

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 9  
Vol.17 No.

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

2012年9月 第17卷 第9期(总第197期)

## 目次

### 图像处理和编码

- 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建 ..... 朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾(1049)
- 亮度补偿变换矩阵的颜色恒常性算法 ..... 袁兴生, 王正志(1055)
- 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪 ..... 李慧斌, 刘峰(1061)
- 基于运动信息自适应的快速运动估计算法 ..... 李子印, 杨齐(1069)
- 融合纹理特征的两阶段聚类分割算法 ..... 王改华, 李德华(1075)
- 利用纹理和边缘特征的 Criminisi 改进算法 ..... 任澍, 唐向宏, 康佳伦(1085)

### 图像分析和识别

- 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法 ..... 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦(1092)
- 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测 ..... 姜明新, 王洪玉, 蔡兴洋(1102)
- 结合局部特征和全局信息的自适应活动轮廓模型 ..... 朱晓舒, 孙权森, 夏德深(1109)
- 高斯颜色模型在瓷片图像分类中的应用 ..... 郑霞, 胡浩基, 周明全, 樊亚春(1115)
- 区域生长的轮对图像分割 ..... 史倩, 吴开华(1122)
- 图像搜索结果的滑动窗口多标记传播聚类 ..... 谷瑞军, 陈圣磊, 陈耿, 汪加才(1128)

### 图像理解和计算机视觉

- 中介相似性量度的图像匹配 ..... 周宁宁, 吕文杰(1135)
- 自适应字典学习的多聚焦图像融合 ..... 严春满, 郭宝龙, 易盟(1144)
- 摄像机几何约束及人体定位 ..... 陶霖密, 于亚鹏, 邸慧军, 孙洛(1150)

## 虚拟现实与增强现实

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整 ..... 王丹华, 卢威, 潘金贵(1158)

## 医学图像处理

结合形状与纹理特征的椎间盘退化辅助诊断 ..... 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿(1168)

改进的核磁共振图像分割与偏移场恢复耦合模型

..... 王顺风, 冀晓娜, 张建伟, 陈允杰, 方林, 詹天明(1175)

## 遥感图像处理

光学遥感图像低可观测区域舰船检测 ..... 周伟, 关键, 何友(1181)

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

..... 金星, 李晖晖, 时丕丽(1188)

“计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 ..... (1196)

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第9期

2012年9月16日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

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

北京9718信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-64807995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第0346号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 9 September 2012

## Contents

### Image Processing and Coding

- Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction  
..... Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian(1049)
- Color constancy algorithms with luminance-compensation transform matrix ..... Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi(1055)
- Hybrid image denoising method based on wavelet transform as well as on a sparse and redundant representations model  
..... Li Huibin, Liu Feng(1061)
- Fast motion estimation algorithm based on motion information adaptation ..... Li Ziyin, Yang Qi(1069)
- Texture feature fusion-based two-stage clustering segmentation algorithm ..... Wang Gaihua, Li Dehua(1075)
- Improved Criminisi algorithm with the texture and edge features ..... Ren Shu, Tang Xianghong, Kang Jialun(1085)

### Image Analysis and Recognition

- Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding  
..... Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi(1092)
- Early smoke detection based on codebook model and multiple features ..... Jiang Mingxin, Wang Hongyu, Cai Xingyang(1102)
- Adaptive active contour model integrating global and local image fitting energy ..... Zhu Xiaoshu, Sun Quansen, Xia Deshen(1109)
- Porcelain shard images classification based on Gaussian color model ..... Zheng Xia, Hu Haoji, Zhou Mingquan, Fan Yachun(1115)
- Image segmentation for wheel set measurement based on region growing ..... Shi Qian, Wu Kaihua(1122)
- Sliding window multi-label propagation clustering for searched images  
..... Gu Ruijun, Chen Shenglei, Chen Geng, Wang Jiakai(1128)

### Image Understanding and Computer Vision

- Image matching based on the medium similarity measure ..... Zhou Ningning, Lv Wenjie(1135)
- Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method ..... Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng(1144)
- Geometric constraints of locating cameras and people ..... Tao Linmi, Yu Yapeng, Di Huijun, Sun Luo(1150)

### Virtual Reality and Augmented Reality

- Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models  
..... Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui(1158)

### Medical Image Processing

- Computer aided diagnosis on intervertebral disc degeneration with shape and texture features  
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong(1168)
- Improved coupled model for MR images segmentation and bias restoration  
..... Wang Shunfeng, Ji Xiaona, Zhang Jianwei, Chen Yunjie, Fang Lin, Zhan Tianming(1175)

### Remote Sensing Image Processing

- Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery ..... Zhou Wei, Guan Jian, He You(1181)
- SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform  
..... Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili(1188)

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)09-1144-06

论文引用格式: 严春满, 郭宝龙, 易盟. 自适应字典学习的多聚焦图像融合[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(9): 1144-1149.

## 自适应字典学习的多聚焦图像融合

严春满, 郭宝龙, 易盟

西安电子科技大学智能控制与图像工程研究所, 西安 710071

**摘要:** 基于人类视觉系统及信号的过完备稀疏表示理论, 提出一种新的多聚焦图像融合算法。首先从待融合图像中随机取块构成训练样本集, 经迭代运算获取过完备字典; 然后由正交匹配追踪算法完成图像块的稀疏分解; 再按分解系数的显著性选择融合系数并完成图像块的重构; 重构块经重新排列并取平均后获得最后的融合图像。实验结果表明: 该算法继承了目前较为优秀的多尺度几何分析方法的融合效果; 在噪声存在的情况下, 该算法表现出较好的噪声抑制能力, 随噪声方差的升高, 融合图像的主观质量及客观评价指标均要好于传统方法。

**关键词:** 图像融合; 多聚焦图像; 稀疏表示; 正交匹配追踪

## Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method

Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng

Institute of Intelligent Control and Image Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

**Abstract:** A novel multi-focus image fusion algorithm based on image sparse representation theory and on the Human Visual System is introduced in this paper. For the new algorithm, the related images are partitioned into image patches. The learning for an adaptive dictionary is implemented by an iterated processing. All image patches are decomposed by the orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm, and the coefficients with prominent properties are selected for image patch reconstruction. The reconstructed patches are realigned according to their partition order and the overlapped patches are averaged to get the fused image. The experiment results demonstrate that the proposed algorithm maintains the property of the state-of-the-art typical algorithm. In addition, with a noisy input, the proposed method can generate noiseless results and the objective criteria outperform the typical algorithm when noise variance increasing.

**Key words:** image fusion; multi-focused image; sparse representation; orthogonal matching pursuit

## 0 引言

图像融合技术可广泛应用于军事、遥感、机器人及计算机视觉等领域。普通光学系统受景深的限制, 很难获得全景清晰的图像, 多聚焦图像融合技术可较好地解决这一问题。多聚焦图像融合是指将同一场景不同聚焦情况下获得的多幅图像综合成一幅

全景相对清晰的图像的过程。通过综合利用不同图像之间的互补信息和冗余信息, 可获得对该场景更为全面、准确的描述。

一般图像融合系统按其层次可分为3种类型: 像素级、特征级及决策级融合。依据多聚焦图像的成像机理, 像素级的变换域融合方法获得了较好的效果<sup>[1]</sup>。传统的变换域分解方法通常是非冗余的正交变换, 如离散余弦变换、小波变换等。近半个世

收稿日期: 2011-12-05; 修回日期: 2012-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61105066, 61003196); 中央高校基本科研业务费专项资金(K50510040007)

第一作者简介: 严春满(1970—), 男, 现为西安电子科技大学电路与系统专业博士研究生, 主要研究方向为图像处理、模式识别等。

E-mail: yanacha02@163.com

纪以来,小波变换在信号处理等领域取得了令人瞩目的成果。小波分析在处理低维信号的点奇异性时表现出良好的时空局部性特点,但对图像结构中的直线和曲线奇异性,小波变换的系数并不是最稀疏的。那么,从信号稀疏逼近的有效性来讲,近年来发展起来的多尺度几何分析方法,如 Curvelet、Contourlet、非下采样 Contourlet (NSCT) 等都强调<sup>[2]</sup>,基函数应该具有如下特点:1)方向性(Orientation),2)各向异性(Anisotropy),3)多尺度(Multiscale),4)局部性(Localization)等。这类基函数的特性恰好与人类视觉系统 V1 区神经元细胞的感受野特性相符合,可有效捕获图像信号中的几何结构信息,取得了优于小波变换的图像处理效果,故这类方法也称为超小波变换(Beyond Wavelet)。随着多尺度几何分析方法的发展,其应用于图像处理包括图像融合领域的算法也相当丰富,如文献[3]基于 Curvelet 变换的图像融合,文献[4]基于 Contourlet 变换的图像融合,文献[5-6]基于 NSCT 的图像融合等。近年来,新的冗余基函数的研究成为信号稀疏逼近领域的研究热点。在多尺度几何分析的基础上,一种基于自适应字典学习的算法也越来越引起学者的注意,如在线字典学习算法<sup>[7]</sup>,KSVD 算法<sup>[8]</sup>,Group Sparse 算法等<sup>[9]</sup>。

为研究并开发一种新的图像融合算法,除引入新的信号表示理论外,实际应用中算法的适应性及鲁棒性也应予以考虑。以噪声为例,图像在获取、传输等过程难免会受到噪声的干扰,新算法的噪声鲁棒性须给予重视。小波变换对信号的点奇异性较为敏感,当图像中存在噪声的时候,噪声的点奇异性同样会在小波系数中反映,那么以变换域系数显著性为融合规则的算法中,噪声点不可避免地会融入图像,影响最终的融合质量;多尺度几何分析方法取得了优于小波变换的图像融合效果,具有一定的噪声鲁棒性,但这类方法的基函数是固定的,对于复杂多样的图像而言,其适应性也有待提高。基于此,本文在近年来信号稀疏表示理论的研究基础上,提出一种自适应字典(基函数集)学习的多聚焦图像融合算法。由于分解系数的稀疏性及能量集中性,新算法可获得比传统小波变换及多尺度几何分析方法更好的融合效果;其次,在正交匹配追踪算法实现图像块稀疏编码的过程,其能量函数的优化过程可抑制图像块中的噪声,使得新算法具有较好的噪声鲁棒性,算法适应性也进一步提高。

## 1 图像的过完备稀疏表示

近年来,信号稀疏表示理论的研究取得了很大的进展。新理论的基本思想是用称之为过完备的冗余基函数取代传统的小波基及固定基。基函数(字典中的原子)的构造没有任何限制,但基函数的选择应尽可能符合图像自身的内在结构。从基函数中选择最佳的  $m$  项组合来表示一个信号,被称为信号的稀疏表示或高度非线性逼近<sup>[10]</sup>。可见,高度非线性逼近理论包含两个层次:其一是根据信号的特点构造一个最好的原子库(字典),其二是从字典中找到最佳的  $m$  项线性组合。信号的稀疏分解过程实际上是一种逼近过程,即

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_m + \mathbf{x}_r = \sum_{k=0}^m \langle \mathbf{R}^k \mathbf{x}, \mathbf{d}_k \rangle \mathbf{d}_k + \mathbf{R}^m \mathbf{x} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_m$  为原信号  $\mathbf{x}$  的逼近信号, $\mathbf{x}_r$  为残余分量; $\mathbf{d}_k$  为给定过完备字典  $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{m \times k}$  中的一个原子, $\langle \mathbf{R}^k \mathbf{x}, \mathbf{d}_k \rangle$  为信号在原子  $\mathbf{d}_k$  上的投影,构成信号在过完备字典  $\mathbf{D}$  上的系数分量  $\mathbf{a}$ , $\mathbf{R}^m \mathbf{x}$  对应残差分量  $\mathbf{x}_r$ 。

从能量最优的角度分析,总是希望在逼近误差  $\mathbf{x}_r$  达到最小的情况下获得系数分量  $\mathbf{a}$  最稀疏的解。这一过程的求解等同于优化问题

$$\text{Min } \|\mathbf{a}\|_p \quad \text{s. t.} \quad \left| \sum_{k \in \Omega_m} \mathbf{d}_k \mathbf{a}_k - \mathbf{x} \right|_2 \leq \varepsilon \quad (2)$$

式中, $\|\mathbf{a}\|_p$  是系数  $\mathbf{a}$  的  $p$  范数。而从基函数的最优组合角度,即稀疏分解来讲,对这一问题的求解有匹配追踪(MP)算法,以及其改进和发展算法有基追踪算法(BP)、正交匹配追踪(OMP)算法等。近年来各种解决此类优化问题的算法也不断发展<sup>[11-12]</sup>。Gribonval 等人对匹配追踪算法在理论上进行了相应的证明<sup>[13]</sup>,使其在信号稀疏分解的理论及应用方面得到进一步完善。本文亦选择较成熟的 OMP 算法完成图像的稀疏分解。

对 2 维图像,在 OMP 算法完成稀疏分解的过程,考虑算法的收敛速度,须先对源图像随机分块,由块数据按列向量构造样本集  $\mathbf{X}$ , $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ , $\mathbf{X}$  的大小为  $M \times N$ ,其中  $M$  为样本大小,也即块大小, $N$  为样本数量。结合 OMP 算法及字典更新算法,在满足均方误差最小的意义下,通过反复迭代运算,可获得样本集  $\mathbf{X}$  的过完备字典及其系数表示。其等同于求解优化方程

$$\hat{\mathbf{a}} = \underset{\mathbf{a}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{a}\|_0 \text{ s. t. } \|\mathbf{D}\mathbf{a} - \mathbf{x}\| \leq T \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{x}$  对应样本集  $\mathbf{X}$  的每一列,  $T$  为阈值, 用以控制样本的近似程度。在 KSVD 算法的基础上<sup>[8]</sup>, 这里给出迭代运算过程如下:

#### 1) 初始化阶段

用给定的 DCT 字典初始化超完备字典(原子库)  $\mathbf{D}^0, \mathbf{D}^0 = \{\mathbf{d}_k^0; k=1, 2, \dots, K\}$ , 其大小为  $M \times K$ ,  $K$  为字典规模。

2) 迭代运算(设  $j$  为迭代次数, 初始  $j = 1$  并令  $\mathbf{D}^j = \mathbf{D}^0$ )

(1) 稀疏编码, 采用 OMP 算法, 将  $\mathbf{X}$  中的每一样本在  $\mathbf{D}^j$  上进行稀疏分解, 获得信号在字典  $\mathbf{D}$  上的稀疏矩阵  $\mathbf{A}, \mathbf{A} = \{\mathbf{a}_k\}$ , 其大小为  $K \times N$ , 其中  $\mathbf{a}_k$  为对应样本块的稀疏系数。

(2) 字典更新, 对  $\mathbf{D}$  中的每一原子  $\mathbf{d}_k^j$  逐个更新:

① 选出  $\mathbf{d}_k^j$  所对应的系数矩阵中不为 0 的元素, 获得集合  $\omega_l = \{(k, i) | a_{ki}(l) \neq 0\}$ ;

② 获得  $\omega_l$  对应的样本子集  $\Omega_k^j = \{\mathbf{x}_i | a^j(k, i) \neq 0, i=1, 2, \dots, N\}$ , 及系数子集  $\mathbf{A}_k^j = \{\mathbf{a}_i^j | a^j(k, i) \neq 0, i=1, 2, \dots, N\}$ ;

③ 计算残差矩阵  $\mathbf{E}_k^j = \Omega_k^j - \mathbf{D}^j \mathbf{A}_k^j$ ;

④ 构造更新算子  $\nabla$ ;

⑤ 更新原子  $\mathbf{d}_k^{j+1} = \nabla(\mathbf{d}_k^j)$ , 所有原子更新后, 令  $j = j + 1$ , 重复步骤(1)、(2)直至到达最大迭代次数, 获得样本集  $\mathbf{X}$  的稀疏编码矩阵  $\mathbf{A}$  及自适应字典  $\mathbf{D}$ 。

上述步骤中, 更新算子的构造较为关键, 其选择应能保证算法的收敛。典型的更新算子有梯度下降法、最速下降法及 KSVD 算法等。由于 KSVD 算法较好的收敛速度及图像处理效果<sup>[8]</sup>, 本文采用 KSVD 算法实现原子更新, 其主要思想是对残差矩阵做奇异值分解, 即实现  $\mathbf{E}_k^j = \mathbf{U}\Delta\mathbf{V}^T$ , 然后用  $\mathbf{U}$  矩阵的第 1 列更新原子  $\mathbf{d}_k^j$ 。

## 2 图像融合

过完备稀疏表示的迭代运算过程可同时获得训练样本的过完备字典及稀疏系数。对图像融合任务而言, 稀疏系数的选择决定最后的融合效果。以两幅已经配准好的多聚焦图像而言, 其具体融合过程如下:

1) 估计输入图像的最大噪声方差  $\sigma^2$ , 令  $T = \lambda\sigma^2$ 。

2) 图像分块 若原子大小设定为  $M, M = n \times n$ , 那么, 需要将待融合图像  $a, b$  分别按照原子大小逐像素分为  $P_1$  及  $P_2$  个  $n \times n$  大小的块(设两幅待融合图像大小相同, 则  $P_1 = P_2 = P$ ), 将块按列向量方式排成样本矩阵  $\mathbf{X}_1$  及  $\mathbf{X}_2$ , 并由  $\mathbf{X}_1$  及  $\mathbf{X}_2$  构成样本集  $\mathbf{F}, \mathbf{F} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2]$ 。

3) 字典学习 从  $\mathbf{F}$  中随机取  $P$  个样本构成新的训练样本  $\mathbf{X}, \mathbf{X}$  的大小为  $M \times N$ , 先对  $\mathbf{X}$  去均值, 然后依照第 1 节的步骤经迭代运算获取自适应字典  $\mathbf{D}$ 。

4) 稀疏编码 将  $\mathbf{X}_1$  及  $\mathbf{X}_2$  在字典  $\mathbf{D}$  上采用 OMP 算法实现稀疏分解, 获得稀疏系数矩阵  $\mathbf{A}_1$  及  $\mathbf{A}_2$ , 其每一列对应一个图像块。

5) 数据融合 将  $\mathbf{A}_1$  及  $\mathbf{A}_2$  采用一定的融合规则选择特征显著性系数作为融合系数  $\mathbf{A}$ 。这里融合规则的选取较为关键, 参考文献[6, 14]的研究结果, 本文以相对高效的“模值取大”为融合规则, 即选取  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$  对应位置绝对值最大的系数作为融合系数。

6) 图像块重构 融合系数与过完备字典的卷积实现块重构, 即  $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{D}\mathbf{A}, \hat{\mathbf{X}} = \{\hat{\mathbf{x}}_l, l=1, \dots, N\}$ ,  $\hat{\mathbf{x}}_l$  为融合后的重构图像块向量。

7) 图像重建 将  $\hat{\mathbf{x}}_l$  恢复为图像块数据、加均值并按照分块时的顺序重新排列, 对重叠块取平均实现图像重建, 获得最后的融合图像  $f$ 。

## 3 实验及分析

### 3.1 变换域方法对比实验

为验证本文算法的性能, 选取多组多聚焦图像完成了算法性能比较实验。多聚焦图像成像机理相似, 各组实验结果也基本一致, 限于篇幅, 这里选取常见的 3 组以供分析。实验图片如图 1 所示, 图中每一列为一组待融合图像, 从左到右依次标记为 Clock、Label 及 Disk 图像。对比算法为小波变换法(DWT)、Contourlet 变换法(CT)及非下采样 Contourlet 变换法(NSCT)。为便于比较, 标记本文算法为 ADL(adaptive dictionary learning)。实验过程中, 本文算法阈值  $T = \lambda\sigma^2$  中的  $\lambda$  取值为 1; 字典更新过程的最大迭代次数取为 5。参考文献[14]的研究结果, 对比算法的融合规则均采用“低频系数取平均, 高频系数按模值取大”。另外, 本文算法实验过程对源图像采用重叠分块的策略, 综合考虑算法效

率及融合结果,经反复实验,按块大小取为 $8 \times 8$ ,块边界重叠2个像素完成图像的分块。图2为3组图像的融合结果。

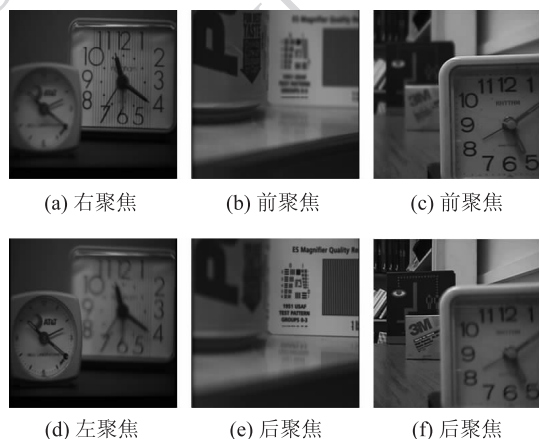


图1 多聚焦图像

Fig.1 Multi-focused image

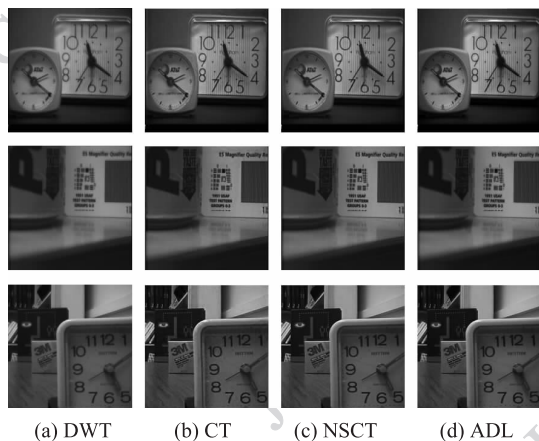


图2 融合结果主观对比图

Fig.2 Comparison of the fused results

为清晰起见,图3特别给出Clock图像的局部放大细节做对比。分析图2可见,各方法均实现了多聚焦图像融合任务。但进一步观察图3可见:DWT方法所获融合图像的清晰度要低于其他方法;CT方法的清晰度要好于DWT方法,但由于图像分解过程中的下采样操作,使得融合图像轮廓周围的虚影现象较为严重;NSCT及本文方法改善了目标轮廓周围的虚影现象,且清晰度较高。

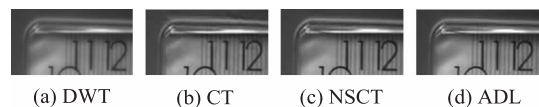


图3 Clock图像融合结果局部对比图

Fig.3 Comparison of the local fused results of image clock

为进一步分析本文方法的性能,在表1列出3组图像融合结果的客观评价指标。这里选择较为常用的边缘及细节保持度 $Q$ 指标及互信息指标 $MI$ <sup>[4,15]</sup>。选择这两个指标的原因是他们均不需要参考图像,且可从细节及信息熵两个角度客观评价融合图像的质量。

表1 不同图像融合结果客观指标

Table 1 Criteria of the fused results of different image

图像	评价指标	融合方法			
		DWT	CT	NSCT	ADL
Clock	$Q$	0.695 4	0.659 1	0.705 9	0.704 1
	$MI$	7.099 2	6.397 2	6.964 6	7.018 9
Label	$Q$	0.656 8	0.703 4	0.743 9	0.742 3
	$MI$	7.203 6	6.600 7	7.256	7.183 1
Disk	$Q$	0.656 2	0.633 6	0.695 1	0.692 2
	$MI$	6.578 1	5.881 1	6.536 2	6.513 1

分析表1数据可见:对Clock及Disk图像,DWT方法的 $MI$ 指标要优于其他方法;而对 $Q$ 指标,NSCT及ADL接近,且对每种图像均要优于其他方法。

综合图2、图3的融合结果及表1的客观指标来看,本文方法要优于传统的DWT变换法及多尺度几何分析方法中的CT变换法,而与较优秀的多尺度几何分析方法中的NSCT变换法的融合结果接近。

### 3.2 算法鲁棒性实验

在3.1节实验中,选取3组常见的多聚焦图像对比了本文方法的性能。从实验结果来看:NSCT是一种较为优异的图像变换工具,可获得较满意的多聚焦图像融合效果;本文方法继承了NSCT方法的优异性,其融合效果与NSCT方法接近,可在一定程度上减弱融合图像边缘的虚影现象,且清晰度较高。

为进一步验证本文方法的性能,考虑到噪声的客观存在,给待融合图像添加不同方差的高斯白噪声,以完成算法噪声鲁棒性测试。实验参数设置同3.1节。实验中测试了多组多聚焦图像,由于多聚焦图像成像机理相似,各组图像的融合表现是一致的,限于篇幅,这里只列举较常见的Clock图像的融合结果以供分析。

图4是噪声方差为5时各方法融合结果的局部

细节放大图。为较全面地分析各算法在噪声环境下的性能,图 5 特别绘制出各算法在不同噪声方差下客观评价指标  $Q$  及  $MI$  曲线。

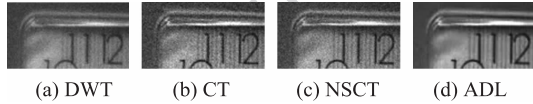
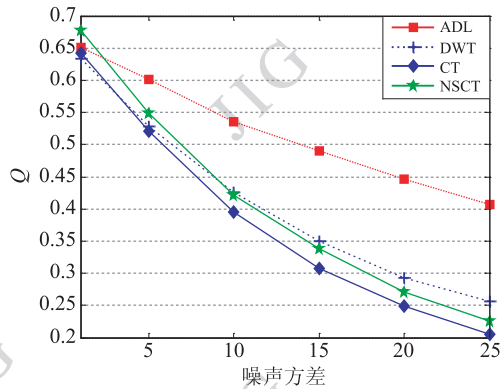
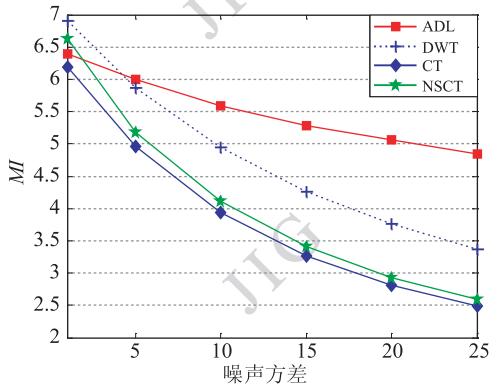


图 4 噪声环境下融合结果局部对比图

Fig. 4 Comparison of local fused results in noise environment



(a)  $Q$  指标对比曲线



(b)  $MI$  指标对比曲线

图 5 噪声环境下融合客观指标对比曲线

Fig. 5 Criteria curves in noise environment

从图 4 融合结果的局部细节来看: DWT、CT、NSCT 方法中噪声仍按其显著性向融合图像传递,算法并不能很好地抑制噪声;本文方法表现出了较好的噪声抑制能力,一定程度上避免了噪声点作为有效信息向融合图像的传递,融合图像的噪声强度明显下降,体现了算法较好的噪声鲁棒性。

分析图 5 对比曲线可以看出,噪声的存在会极大地影响图像融合结果,算法性能下降较为明显。在噪声方差较小的情况下,如噪声方差为 1 时,NSCT 方法的  $Q$  指标最高,DWT 方法的  $MI$  指标最高,这与 3.1 节的实验结果一致;而随着噪声方差的

增大,本文方法的客观指标要优于其他方法,曲线的下降趋势较缓,体现了算法较好的噪声鲁棒性。

## 4 结 论

图像融合技术是图像处理的关键技术之一。目前,图像融合技术已广泛应用在军事、遥感、机器人以及计算机视觉等领域。本文提出一种基于自适应字典学习的多聚焦图像融合方法。实验结果表明,本文方法与多尺度几何分析理论中的 NSCT 方法的融合效果相当;在噪声存在的情况下,本文方法表现出较好的噪声抑制能力,随噪声方差的升高,融合图像的主观质量及客观评价指标均要好于其他对比方法。但由于本文方法需要增加额外的字典学习步骤,使得计算效率要低于 NSCT 方法。在后续工作中,可从字典学习方法、图像融合规则等入手,进一步提高算法的性能。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Z H. Research on pixel-level multi-source image fusion [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005. [李振华. 像素级多源图像融合研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2005.]
- [2] Jiao L C, Tan S. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 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, 31(12A): 1975-1981.]
- [3] Jiang N D, Wang Y N, Mao J X. Using the second generation Curvelet to improve IHS transform merge remote sensing images [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(12): 2376-2382. [蒋年德, 王耀南, 毛建旭. 基于 2 代 Curvelet 改进 IHS 变换的遥感图像融合 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12): 2376-2382.]
- [4] Qu X B, Yan J W, Yang G D. Multifocus image fusion method of sharp frequency localized Contourlet transform domain based on sum-modified-Laplacian [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1203-1212. [屈小波, 闫敬文, 杨贵德. 改进拉普拉斯能量和的尖锐频率局部化 Contourlet 域多聚焦图像融合方法 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1203-1212.]
- [5] Huo G Y, Li Q W, Shi D. Multi-sensor image fusion algorithm considering neighborhood consistency in the nonsubsampled Contourlet transform domain [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(4): 770-776. [霍冠英, 李庆武, 石丹. 一种邻域一致性的 NSCT 域多传感器图像融合算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(4): 770-776.]
- [6] Ma Y J, Xu L Z, Tang M, et al. Remotely sensed images fusion based on non-subsampled Contourlet transform [J]. Journal of

- Image and Graphics, 2008, 13(11): 2209-2216. [马艳军, 徐立中, 汤敏, 等. 遥感图像融合的非采样 Contourlet 变换方法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(11): 2209-2216. ]
- [ 7 ] Mairal J, Bach F, Ponce J, et al. Online learning for matrix factorization and sparse coding [J]. Journal of Machine Learning Research, 2010, 11(1): 19-60.
- [ 8 ] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. The K-SVD: an algorithm for designing of overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [ 9 ] Boureau Y L, Bach F, LeCun Y, et al. Learning mid-level features for recognition [C]//Proceedings of 2010 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, CA USA: IEEE Computer Society, 2010: 2559-2566.
- [ 10 ] Wang J Y, Yin Z K, Zhang C M. Sparse Representation and Primary Applications of Signal and Image [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006: 50-71. [王建英, 尹中科, 张春梅. 信号与图像的稀疏分解及初步应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006: 50-71. ]
- [ 11 ] Xu Z B, Zhang H, Wang Y, et al. L (1/2) regularization [J]. Science China: Information Sciences, 2010, 53(6): 1159-1169.
- [ 12 ] Davenport M A, Wakin M B. Analysis of orthogonal matching pursuit using the restricted isometry property [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(9): 4395-4401.
- [ 13 ] Gribonval R, Vandergheynst P. On the exponential convergence of matching pursuits in quasi-incoherent dictionaries [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(1): 255-261.
- [ 14 ] Na Y, Jiao L C. Image Fusion Methods Based on Mutiresolution Analysis Theory [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007: 83-133. [那彦, 焦李成. 基于多分辨率分析理论的图像融合方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 83-133. ]
- [ 15 ] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure [J]. Electronics Letters, 2000, 36(4): 308-309.