重要系数,‘0’表示为非重要系数。对变换后的系数采用和 JPEG2000 同样的带死区的标量量化方式进行量化处理。这样编码图像所需的总的比特数为编码量化系数的比特数与编码重要系数位置的比特数之和。最后对重要系数的位置标记进行游程编码以进一步降低码率。

为了检验基于 ADBLMT 图像压缩性能,选用 512×512 像素的 child 和 Barbara 作为测试图像。并与小波变换和 Contourlet 变换图像压缩效果进行

对比。在小波变换和 ADBLMT 的多尺度分解中均采用“9-7”滤波器,分解级数为 3 级。Contourlet 变换中 LP 采用“9-7”滤波器,DFB 则采用“pkva”方向滤波器。LP 的分解级数也为 3 级。

图 13 所示为不同压缩比下相应峰值信噪比 (PSNR) 曲线。从图 12 可以看出,ADBLMT 相对于小波变换和 Contourlet 变换的 PSNR 值平均可以高出 2.8 dB 和 1.7 dB。

图 14 所示为 child 和 Barbara 图像采用不同变换压缩 18 倍后,经过解压缩后得到的图像。由图 14 可以看出,采用小波变换解压缩后的图像纹理完全模糊;Contourlet 变换在一定程度上有所改善,但图像纹理仍存在诸多伪迹,而 ADBLMT 的图像更接近原始图像,尤其是对于细节丰富的 Barbara 图像围巾区域等,可见 ADBLMT 对于图像细节

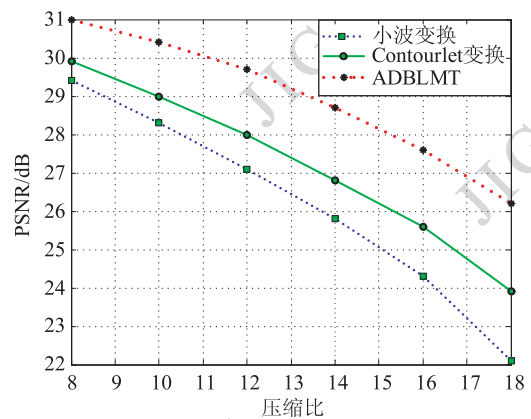


图 13 不同压缩比下图像峰值信噪比曲线

Fig. 13 The PSNR curves of different compression

的压缩效果明显优于其他两种算法。综上从主观效果及客观指标上验证了 ADBLMT 图像压缩算法的有效性。

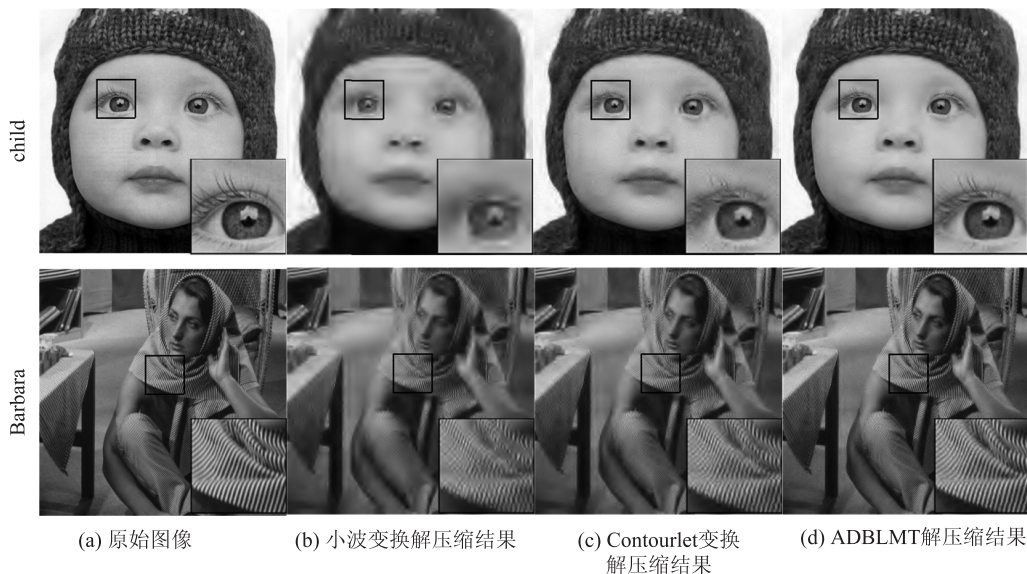


图 14 不同变换对应的解压缩后的图像

Fig. 14 The corresponding decompressed images of different transforms

4 结 论

新型的 ADBLMT 利用 DWT 与 FDFB 的有效结合,使得基函数具有各向异性,能够更加稀疏地表示图像边缘、纹理等特征;根据 FDFB 的特点设计的 Folding 的去冗余策略,能够有效降低冗余,并克服了现有的基于方向性的图像多尺度变换不能兼顾低冗余性和方向滤波时抗混叠性的缺陷,提高了 FDFB 的方向选择性。仿真实验中,通过与其他多尺度变换对比,表明了 ADBLMT 算法的有效性。鉴

于该算法在图像稀疏表示方面的优越性能,可将其应用到图像压缩、图像复原、图像超分辨率等领域。

参考文献 (References)

- [1] Bamberger R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images: theory and design [J]. IEEE Trans. on Signal Proc, 1992, 40(4): 882-893.
- [2] Gilles J, Tran G, Osher S. 2D Empirical transforms. wavelets, ridgelets, and curvelets revisited [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2014, 7(1): 157-186.
- [3] Starck J L, Candès E J, Donoho D L. The curvelet transform for

- image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 670-684.
- [4] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [5] Guo K, Labate D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2007, 39(1): 298-318.
- [6] Easley G, Labate D, Lim W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008, 25(1): 25-46.
- [7] Gao Y H, Wang S Z, Yang, J. Non-local enhancement of electronic portal imaging with tensor texture descriptors[J]. Electronics Letters, 2013, 49(14): 868-869.
- [8] Yi S, Labate D, Easley G R, et al. A shearlet approach to edge analysis and detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(5): 929-941.
- [9] Goossens B, Aelterman J, Luong H, et al. Efficient design of a low redundant discrete shearlet transform[C]// Proceedings of International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing. Ghent, Belgium: Ghent University, 2009: 112-124.
- [10] Peng X, Wang Y, Hong W, et al. Autonomous navigation airborne forward-looking SAR high precision imaging with combination of pseudo-polar formatting and overlapped sub-aperture algorithm[J]. Remote Sensing, 2013, 5(11): 6063-6078.
- [11] Li Z G, Yang J W. A frequency domain image registration algorithm based on quasi-polar coordinate[J]. Computer Engineering, 2013, 39(5): 248-252.
- [12] Easley G R, Labate D, Patel V M. Directional multiscale processing of images using wavelets with composite dilations[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2014, 48(1): 13-34.
- [13] Condat L, Van De Ville D, Forster-Heinlein B. Reversible, fast, and high-quality grid conversions[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(5): 679-693.
- [14] Jiao L C, Tan S. Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. Acta Electronic Sinica, 2003, 12(A): 1975-1981. [焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 12(A): 1975-1981.]
- [15] Zheng Y Y. Adaptive and reversible image pre-processing for efficient entropy coding[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(4): 1033-1036. [郑煜颖. 针对熵编码的自适应可逆图像预处理方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(4): 1033-1036.]
- [16] Gong D F, Liu F L, Shi X W, et al. Image fragile watermarking algorithm based on run-length coding[J]. Journal of Information Engineering University, 2013, 14(5): 513-518. [巩道福, 刘粉林, 史晓韦, 等. 一种基于游程编码的图像易碎水印算法[J]. 信息工程大学学报, 2013, 14(5): 513-518.]