

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013
Vol.18 No.

1

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013年1月 第18卷 第1期(总第201期)

目次

综述

- 正面人脸图像合成方法综述 赵林, 高新波, 田春娜(1)
SAR 图像道路网提取方法综述 程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥(11)

图像处理和编码

- 头部缺失的 JPEG 文件碎片恢复 徐明, 黄立, 张海平, 徐建, 郑宁(24)
安全高效的可撤销指纹模板构造 喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣(36)
基于残差的图像超分辨率重建 陈华华, 姜宝林, 刘超, 陈伟强, 陆宇, 张嵩(42)
旋转的 Wang Tiles 纹理合成算法 王继东, 庞明勇, 赵瑞斌(49)
基于圆形约束快速水平集的原生质体细胞分割 王晓飞, 庞全(55)

图像分析和识别

- 采用压缩传感的鲁棒的视频指纹方案 孙锐, 李超, 蒋飞云(62)
基于图像显著性的路面裂缝检测 徐威, 唐振民, 吕建勇(69)
基于局部熵的主动轮廓模型 潘改, 高立群, 赵爽(78)
基于算子的图像分解 李峰, 曾晓辉, 陈盛霞, 沈玉娟(86)

图像理解和计算机视觉

- 中值流辅助在线多示例目标跟踪 王德建, 张荣, 尹东, 张智瑞(93)
四叉树直方图的特殊方向关系表达 张珂, 王小捷, 靳越(101)

计算机图形学

- 协同进化的近似规则纹理合成 王相海, 陶兢喆(107)
反走样直线的灰度循环生成算法 牛连强, 张胜男, 钟玲(115)

地理信息技术

- 微博客蕴含交通信息的提取 张恒才, 陆锋, 陈洁(123)

-
- “计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (130)

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 1 January 2013

Contents

Review

- Review of frontal face image synthesis methods Zhao Lin, Gao Xinbo, Tian Chunna(1)
Review of road network extraction from SAR images Cheng Jianguhua, Gao Gui, Ku Xishu, Sun Jixiang(11)

Image Processing and Coding

- Rrecovery method for JPEG file fragments with missing headers
..... Xu Ming, Huang Li, Zhang Haiping, Xu Jiang, Zheng Ning(24)
Secure and efficient scheme to construct a cancelable fingerprint template
..... Yu Jianping, Zhang Peng, Wang Yao, Yang Yijun(36)
Image super-resolution reconstruction based on residual error
..... Chen Huahua, Jiang Baolin, Liu Chao, Chen Weiqiang, Lu Yu, Zhang Song(42)
Texture synthesis using rotational Wang Tiles Wang Jidong, Pang Mingyong, Zhao Ruibin(49)
Protoplasm somatic cells segmentation based on circle dependent fast level-set segmentation Wang Xiaofei, Pang Quan(55)

Image Analysis and Recognition

- Robust video fingerprinting via compressed sensing Sun rui, Li Chao, Jiang Feiyun(62)
Pavement crack detection based on image saliency Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong(69)
Active contour model driven by local entropy energy Pan Gai, Gao Liqun, Zhao Shuang(78)
Operator-based image decomposition Li Feng, Zeng Xiaohui, Chen Shengxia, Shen Yujuan(86)

Image Understanding and Computer Vision

- Median flow aided online multi-instance learning visual tracking Wang Dejian, Zhang Rong, Yin Dong, Zhang Zhirui(93)
Expression of special directional relation based on quadtree histogram Zhang Ke, Wang Xiaojie, Jin Yue(101)

Computer Graphics

- Fast near-regular texture synthesis based on the concept of co-evolution Wang Xianghai, Tao Jingzhe(107)
Integral algorithm for generating anti-aliased straight line controlled by gray iteration
..... Niu Lianqiang, Zhang Shengnan, Zhong Ling(115)

Geoinformatics

- Extracting traffic information from massive micro-blog messages Zhang Hengcai, Lu Feng, Chen Jie(123)

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)01-0086-07

论文引用格式: 李峰, 曾晓辉, 陈盛霞, 沈玉娟. 基于算子的图像分解[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 86-92.

基于算子的图像分解

李峰¹, 曾晓辉¹, 陈盛霞², 沈玉娟³

1. 江苏大学计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013;

2. 江苏大学基础医学与医学技术学院, 镇江 212013;

3. 中国疾病预防控制中心寄生虫病预防控制所, 卫生部寄生虫病原与媒介生物学重点实验室, 上海 200025

摘要: 图像的形态学卡通纹理分解与图像层级分解是近年来图像分析领域的研究热点。针对现有图像分解算法求解过程复杂且不易对图像层级分解的问题, 提出了一种基于算子的快速图像分解算法。在该方法中, 由局部奇异线性算子来刻画图像的纹理成分, 剩余图像信号则被描述为卡通成分; 同时通过引入自适应参数调节的方法来实现对剩余信号的分解, 进而实现图像的层级分解。其中, 自适应参数由图像局部全变差变化率来确定。实验结果表明, 该算法具有较好的运行效率, 同时具有较好的分解视觉效果。

关键词: 积分算子; 微分算子; 图像分解; 卡通纹理; 层级分解

Operator-based image decomposition

Li Feng¹, Zeng Xiaohui¹, Chen Shengxia², Shen Yujuan³

1. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Medical Science and Laboratory Medicine, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. National Institute of Parasitic Diseases, Chinese Center for Diseases Control and Prevention, Shanghai 200025, China

Abstract: In recent years there has been a great interest in the study of morphological decomposition of image into cartoon and texture, and its hierarchical decomposition. The existing algorithms suffer from high computational complexity and are not very well suited for decomposing images hierarchically. We propose an operator-based image decomposition method, in which a local linear singular operator characterizes the texture component and the residual signal is treated as a cartoon component. With proper changes to the adaptive parameter, it can decompose the image hierarchically through the decomposition of the residual signal. The adaptive parameter is determined according to the change rate of local total variation. The experimental results demonstrate that this method is effective and shows better visual effects.

Key words: integral operator; differential operator; image decomposition; cartoon texture; hierarchical decomposition

0 引言

图像卡通纹理分解是近十年在图像分析领域的一个研究热点, 它是基于图像形态学成分分析(MCA)而提出的一种分解方式, 由 Meyer^[1]于2001

年首次提出, 这种分解方式可以把图像分解为形态学卡通成分 u 和纹理成分 v , u 对应图像的结构信息, v 对应图像的纹理和震荡信号成分。目前分解算法可以归纳为以下两大类:

1) 基于范数的方法^[2-3]。这类方法通过定义 u 、 v 所属函数空间的范数, 再求解一个最优化问题达

收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2012-08-24

基金项目: 传染病重大科技专项(2008ZX10004-002)

第一作者简介: 李峰(1968—), 男, 副教授, 2001年于中国科学院计算技术研究所获计算机应用专业博士学位, 主要研究方向为医学图像处理、嵌入式计算。E-mail: betta.fli@gmail.com

到 u 和 v 的分离。Aujol 等人^[4]对可选函数空间、模型及求解算法进行了总结。Baudes 等人^[5]分析了特定的模型并给出了一种等价的滤波方法。通过对参数 λ 的剖分, Athavale 等人^[6]提出了 IDE 方法用于图像的层级分解。

2) 基于稀疏表示的方法^[7]。这类方法的核心思想是建立卡通信号字典和纹理信号字典,通过稀疏编码(sparse coding)过程把图像分解到这两个字典上。Rubinstein 等人^[8]对可选的字典做了详细总结,K-SVD 算法^[9]是较有代表性的一个字典学习算法。针对稀疏编码主要出现了 MP^[10]、OMP^[11]等贪婪算法及凸优化方法如 BP^[12]等。

然而,以上分解算法的求解过程复杂且不易对图像作更精细的层级分解。近年 Peng 和 Hwang^[13]提出一种基于算子的信号分解算法,该方法可以将 1 维信号中的局部窄带的成分分解到算子的零空间,这种局部窄带信号成分完全由该算子所刻画。分解模型为

$$S(t) = \sum_k S_k(t) + R(t) \quad (1)$$

式中, $S(t)$ 为 1 维信号,每个局部窄带信号成分 S_k 都由奇异线性算子 T_s 所刻画, $R(t)$ 为剩余信号。针对具体算子可以把模型求解转换为求一个最优化问题,并可以给出具体解析解,于是算法快速简便。为此,在此基础上,将这种基于算子的 1 维信号分解方法应用到图像的形态学成分分解中,并结合一种快速的自适应参数定义方法,先对图像进行卡通纹理分解,再通过对自适应参数的调节反复分解剩余信号得到图像的层级分解。

1 基于算子的信号分解算法

在信号模型中,窄带信号通常可以表示为

$$S = A(t) \cos(\omega t + \varphi(t)) \quad (2)$$

式中, $A(t)$ 的频率远小于 ω , $\varphi(t)$ 为相函数。对于实际信号,可以将其局部近似为这种窄带信号,称为局部窄带信号。局部窄带信号可被某些算子 T_s 所刻画,使得 $T_s(S)(t) = 0$, 即 $S \in \ker(T_s)$, $\ker(T_s)$ 表示 T_s 的零空间。针对局部窄带信号引入两类奇异线性算子:

1) 积分算子,表示为 $T_s(S)(t) = \int_{\Omega} S(x) dx$, 式中 Ω 为积分区间。把满足 $T_s^n(S)(t) = 0$ 的信号称作第 1 类局部窄带信号,这类信号表现为信号的局

部均值为 0。

2) 微分算子,表示为 $T_s(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \alpha(k) \frac{\partial^k}{\partial t^k}$, 式中 $\alpha(k) \in L_2$, L_2 表示平方可和函数空间。一个微分算子的具体例子是 $T_s(t) = \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 1$, 可知 $T_s(S)(t) = 0$ 的解即为式(2)的形式。同样把满足 $T_s^n(S)(t) = 0$ 的信号称为第 2 类局部窄带信号,这类信号可以局部近似为一调和函数。

对于式(1),考虑简单情况,即当 $k=1$ 时,分解问题相当于求解最优化问题

$$R = \arg \min \{ \|T_s(S - R)\|^2 + \lambda \|D(R)\|^2 \} \quad (3)$$

式中, D 为针对剩余信号的正则算子, λ 为调节参数。最优化问题式(3)的解析解为 $\bar{R} = (T^* T + \lambda D^* D)^{-1} T^* T S$ 。

针对积分算子及 $k=1$ 的情况,对 1 维信号分解步骤如下(算法 1):

- 1) 初始化:窗口 Ω 的大小,原信号 S ;
- 2) 计算信号 S 每个时刻在 Ω 内的均值矩阵 A , 以及微分矩阵 D ;
- 3) 选择合适的 λ 计算 $R = (A^* A + \lambda D^* D)^{-1} A^* A S$;
- 4) 计算局部窄带信号成分 $S_1 = S - R$ 。

通过算法 1 可以得到剩余信号 R 以及针对参数 λ (经验给出)落入算子零空间的信号成分(即第一类局部窄带信号) S_1 。图 1 是一个对 1 维实际信号应用算法 1 的分解结果。

分解结果表明,对于固定选取的 λ ,被算子所刻画的信号(局部窄带信号)属于震荡信号成分,而剩余信号则是原信号的平滑逼近。由于图像的纹理成分多表现出震荡性,对于一部分细纹理图像,在局部也近似表现为均值为 0 的特点,故纹理成分一定程度上也可以由积分算子刻画,并将其分解到第 1 类算子的零空间,而图像的卡通成分则被保存在剩余信号中。这样,图像中的纹理成分就可以获得一种新的描述方式,即积分算子刻画。为此,将这种 1 维信号的分解算法应用于图像的卡通纹理分解及层级分解。

2 基于算子的图像卡通纹理分解

2.1 分解模型

现在主要针对图像信号 f 应用模型式(1)进行分解。考虑简单情况,把模型式(1)简化为 $k=1$ 的情形,即

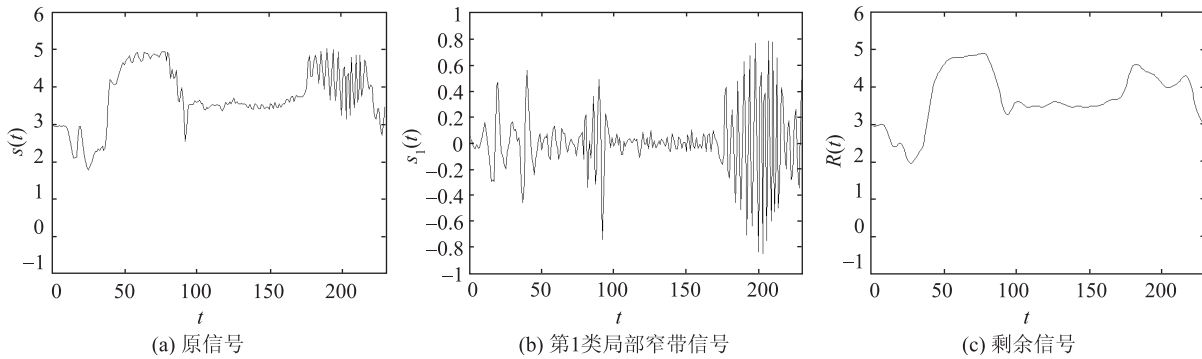


图1 算法1分解信号的一个例子

Fig. 1 An example of signal decomposition by algorithm 1

$$S(t) = S_1(t) + R(t) \quad (4)$$

式中, $S_1(t) = T_s(S)(t)$, $R(t)$ 为剩余信号。如果从图像形态学分解的角度看, 式(4)也可看成一种图像的卡通纹理分解方式, $S_1(t)$ 对应图像的纹理成分 v , $R(t)$ 对应图像的卡通成分 u 。于是纹理成分 v 被算子所刻画, 剩余信号被归属为卡通成分可作进一步分解。从基于泛函的图像分解方法中可以知道, 卡通和纹理成分分别对应的函数空间 $U \cap V \neq \emptyset$, 同时在视觉上, 不同尺度下卡通和纹理成分也不存在绝对的区别, 所以原则上要想彻底的分离开两种成分几乎不能做到, 只能通过调节正则参数 λ 用于实际求解。因此, 转化为基于算子的模型可以描述为求解式(5)所表达的最优化问题。

$$[u, v] = \arg \min \{ \|T_s(v)\|^2 + \lambda_s \|D(u)\|^2 : f = u + v \} \quad (5)$$

由于图像是2维信号, 为使图像能类似于1维信号的处理, 可以对图像进行分块处理, 将图像分解成一系列子图像块, 如图2所示。再把每个子图像块系列化为一个1维信号以适合于算法的处理, 这样做

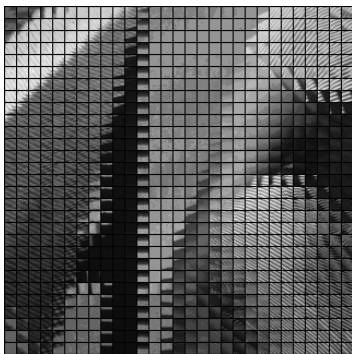


图2 图像分块(块大小为8×8,重叠2个像素)

Fig. 2 Image blocks (block size is 8×8, overlapping two pixels with neighboring blocks)

可以对同一区域(如包含纹理的区域)选择一致的分解参数。为了消除图像块在分解过程中出现的边界效应, 可以采取块间重叠的措施。在模型式(5)中 λ_s 的下标 s 表示它是由实际信号估计得到。故在阐述具体步骤之前先给出模型式(5)中自适应参数 λ_s 的定义。

2.2 自适应参数 λ_s 的确定

为了使模型式(5)对实际图像信号具有自适应性, 应该结合图像信号的局部性质使 λ_s 自适应确定。为了保证求解自适应参数的快速性, 同时考虑图像的卡通纹理成分的一般特点, 即在卡通区域, 由于图像比较光滑, 局部的全变差较小, 并且在低通滤波后图像局部全变差也变化不大, 而纹理区域由于图像震荡信息的存在使得局部全变差较大, 同时在低通滤波后得到的图像局部全变差变化也较大, 定义局部全变差算子 K 用于统计图像局部的全变差, 即

$$K(f) = \int_w |Df| \quad (6)$$

式中, w 为局部全变差的窗口大小, $\int |Df|$ 为TV空间的范数定义, 也即BV空间的半范数。再定义局部全变差变化率 μ_ξ 计算图像在滤波前后局部全变差的变化率

$$\mu_\xi = \frac{K(f) - K(L_\xi * f)}{K(f)} \quad (7)$$

式中, L_ξ 为一低通滤波器算子, 由之前的分析可知 μ_ξ 满足 $0 \leq \mu_\xi \leq 1$ 。图像在卡通处 μ_ξ 较小, 而纹理处 μ_ξ 较大(见图3), 可以作为自适应参数简单快速的计算方法, 定义为

$$\lambda_s = C\mu_\xi \quad (8)$$

式中, C 为常数, 在图像层级分解中可以作为尺度

因子改变。选择该方法确定自适应参数是为了配合之前对图像分块处理的方法,即式(6)中窗口大小 w 的选择应与分块大小(不包含重叠部分)保持一致。



图3 局部全变差变化率,亮的地方代表大的值

Fig. 3 The change rate of local total variation, the bright place indicates large value

2.3 本文算法步骤

基于上述方法,基于算子的图像分解算法的一般步骤描述如下(算法2):

- 1) 初始化,图像 f , 滤波截止频率 ξ , 图像块的大小 w , 自适应参数常数项 C ;
- 2) 将图像分解为一系列大小为 w 的图像块 f_i ;
- 3) 计算每个图像块 f_i 的全变差变化率 $\mu_{\xi,i}$;
- 4) 以行为顺序将每个图像块系列化,得到一系列1维信号 s_i ;
- 5) 对每个1维信号 s_i , 以 $C\mu_{\xi,i}$ 为自适应参数,用算法1进行分解;
- 6) 将步骤4)中分解结果转化为图像块,得到图像块卡通和纹理成分;
- 7) 以列为顺序系列化步骤5)中各图像块的纹理成分,用算法1再次分解;
- 8) 将步骤6)中分解结果转化为图像块,得到图像块最终的卡通和纹理成分 u_i, v_i ;
- 9) 综合每个图像块分解结果得到最终整个图像分解结果。

算法2中的主要计算时间在步骤3)5)7)。计算每个图像块的局部全变差变化率涉及两次滤波过程,算法1涉及 A, D 矩阵的构造及矩阵的乘法和求逆运算,对于一个稠密的 k 阶矩阵乘法或求逆运算时间复杂度一般为 $O(k^3)$ 。假设实际待处理图像块大小为 $a \times b$, 块间重叠像素为 r , 即窗口大小变为 $(a+2r) \times (b+2r)$, 于是系列化为1维信号的长度为 $l = ab + 2ar + 2br + 4r^2$, 则对于一个图像块的时间

复杂度为 $O(l^3)$, 如果图像大小为 $m \times n$, 则可以得到子图像块总数为 $\lceil mn/ab \rceil$, 总的时间为 $O(mnl^3/ab)$ 。由于 l^3/ab 针对具体确定的图像块大小可近似为常量, 于是总的时间复杂度约为 $O(mn)$ 。

2.4 实验分析

对每一幅图像 f, w 的选择通常较小, 主要保证 λ 能更好体现卡通区域和纹理区域的区别。为了一定程度消除块效应及分解过程产生边界效应, 采取块间重叠的方式对图像进行分块。计算自适应参数 λ 时, 若考虑块间的平滑性, 可以考虑用相邻块间加权的求解方法, 即让块间的自适应参数平滑的改变, 为了简便性, 实验未采用这种方法, 而使用每个图像块各自的自适应参数。实验中, 局部全变差算子的窗口大小 (w) 选择为 16×16 , 其中相邻块重叠像素 $r = 5$, 滤波器采用二阶巴特沃斯低通滤波器, 截止频率 $\xi = 100$ 。图4对比了 $TV + G^{[3]}$ 、Curvelets + DCT^[7] 及本文算法分解结果。

从实验结果看, 3种方法都有效地分离了卡通和纹理成分。在具体细节上, 前两种方法都没能很好地将主要结构信息保留在卡通成分中, 同时在卡通成分中分解得到了一些“颗粒状”的高频信息而使纹理成分看起来较为杂乱。本文算法分解结果中, 平滑结构信息被很好地分解到了卡通成分中, 同时得到的纹理信息从视觉上看较为干净, 尽管本文算法分解结果中一部分结构信息仍保留在纹理成分中, 但总体的分解效果优于前两种方法。在算法的运行时间上, 本文算法比前两种算法更快, 原因是前两类方法在实际求解过程中使用了重复迭代或贪婪搜索的方法求解, 大大增加了算法求解的时间, 而基于算子的分解方法直接转化为求解最优化问题式(5), 给出了解析解, 使算法较其他方法简便快速。表1给出了同一仿真平台(Matlab R2010a, Core 2 Duo CPU T6570 2.10 GHz, 2 G 内存)下3种方法的运行时间对比。

3 图像的层级分解

在以上基于算子的图像卡通纹理分解算法中, $C\mu_{\xi}$ 作为自适应参数一定程度上区别了卡通纹理成分, 保证了分解结果在视觉上的一致性。同时自适应参数中的常数 C 可以转变为图像层级分解的尺度参数, 也即使整个自适应参数 $C\mu_{\xi}$ 转变为尺度参数。

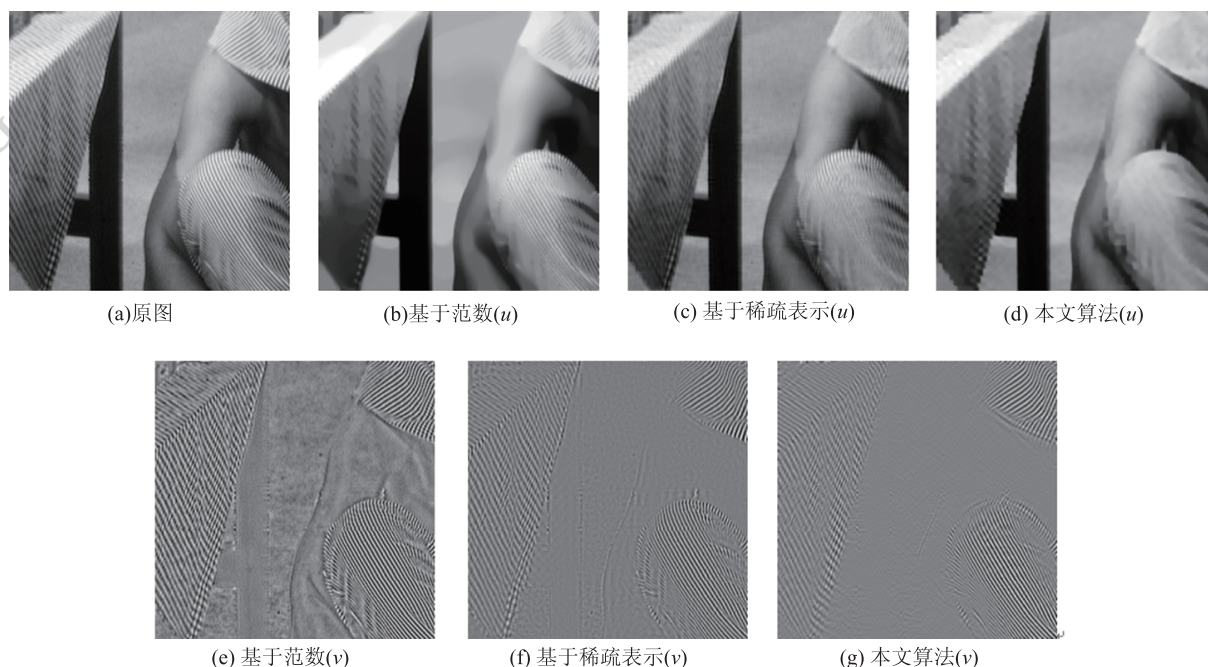


图4 3种方法的分解结果

Fig. 4 Decomposition results by three methods

表1 3种方法运行时间对比

Table 1 execution time comparison of three methods

算法	TV + G	Curvelets + DCT	本文算法
时间/s	374	575	81

回到模型式(1),并针对图像信号,当 $k > 1$ 时,模型就为一个图像层级分解模型,针对第 i 次分解,尺

度参数标记为 C_i ,通过不断调节尺度参数 C_i ,对分解得到的剩余信号再次分解,重复这个过程,得到一系列尺度不一样的纹理图像,表示为 $f \approx u + \sum_i v_i$, i 为分解的次数。实验中为了体现尺度的差别,对相邻尺度定义 $C_i = 10^{-1} C_{i-1}$ 。实验对 Barbara 局部和 Lena 图像的分解结果(分解层数为4)如图5、图6。

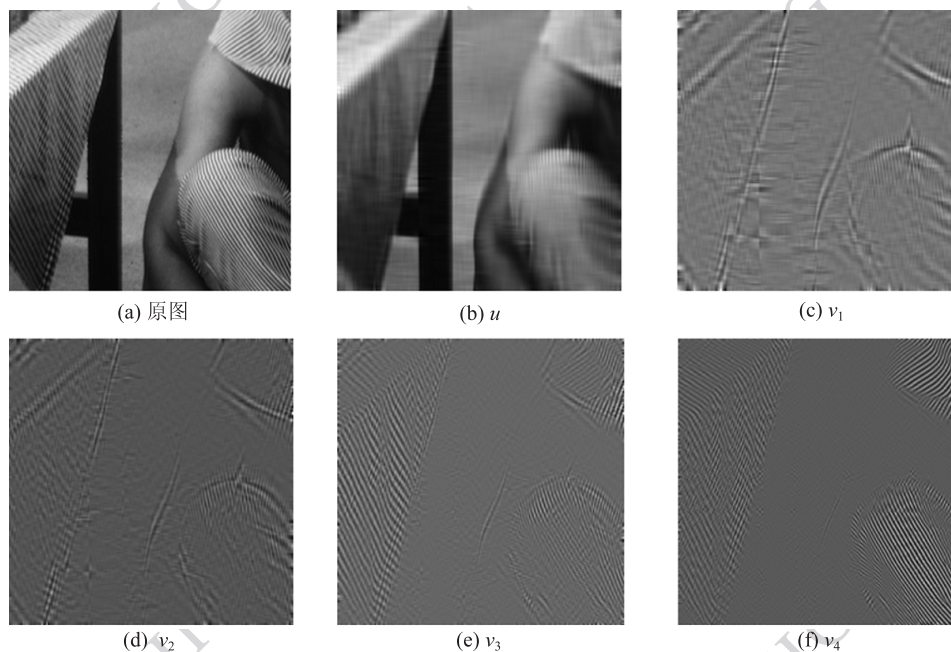


图5 Barbara 局部图像的层级分解

Fig. 5 The hierarchical decomposition of local image of Barbara

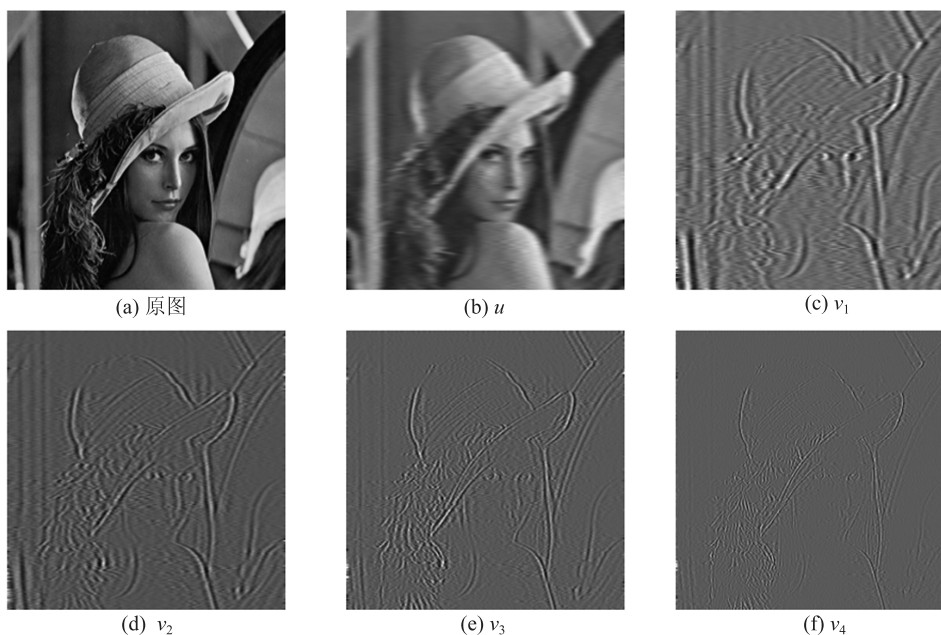


图 6 Lena 图像的层级分解

Fig. 6 The hierarchical decomposition of Lena

从实验结果来看,图像分解得到的纹理成分随分解次数的增加逐渐精细。实际上,由模型式(5)可知在 λ_s 变小的情况下,卡通成分 u 获得更大的权重,于是之前更大尺度下属于纹理成分 v 中一部分成分此时被分解到卡通成分 u ,也即被算子刻画成分变少,得到的纹理成分也越精细,剩余部分则是更小尺度下的卡通成分。这样,通过调节尺度参数 C_i 分解剩余信号就达到了层级分解的目的,同时将各层级相加就能重构原图像。

4 结 论

基于算子的信号分解方法可以有效地把 1 维信号分解到两类奇异线性算子的零空间,这种分解方法可以有效地应用到 2 维图像信号的卡通纹理分解,使分解得到纹理成分得到具体算子的刻画,这是从算子的思想角度对图像中所包含成分的一种新认识,为更好地认识图像(主要对纹理成分的认识)提供了一条新思路。为了把图像转变为 1 维信号,采用对图像分块处理的方法,将图像块系列化为 1 维信号,并结合卡通纹理图像的一般特点,用局部全变差变化率作为自适应参数选择的依据,对图像块进行分解,最后综合各图像块的分解结果得到整个图像的分解结果,为了一定程度克服块效应,采取了块间重叠的措施。同时,把自适应参数当成尺度因子,

层级调整尺度因子,反复对剩余信号分解,最后实现了图像的层级分解,对具体图像分解验证了算法的有效性。本文是从 2 维图像信号转化为 1 维信号的角度,用 1 维信号的分解方法分解 2 维图像信号,难免存在局限性,同时对图像纹理信息的认识目前还是图像处理领域的热点及难点,本文只是对一部分包含细纹理的图像进行实验,对其他纹理特点如方向性等未做深入考察,但用具体算子刻画图像信号中不同成分的思想有待深入研究,下一步工作将纯粹从 2 维信号的角度出发构建图像分解算法。

参考文献(References)

- [1] Meyer Y. Oscillating Patterns in Image Processing and Nonlinear Evolution Equations [M]. Boston, MA, USA: American Mathematical Society, 2001:30-42.
- [2] Aujol J F, Aubert G, Blanc-Feraud L, et al. Image decomposition into a bounded variation component and an oscillating component [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2005, 22(1):71-88.
- [3] Vese L, Osher S J. Modeling textures with total variation minimization and oscillating patterns in image processing [J]. Journal of Scientific Computing, 2003, 19(1):553-572.
- [4] Aujol J F, Gilboa G, Chan T, et al. Structure-texture image decomposition—modeling, algorithms, and parameter selection [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 67(1):111-136.

- [5] Baudes A, Le T, Morel J M, et al. Fast cartoon + texture image filters [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(8) : 1978-1986.
- [6] Athavale P, Tadmor E. Integro-differential equations based on (BV, L1) image decomposition [J]. SIAM Journal on Imaging Science, 2011, 4(1) : 300-312.
- [7] Fadili M J, Starck J L, Bobin J, et al. Image decomposition and separation using sparse representations: an overview [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6) :983-994.
- [8] Rubinstein R, Bruckstein A M, Elad M. Dictionaries for sparse representation modeling [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6) :1045-1057.
- [9] Aharon M, Elad M, Bruckstein A M. The K-SVD: an algorithm for designing of overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11) : 4311-4322.
- [10] Bergeaud F, Mallat S. Marching pursuit of images [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1995, 1:53-56.
- [11] Pati T C, Rezahfar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition [C]//Proceedings of the 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1993, 1:40-44.
- [12] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1) :33-61.
- [13] Peng S L, Hwang W L. Adaptive signal decomposition based on local narrow band signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(7) : 2669-2676.