



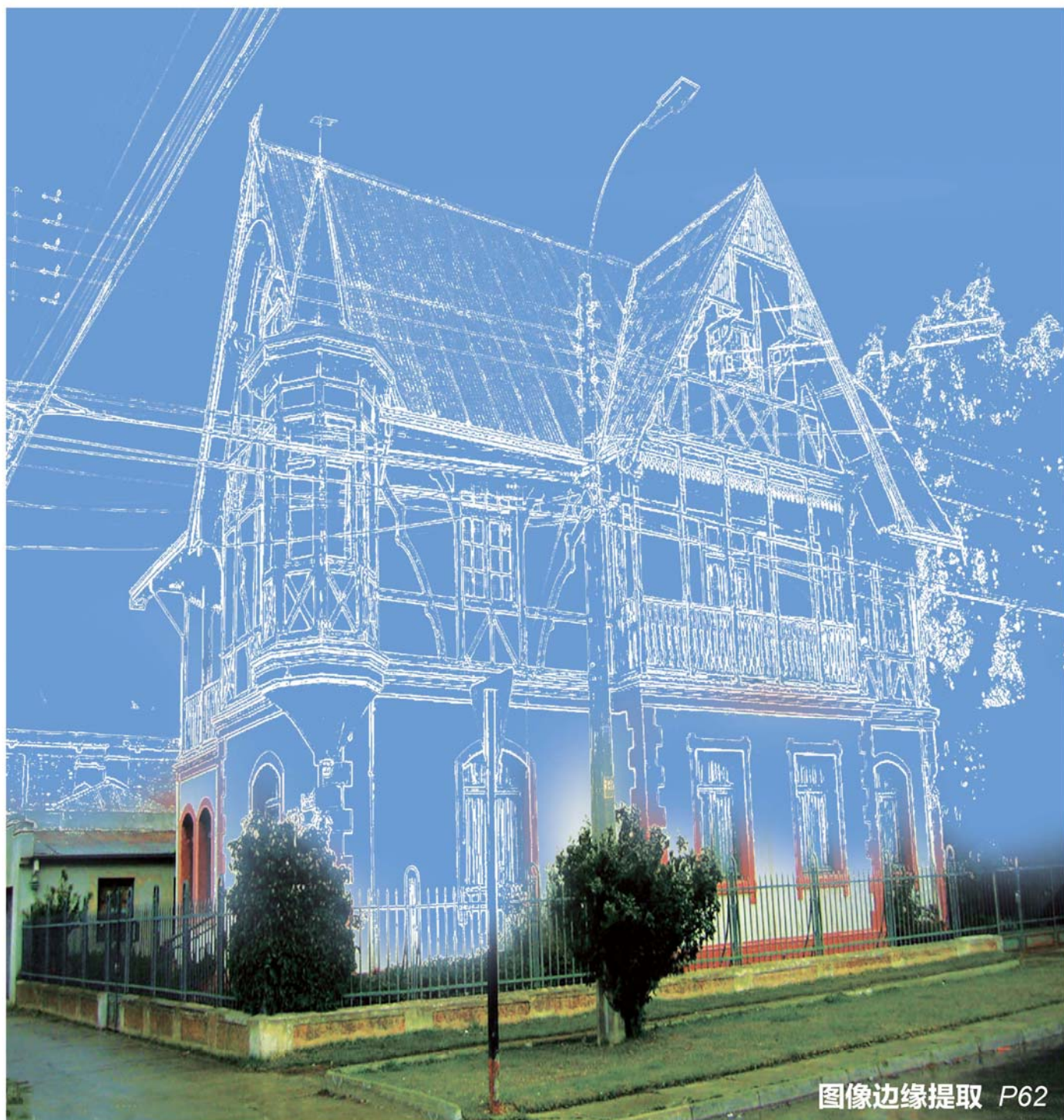
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

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
01
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像边缘提取 P62



第19卷第1期（总第213期）

2014年1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

2013 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

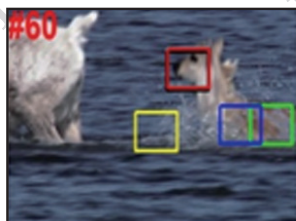
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

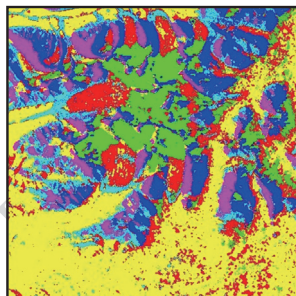
国内定价 50.00元



基于 L_2 范数最小化的实时目标跟踪(第36页)



数字地球渲染中单精度浮点数误差改正(第119页)



全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用(第150页)

图像处理和编码

图像阈值化的自适应粗糙熵方法

吴涛 0001

利用局部极值点特性的多聚焦图像快速融合

杨达, 王孝通, 徐冠雷, 吴俊波 0011

摄像机位姿的高精度快速求解

李书杰, 刘晓平 0020

整数变换实现大容量图像无损信息隐藏

邱应强 0028

图像分析和识别

基于 L_2 范数最小化的实时目标跟踪

齐美彬, 杨勋, 杨艳芳, 陆磊, 蒋建国 0036

利用七宫格的遮挡车辆凹性检测与分割

刘万军, 陈虹宇, 姚雪, 曲海成 0045

基于体素的人手结构自动估测

姚争为, 潘志庚 0054

结合高斯加权距离图的图像边缘提取

贾迪, 孟祥福, 孟琰, 董娜, 方金凤 0062

基于标定的任意半径柱面上2维条形码畸变校正

王伟, 何卫平, 郭改放, 牛晋波, 曹西征 0069

面向惯性约束聚变实验靶图像的快速椭圆检测

吴倩, 邹伟, 徐德, 张峰 0076

融合MBP和EPMOD的人脸识别

闫海婷, 王玲, 李昆明, 刘机福 0085

遮挡目标的分片跟踪处理

张彦超, 许宏丽 0092

图像理解和计算机视觉

多尺度分析的运动注意力计算

刘龙, 樊波阳 0101

多尺度空间判别性概率潜在语义分析的场景分类

季海峰, 高隽, 郑鹏, 王婧 0109

计算机图形学

数字地球渲染中单精度浮点数误差改正

李尚林, 郑利平, 张静, 杨柳青 0119

医学图像处理

小波与双边滤波的医学超声图像去噪

张聚, 王陈, 程芸 0126

Contourlet变换系数加权的医学图像融合

张鑫, 陈伟斌 0133

遥感图像处理

滑坡高分辨率遥感多维解译方法及其应用

鲁学军, 史振春, 尚伟涛, 周和颐 0141

全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用

符思涛, 李震, 田帮森 0150

结合邻域相关影像与最大相关性最小冗余性特征选择的面向对象变化检测

邹利东, 潘耀忠, 朱文泉, 周公器, 李宜展 0158

CONTENTS

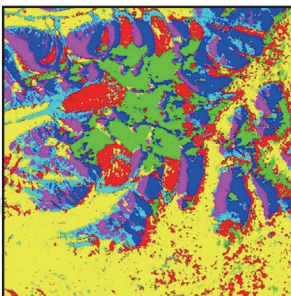
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Real-time object tracking based on L_2 -norm minimization(P36)



Correction method of single-precision floating-point error for digital Earth rendering(P119)



Topographic correction of polarimetric synthetic aperture radar and its application in snow and ice mapping(P150)

Image Processing and Coding

- Adaptive rough entropy method for image thresholding 0001
Wu Tao
- Multi-focus image fusion based on properties of local extrema 0011
Yang Da, Wang Xiaotong, Xu Guanlei, Wu Junbo
- An accurate and fast algorithm for camera pose estimation 0020
Li Shujie, Liu Xiaoping
- Large capacity lossless information hiding in images using integer transform 0028
Qiu Yingqiang

Image Analysis and Recognition

- Real-time object tracking based on L_2 -norm minimization 0036
Qi Meibin, Yang Xun, Yang Yanfang, Lu Lei, Jiang Jianguo
- Detection and segmentation of occluded vehicles based on seven grids 0045
Liu Wanjun, Chen Hongyu, Yao Xue, Qu Haicheng
- Automatic calibration of hand structures based on voxel data 0054
Yao Zhengwei, Pan Zhigeng
- Image edge extraction combined with a Gaussian weighted distance graph 0062
Jia Di, Meng Xiangfu, Meng Lu, Dong Na, Fang Jinfeng
- Restoration of distorted 2D barcode marked on arbitrary radius cylinder based on calibrated camera 0069
Wang Wei, He Weiping, Guo Gaifang, Niu Jinbo, Cao Xizheng
- Fast ellipse detection for target images in ICF experiment 0076
Wu Qian, Zou Wei, Xu De, Zhang Feng
- Face recognition by fusing MBP and EPMOD 0085
Yan Haiting, Wang Ling, Li Kunming, Liu Jifu
- Fragments tracking under occluded target 0092
Zhang Yanchao, Xu Hongli

Image Understanding and Computer Vision

- Multi-scale analysis based motion attention computation 0101
Liu Long, Fan Boyang
- Scene classification based on multi-scale spatial discriminative probabilistic latent semantic analysis 0109
Ji Haifeng, Gao Jun, Zheng Peng, Wang Jing

Computer Graphics

- Correction method of single-precision floating-point error for digital Earth rendering 0119
Li Shanglin, Zheng Liping, Zhang Jing, Yang Liuqing

Medical Image Processing

- Despeckling for medical ultrasound images based on wavelet and bilateral filter 0126
Zhang Ju, Wang Chen, Cheng Yun
- Medical image fusion based on weighted Contourlet transformation coefficients 0133
Zhang Xin, Chen Weibin

Remote Sensing Image Processing

- The method and application of multi-dimension interpretation for landslides using high resolution remote sensing image 0141
Lu Xuejun, Shi Zhenchun, Shang Weitao, Zhou Heyi
- Topographic correction of polarimetric synthetic aperture radar and its application in snow and ice mapping 0150
Fu Sitao, Li Zhen, Tian Bangsen
- The object-oriented change detection based on neighborhood correlation images and the minimum-redundancy-maximum-relevance feature selection 0158
Zou Lidong, Pan Yaozhong, Zhu Wenquan, Zhou Gongqi, Li Yizhan

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)01-0011-09

论文引用格式: 杨达, 王孝通, 徐冠雷, 吴俊波. 利用局部极值点特性的多聚焦图像快速融合[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(1): 11-19.
 [DOI:10.11834/jig.20140102]

利用局部极值点特性的多聚焦图像快速融合

杨达^{1,3}, 王孝通¹, 徐冠雷², 吴俊波³

1. 大连舰艇学院航海系, 大连 116018; 2. 大连舰艇学院海洋系, 大连 116018; 3. 中国人民解放军91550部队, 大连 116023

摘要: 目的 多聚焦图像融合技术一个关键问题是如何准确地判断待融合图像的清晰度。提出了基于归一化结构极值点数目的清晰度判断准则。方法 基于图像的局部极值点特性, 定义了归一化结构极值点数目这个指标作为清晰度判断准则, 同时还给出了利用该准则和融合决策矩阵快速估计技术的多聚焦图像快速融合方法。结果 利用提出的清晰度判断准则和融合方法, 实验结果表明上述问题得到了很好的解决。结论 提出了一个新的图像清晰度判断准则, 该准则判断准确率高, 且对脉冲噪声有好的鲁棒性。通过与传统融合方法对两组实验图像融合结果的主客观比较表明, 该方法的融合速度和效果比现有多聚焦图像融合方法有明显提高。

关键词: 图像融合; 多聚焦图像; 极值点; 图像清晰度

Multi-focus image fusion based on properties of local extrema

Yang Da^{1,3}, Wang Xiaotong¹, Xu Guanlei², Wu Junbo³

1. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Department of Military Oceanography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

3. PLA Unit 91550, Dalian 116023, China

Abstract: **Objective** A key question of multi-focus image fusion is how to decide the clarity of the source images. To solve this problem, a new focus measure is proposed. **Method** The new focus measure based on properties of local extrema is proposed, namely, the normalized structure extrema. We propose a fast image fusion method based on the new focus measure and a quick estimation of the fusion decision matrix. **Result** With the new criterion of image clarity and the fusion method introduced in the paper, multi-focus image fusion yield superior performance than the conventional approaches in terms of the test results. **Conclusion** Normalized structure extrema number is a new focus measure that can judge the clarity of a region effectively and more robustly against pulse noise. Compared with some traditional methods of multi-focus image fusion on both the subjective visual effect and objective evaluation, it indicates that the presented method improves the fused results and efficiency saliently.

Key words: image fusion; multi-focus image; extrema; clarity of image

0 引言

多聚焦图像融合技术可以对同一场景的多幅不

同聚焦图像按照一定的准则进行融合处理, 提取各自的清晰区域组合成一幅新的图像, 使场景中所有目标都清晰。该技术主要分为基于变换域的方法^[1-7]和基于空域^[8-14]的方法两类。基于变换域方

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273262, 61250006)

第一作者简介: 杨达(1977—), 男, 工程师, 海军大连舰艇学院航海系在读博士研究生, 主要研究方向为视频图像处理、信号处理等。

E-mail: yangda1977@163.com

法的优点是能避免块效应从而获得较好的融合效果,例如 Rockinger^[2]的基于小波变换的融合方法获得了不错的视觉效果和较快的速度,Tian 等人^[6]通过采用两分量 Laplacian 混合模型作为小波变换系数选择的统计模型进一步提高了融合图像的客观指标评价结果。但这类方法在变换与反变换的过程中可能会丢失图像的信息,而且运算复杂。在基于空域的融合方法中,相对于基于像素的融合方法而言,基于区域分割尤其是基于固定尺寸的块分割方法更为常用。Li 等人^[8]提出以空间频率作为清晰度判断准则的基于分块的融合方法,算法简单速度快,可以实现实时性。为了克服传统分块方法清晰区域提取不完全、边界融合性能差等缺陷,高雪妮等人^[13]提出了基于多级分块迭代法的多聚焦图像融合方法,融合质量的提高是以计算速度的降低为代价的。Haghighat 等人^[14]则对图像分块后,对图像块进行离散余弦变换,通过比较变换系数来选择清晰的图像块进行融合。基于空域方法的缺点是会产生块效应,且图像块尺寸的选择对融合效果和融合速度影响很大。随着人们获得和处理图像的尺寸不断增加,要求图像融合的速度和效果不断改进。

目前,基于区域融合方法的关键是找到能够有效地区分图像块是来自清晰部分还是模糊部分的清晰度度量指标。常用的清晰度衡量指标有^[15-18]:局部方差、信息熵、Laplacian 梯度能量、基于人眼视觉特性的均匀度、基于边缘检测的指标、空间频率等。这些指标对图像清晰度的判断与人的主观判断往往有不一致的情况,且对噪声敏感,影响图像融合的效果和效率。针对这些问题,提出利用图像块的归一化结构极值点数目 NSEN(normalized structural extrema number)作为判断清晰区域的度量指标,并给出了基于 NSEN 的多聚焦图像融合的快速算法和实验验证,结果表明该方法可以有效提高多聚焦图像融合速度和效果。

1 基于结构极值点的图像清晰度判断准则

1.1 结构极值点

图像局部极值点包含了图像的空间频率、幅值包络等信息,在 2 维经验模式分解及图像纹理分析中有重要的应用。清晰的图像比模糊的图像包含更

多的高频信息,而图像的局部极值点能够用于挖掘和反映图像中包含的最高频率的信息,因此,提出通过局部极值点特性判断图像清晰度的思路。文献[19]总结了 2 维图像极值点的类型并提出图像结构极值点的概念,将极值点分为“一”、“4”、“\”、“/”和“米”5 种结构类型,分别记为 EM_1 、 EM_2 、 EM_3 、 EM_4 、 EM_5 。结构极值点的建立增强了通过极值点提取图像特征信息和分解图像的能力。图 1 以 3×3 像素局部极大值点为例给出了文献[19]中定义的 5 种类型结构极值点的实例。其中“2”表示某一方向上的极大值,“1”表示比极大值小的数值,各邻域中极大值要求相等而其他值没有相等的要求。

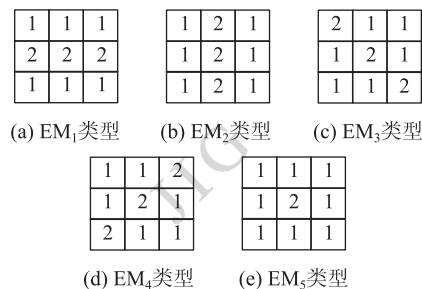


图 1 文献[19]中结构极值点实例

Fig. 1 Examples of structure extrema in reference [19]

传统 2 维极值点和结构极值点对某些图像,尤其是模糊图像会出现极值点稀疏的情况,不适合用于图像清晰度判断。图像中的高频细节表现为极值点和边缘,为减弱极值点稀疏的影响并加快极值点查找速度,本文用 4 个 1 维方向上的极值条件来查找包含图像细节结构特征的极值点,提取更多的特征点信息。这些特征点既包括传统的极值点,也包括构成图像中细节的边缘上的点,因此,本文定义的结构极值点的数目与图像的清晰度正相关。

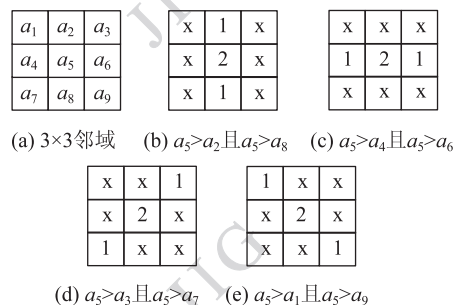


图 2 本文结构极值点实例

Fig. 2 Examples of structure extrema in this paper

定义1 如图2(a)所示,在 3×3 邻域内,只要满足下列条件之一, a_5 就称为结构极值点:

- 1) $a_5 > a_2$ 且 $a_5 > a_8$ 或 $a_5 < a_2$ 且 $a_5 < a_8$;
- 2) $a_5 > a_4$ 且 $a_5 > a_6$ 或 $a_5 < a_4$ 且 $a_5 < a_6$;
- 3) $a_5 > a_3$ 且 $a_5 > a_7$ 或 $a_5 < a_3$ 且 $a_5 < a_7$;
- 4) $a_5 > a_1$ 且 $a_5 > a_9$ 或 $a_5 < a_1$ 且 $a_5 < a_9$ 。

图2(b)~(e)以 3×3 像素局部1维极大值点为例给出了本文定义的结构极值点条件的实例。其中“2”表示某一方向上的极大值,“1”表示比极中心像素值小的数值,“x”表示对其取值在定义域内没有要求。

定义2 对于大小为 $M \times N$ 的图像块,令其一个像素宽度的边界上的点都不是结构极值点,其余各点按照定义1查找结构极值点,设 $M \times N$ 图像块内的结构极值点总数是 num ,则归一化极值点数 $NSEN$ 定义为

$$NSEN = \frac{num}{(M-2) \times (N-2)} \quad (1)$$

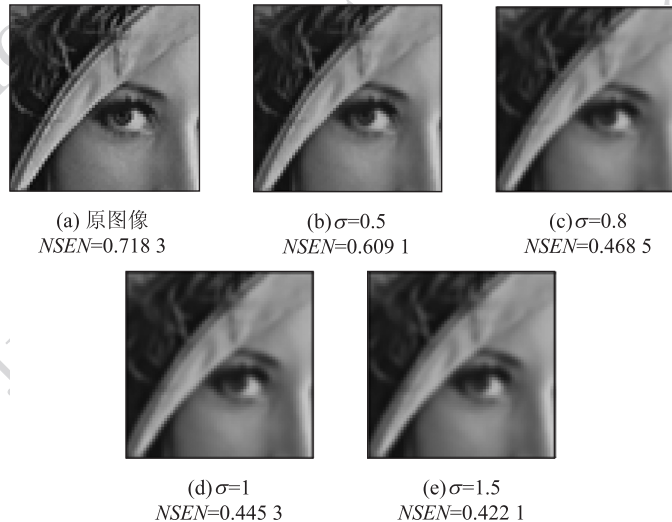


图3 从Lena图像中抽取的图像块及不同程度模糊的效果

Fig.3 Block extracted from Lena and blurred versions with different standard deviations

通过与空间频率 SF (spatial frequency)和Laplacian梯度能量 EOL (energy of Laplacian)^[18]做比较来说明 $NSEN$ 在无噪声和有椒盐噪声情况下判断图像清晰度准确率上的优势。表1是以 256×256 尺寸的Lena原图及加入密度为0.02椒盐噪声的图像作为标准清晰图像, I_1 — I_4 分别是以10为高斯模糊半径,以0.5、0.8、1、1.5为标准差对Lena原图及加入椒盐噪声的清晰图像进行模糊所得图像,将各图像划分成固定大小的图像块,分别通过空间频率 SF 、 EOL 和 $NSEN$ 3个指标判断图像块的清晰度,将

由定义可知, $0 \leq NSEN \leq 1$ 。1.2节将通过实验说明,对于同一场景不同清晰程度的图像,其对应的 $NSEN$ 值不同, $NSEN$ 越接近于1说明图像越清晰,否则 $NSEN$ 越小则对应图像越模糊。

1.2 $NSEN$ 作为图像清晰度判断准则的有效性验证

通过对清晰图像进行不同程度的模糊,计算并比较对应的 $NSEN$ 值大小,来说明以 $NSEN$ 作为图像清晰度评价指标的有效性。图3给出的是从Lena图像中抽取的 64×64 的图像块、不同程度模糊的图像(高斯模糊半径为10)及其对应图像块的 $NSEN$,从图4中可以看出,随着图像越来越模糊,对应的 $NSEN$ 越来越小。图4给出的是从peppers图像中抽取的 32×32 的图像块及其不同程度模糊的图像(高斯模糊参数同前),以及对应图像块的 $NSEN$,从中可以得到相同的规律。这些演示说明图像的 $NSEN$ 可以反映图像的清晰程度,能够作为判断清晰度的准则。

判断正确的图像块数量与图像分块总数相比即得到各个指标清晰度判断的准确率。表1中列出了 4×4 、 8×8 、 16×16 、 32×32 的不同分块大小情况下各指标的判断准确率。表2是以 512×512 尺寸的Peppers图像及加入密度为0.02椒盐噪声的图像作为标准清晰图像,用上述相同方法得到的3个指标的判断准确率。由表1和表2数据可以看出,在多数情况尤其是存在椒盐噪声时,用 $NSEN$ 判断清晰度的准确率比 SF 和 EOL 等传统清晰度判断准则要高。

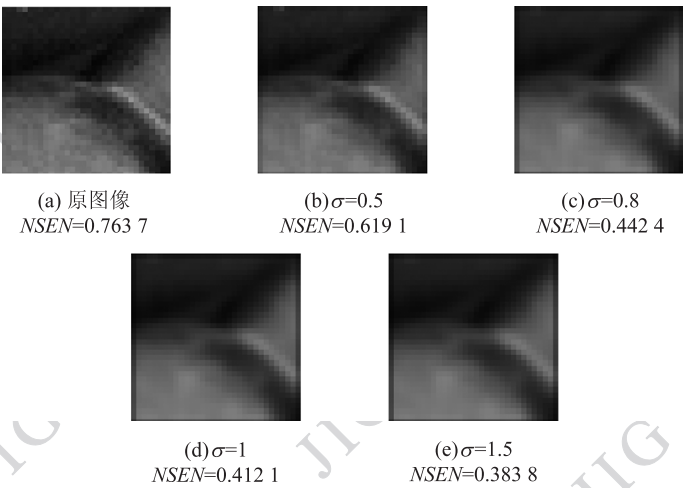


图 4 从 Peppers 图像中抽取的图像块及不同程度模糊的效果

Fig. 4 Block extracted from Peppers and blurred versions with different standard deviations

表 1 Lena 图像不同分块大小情况下 3 个指标的判断准确率

Table 1 Accuracy rates of three indexes of Lena blocks in different cases

		4 × 4			8 × 8			16 × 16			32 × 32		
		SF	EOL	NSEN	SF	EOL	NSEN	SF	EOL	NSEN	SF	EOL	NSEN
无噪声	I_1	0.894 5	0.901 6	0.946 5	0.929 7	0.988 3	0.996 1	0.945 3	1	1	0.984 4	1	1
	I_2	0.916 5	0.935 5	0.942 9	0.955 1	0.996 1	0.999 0	0.964 8	1	1	1	1	1
	I_3	0.927 7	0.944 0	0.964 4	0.963 6	0.994 1	1	0.976 6	1	1	1	1	1
	I_4	0.932 1	0.958 0	0.977 1	0.972 7	0.997 1	1	0.984 4	1	1	1	1	1
有椒盐噪声	I_1	0.710 4	0.740 2	0.856 9	0.550 8	0.564 5	0.952 1	0.628 9	0.601 6	1	0.656 3	0.625 0	1
	I_2	0.714 1	0.750 2	0.687 0	0.553 7	0.565 4	0.956 1	0.613 3	0.625 0	1	0.625 0	0.656 3	1
	I_3	0.729 5	0.761 2	0.743 4	0.577 1	0.575 2	0.968 8	0.605 5	0.578 1	1	0.671 9	0.609 4	1
	I_4	0.740 0	0.774 2	0.798 1	0.587 9	0.601 6	0.983 4	0.652 3	0.593 8	1	0.640 6	0.562 5	1

表 2 Peppers 图像不同分块大小情况下 3 个指标的判断准确率

Table 2 Accuracy rates of three indexes of Peppers blocks in different cases

		4 × 4			8 × 8			16 × 16			32 × 32		
		SF	EOL	NSEN	SF	EOL	NSEN	SF	EOL	NSEN	SF	EOL	NSEN
无噪声	I_1	0.988 2	0.964 9	0.959 1	0.997 3	0.994 6	0.998 0	0.996 1	1	1	1	1	1
	I_2	0.968 4	0.978 6	0.989 7	0.978 8	0.996 6	0.999 3	0.976 6	1	1	1	1	1
	I_3	0.964 6	0.982 5	0.990 1	0.976 1	0.997 6	0.999 5	0.975 6	1	1	1	1	1
	I_4	0.962 3	0.985 2	0.991 4	0.970 9	0.998 0	0.999 8	0.972 7	1	1	1	1	1
有椒盐噪声	I_1	0.757 9	0.787 3	0.923 6	0.568 6	0.598 1	0.993 4	0.554 7	0.523 4	1	0.582 0	0.546 9	1
	I_2	0.759 1	0.797 7	0.817 4	0.579 3	0.607 2	0.996 6	0.531 3	0.501 7	1	0.570 3	0.546 9	1
	I_3	0.755 0	0.797 6	0.875 4	0.584 0	0.606 4	0.997 3	0.561 5	0.544 9	1	0.562 5	0.523 4	1
	I_4	0.749 7	0.795 6	0.925 4	0.592 5	0.606 2	0.997 8	0.552 7	0.520 5	1	0.644 5	0.585 9	1

2 基于局部极值特点的多聚焦图像融合方法

2.1 融合决策矩阵的快速估计和修正

为了提高融合决策计算的速度,主要有3个因素:1)分块尺寸越大数量越少,所需循环次数越少,速度越快;2)计算清晰度指标所用的块尺寸越小,速度越快;3)计算清晰度指标的复杂度越低,速度越快。同时还有两个涉及融合质量的因素需要考虑:1)分块尺寸越大,融合后的块效应越明显;2)分块太小融合后的锯齿效应越明显,并且块太小容易使计算清晰度指标的准确率降低。通过对这些因素的综合考虑,本文加速融合决策矩阵估计的关键是分别使用不同尺寸的块对图像进行分割和清晰度计算。首先选择图像分块的尺寸,根据实验研究及文献给出的经验值,一般取 8×8 或 16×16 。清晰度计算则在每个图像块中心位置选择一个尺寸更小的块,例如 4×4 或 8×8 ,这样就可有效地减少计算时间实现对整幅图像不同区域清晰度的快速扫描判断,从而提高总的融合速度。

尽管 $NSEN$ 指标对图像清晰度的判断有更高的准确率,但由快速扫描得到的粗略决策矩阵的各清晰区域内和区域边界处仍然有少量图像块判断和选择错误,这些错误可以通过形态学滤波^[11]或按照少数服从多数原则^[8]进行一致性修正。本文使用后者方法检验和修正决策矩阵。

2.2 图像融合算法具体步骤

基于局部极值特性的快速多聚焦图像融合算法具体过程如下:

1)将两幅配准的大小为 $M \times N$ 的多聚焦图像分解成大小为 $m \times n$ 的 $(M/m) \times (N/n)$ 个图像块(选择 m 和 n 使 (M/m) 和 (N/n) 为整数),设 BoA_i 和 BoB_i 分别表示图像A和图像B的第 i 个图像块。

2)在每一图像块中心选出一个大小为 $p \times q$ (p 和 q 分别小于等于 m 和 n)的小块 boA_i 和 boB_i ,计算每个小块 boA_i 和 boB_i 的归一化结构极值数 NbA_i 和 NbB_i 。

3)比较两幅图像对应小块间的 $NSEN$,得到粗略融合决策矩阵

$$\hat{C} = \begin{cases} 1 & NbA_i > NbB_i \\ 0 & NbA_i < NbB_i \\ 0.5 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中,“1”代表取 BoA_i 作为清晰块,“0”代表取 BoB_i 作为清晰块,“0.5”代表融合块取值为 $(BoA_i + BoB_i)/2$ 。

4)采用 3×3 窗口利用多数一致原则对粗略融合决策矩阵 $\hat{C}$ 进行一致性检验和修正,得到最终的融合决策矩阵 C 。

5)依照融合决策矩阵 C 从A和B的对应位置选择出各自清晰的图像块,对边界区域采用A和B的对应块的平均值,从而得到新的融合图像。

3 实验结果

为了验证本文算法的有效性进行了如下实验。选取两幅清晰的图像作为原始参考图像,如图5(a)和图6(a)所示,大小为 512×512 ,在两幅图像中分别选取两个不同的聚焦点,分别进行高斯模糊处理,生成待处理图像,如图5(b)(c)和图6(b)(c)所示。



图5 Barbara 清晰图像及不同聚焦图像

Fig. 5 Clear and different focused images of Barbara



(a) 清晰图像 (b) 近处聚焦图像 (c) 远处聚焦图像

图6 Peppers 清晰图像及不同聚焦图像
Fig. 6 Clear and different focused images of Peppers

选用两种变换域文献[2]、文献[6]和两种基于分块的空间域文献[8]、文献[14]与本文算法进行融合效果比较。文献[2]的实现使用 Matapix Image Fusion Toolbox (<http://www.metapix.de/toolbox.htm>), 文献[6]、文献[14]所用程序 SP_2012_fusion 和 DCT-Variance Fusion(<http://www.mathworks.com>), 文献[8]和本文算法程序由 matlab2009b 编程实现。评价标准采用主观判断和均方根误差 $RMSE$ 及边缘细节保持度 $Q^{AB/F}$ [20] 两个客观指标。硬件配置为 Intel Core Duo CPU, 主频 2.13 GHz, 内存 4 GB。

3.1 融合参数对融合效果及性能的影响

本文算法中, 图像分块大小和计算块大小共同对融合效果和融合速度产生影响, 使用不同参数对图5和图6进行融合的评价比较结果如表3和表4所示。从表3、表4中可以看出, 融合参数对融合效

果和性能的影响规律与2.1节中的理论分析一致。在综合考虑融合质量和融合速度时, 最佳融合性能出现在图像分块大小为 8×8 或 16×16 并且计算块大小为 6×6 时。当优先考虑融合质量时, 最佳分块大小和计算块大小一般取为 8×8 和 6×6 , 当优先考虑融合速度时, 最佳分块大小和计算块大小一般取为 16×16 和 6×6 。

3.2 融合方法性能比较

本节将给出本文算法及4种传统方法融合结果。文献[2]程序参数选择为: 最大分解层数4, 高频融合规则是选择最大值, 低频融合规则是取平均值。文献[6, 14]使用程序默认参数。文献[8]分块大小为 8×8 , 本文算法的分块大小为 8×8 , 计算块大小为 6×6 。图7和图8给出了不同方法对测试图像的融合结果。图9和图10给出了局部细节放

表3 Barbara 图像融合参数对融合速度和质量的影響

Table 3 The effects of different fusion parameters on efficiency and quality for Barbara

	计算块大小 (分块大小为 4×4)	计算块大小 (分块大小为 8×8)			计算块大小 (分块大小为 16×16)			计算块大小 (分块大小为 32×32)		
	4×4	4×4	6×6	8×8	4×4	6×6	8×8	6×6	8×8	16×16
融合时间/s	0.426	0.123	0.147	0.187	0.047	0.050	0.059	0.024	0.027	0.045
RMSE	0.850 4	0.819 7	0.575 2	0.575 2	0.807 3	0.708 0	0.677 4	0.82	0.82	0.82

表4 Peppers 图像融合参数对融合速度和质量的影響

Table 4 The effects of different fusion parameters on efficiency and quality for Peppers

	计算块大小 (分块大小为 4×4)	计算块大小 (分块大小为 8×8)			计算块大小 (分块大小为 16×16)			计算块大小 (分块大小为 32×32)		
	4×4	4×4	6×6	8×8	4×4	6×6	8×8	6×6	8×8	16×16
融合时间/s	0.429	0.120	0.147	0.186	0.044	0.049	0.060	0.025	0.026	0.047
RMSE	0.644 1	0.820 9	0.773 5	0.780 9	1.194 7	1.149 8	1.115 3	2.134 8	2.134 8	2.225 1



图 7 Barbara 图像融合效果比较

Fig. 7 Fusion results of different methods for Barbara



图 8 Peppers 图像融合效果比较

Fig. 8 Fusion results of different methods for Peppers

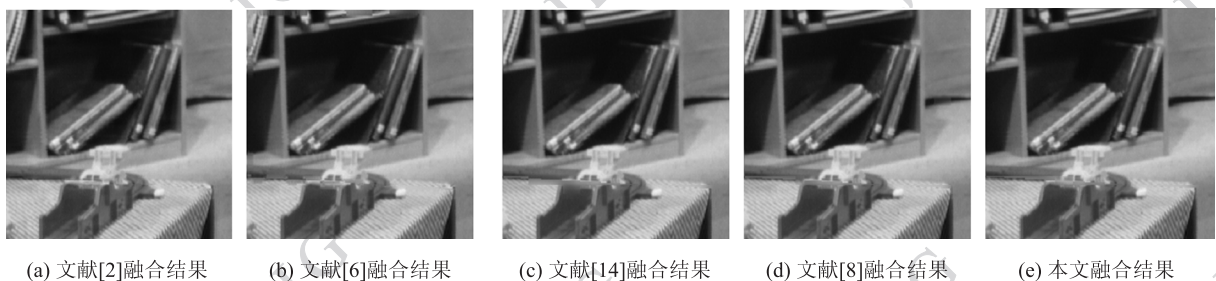


图 9 Barbara 图像融合效果局部放大比较

Fig. 9 Details of fusion results of different methods for Barbara

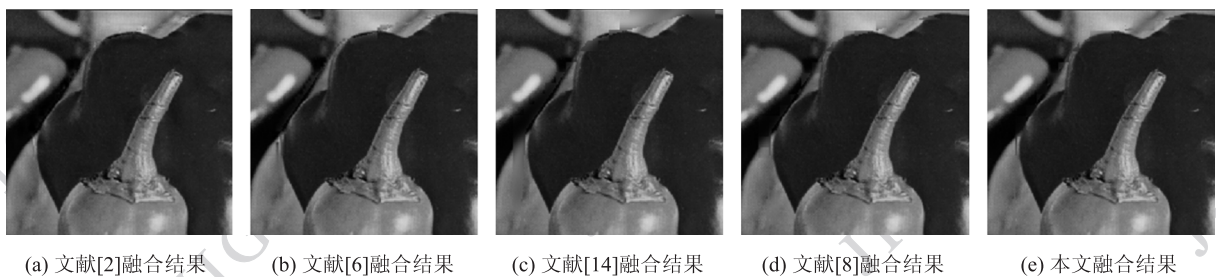


图 10 Peppers 图像融合效果局部放大比较

Fig. 10 Details of fusion results of different methods for Peppers

大比较,从中可以看出本文算法在清晰和模糊的交界区域比传统分块方法的块效应小,在清晰区域比传统变换域方法的细节保持更好。表 5 和表 6 列出了不同方法对两组测试图像融合性能的比较,从中可以看出,本文算法在融合效率和融合效果上都比

其他方法有明显提高。

3.3 噪声对融合方法的影响

为了说明噪声对本文算法的影响,将图 5 和图 6 中的不同聚焦图像分别用密度为 0.01 的椒盐噪声和方差为 0.000 1 的高斯噪声污染,然后用不同

表 5 Barbara 图像融合结果比较

Table 5 Performance comparisons of fusion results for Barbara

	文献[2]	文献[6]	文献[14]	文献[8]	本文算法
融合时间/s	0.272	168.706	2.363	0.221	0.148
RMSE	2.167 8	0.929 3	0.708 9	0.609 2	0.575 2
$Q^{AB/F}$	0.776 6	0.796 9	0.803 7	0.803 5	0.804 0

方法对含噪声图像进行融合,比较各种方法对噪声的鲁棒性。存在椒盐噪声情况下本文算法和其他方法的融合效果如图 11、图 12 和表 7、表 8 所示,从中可见本文算法对椒盐噪声有好的鲁棒性。图 13 给出了存在高斯噪声时本文算法融合结果和对应的融

表 6 Peppers 图像融合结果比较

Table 6 Performance comparisons of fusion results for Peppers

	文献[2]	文献[6]	文献[14]	文献[8]	本文算法
融合时间/s	0.269	166.900	2.219	0.222	0.147
RMSE	2.413 3	0.840 1	1.335 3	1.007 8	0.773 5
$Q^{AB/F}$	0.678 2	0.720 7	0.720 5	0.722 7	0.723 9

合决策矩阵,从中可见本文算法对高斯噪声非常敏感,小方差的高斯噪声即可导致本文算法失效。这是由于椒盐噪声只影响少数像素值,并且对图像块的 NSEN 影响很小,而高斯噪声会改变图像中所有像素的值,对图像块的 NSEN 影响非常大导致的。



图 11 存在椒盐噪声时 Barbara 图像融合效果比较

Fig. 11 Comparisons of fusion results for Barbara with added salt and pepper noise



图 12 存在椒盐噪声时 Peppers 图像融合效果比较

Fig. 12 Comparisons of fusion results for Peppers with added salt and pepper noise

表 7 存在椒盐噪声时 Barbara 图像融合结果比较

Table 7 Performance comparisons of fusion results for Barbara with added salt and pepper noise

	文献[2]	文献[6]	文献[14]	文献[8]	本文算法
RMSE	3.981 9	5.556 5	1.385 7	2.153 2	1.273 3
$Q^{AB/F}$	0.681 5	0.534 9	0.729 1	0.705 3	0.729 6

表 8 存在椒盐噪声时 Peppers 图像融合结果比较

Table 8 Performance comparisons of fusion results for Peppers with added salt and pepper noise

	文献[2]	文献[6]	文献[14]	文献[8]	本文算法
RMSE	3.756 8	4.879 5	1.867 6	2.351 7	1.345 6
$Q^{AB/F}$	0.632 0	0.510 8	0.646 8	0.626 7	0.650 0

4 结 论

本文给出新的结构极值点定义,提出用归一化结构极值点数目 NSEN 作为待融合图像清晰度的判

断准则,并给出基于 NSEN 的多聚焦图像快速融合方法。本文算法通过减小计算清晰度图像块的尺寸有效提高了图像融合效率,通过结构极值点挖掘图像中边缘等细节信息,使计算块尺寸较小时能够更准确地判断清晰度,并且对椒盐噪声有好的鲁棒性。

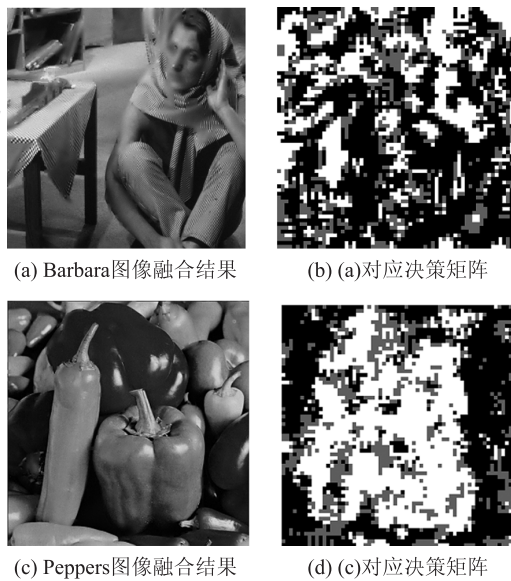


图 13 存在高斯噪声时两组实验图像融合结果和对应的融合决策矩阵

Fig. 13 Comparisons of fusion results for Peppers with added white Gaussian noise

通过与 4 种传统多聚焦图像融合方法进行实验图像融合效果的主客观比较,结果表明,本文算法在融合速度和融合质量上明显优于现有多聚焦图像融合方法。但是高斯噪声会严重改变待融合图像的局部结构极值点分布,使 NSEN 判断清晰度的准则失效,因此下一步需要改善 NSEN 清晰度判断准则对高斯噪声的鲁棒性。

参考文献 (References)

- [1] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform [J]. Graphical Models and Image Processing, 1995, 57(5):235-245. [DOI:10.1006/gmp. 1995. 1022]
- [2] Rockinger O. Image sequence fusion using a shift-invariant wavelet transform [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Santa Barbara, CA:IEEE, 1997:288-291. [DOI:10.1109/ICIP.1997.632093]
- [3] Hill P R, Canagarajah C N, Bull D R. Image fusion using complex wavelets [C]//Proceedings of 13th British Machine Vis. Conf. Cardiff, UK:IEEE, 2002:487-496.
- [4] Zhang Q, Guo B. Multifocus image fusion using the non-subsampled contourlet transform. [J]. Signal Processing, 2009, 89(7):1334-1346. [DOI:10.1016/j. sigpro. 2009. 01. 012]
- [5] Tian J, Chen L, Ma L, et al. Multi-focus image fusion using a bilateral gradient-based sharpness criterion [J]. Computer Science & Information Technology, 2012, 7: 103-115. [DOI: 10.1016/j. optcom. 2010. 08. 085]
- [6] Tian J, Chen L. Adaptive multi-focus image fusion using a wavelet-based statistical sharpness measure [J]. Signal Processing, 2012, 92:1137-1146. [DOI:10.1016/j. sigpro. 2012. 01. 027]
- [7] Lu Z K, Yu Z M. Multi-focus image fusion based on adaptive localized log-gabor energy [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1):199-204. [卢振坤, 玉振明. 基于自适应局部 Log-Gabor 能量的多聚焦图像融合 [J]. 电子学报, 2013, 41(1):199-204.]
- [8] Li S, Kwok J T, Wang Y. Combination of images with diverse focus using spatial frequency [J]. Information Fusion, 2001, 2(3):169-176. [DOI:10.1016/S1566-2535(01)00038-0]
- [9] Yang B, Li S. Multi-focus image fusion based on spatial frequency and morphological operators [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(8):452-453.
- [10] Li S, Yang B. Multifocus image fusion using region segmentation and spatial frequency [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(7):971-979. [DOI:10.1016/j. imavis. 2007. 10. 012]
- [11] Xu G L, Wang X T, Xu X G, et al. New multifocus image fusion algorithm using feature of human vision [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(2):330-335. [徐冠雷, 王孝通, 徐晓刚, 等. 基于视觉特性的多聚焦图像融合新算法 [J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2):330-335.]
- [12] Li S T, Wang Y N, Zhang C F. Feature of human vision system based multifocus image fusion [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12):1699-1701. [李树涛, 王耀南, 张昌凡. 基于视觉特性的多聚焦图像融合 [J]. 电子学报, 2001, 29(12):1699-1701.]
- [13] Gao X N, Yu Z M, Zhang J, et al. Multi-focus image fusion based on multi-level and iterative method [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3):690-694. [高雪妮, 玉振明, 张军, 等. 基于多级分块迭代法的不同聚焦图像融合 [J]. 电子学报, 2011, 39(3):690-694.]
- [14] Haghighat M B A, Aghagolzadeh A, Seyedarabi H. Multi-focus image fusion for visual sensor networks in DCT domain [J]. Computers and Electrical Engineering, 2011, 37: 789-797. [DOI:10.1016/j. compeleceng. 2011. 04. 016]
- [15] Aslantas V, Kurban R. A comparison of criterion functions for fusion of multi-focus noisy images [J]. Optics Communications, 2009, 282:3231-3242. [DOI:10.1016/j. optcom. 2009. 05. 021]
- [16] Huang W, Jing Z. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(4):493-500. [DOI:10.1016/j. patrec. 2006. 09. 005]
- [17] Zhang Y, Ge L. Efficient fusion scheme for multi-focus images by using blurring measure [J]. Digital Signal Processing, 2009, 19(3):186-193. [DOI:10.1016/j. dsp. 2008. 11. 002]
- [18] Agrawal D, Singhai J. Multifocus image fusion using modified pulse coupled neural network for improved image quality [J]. IET Image Process, 2010, 4(6):443-451. [DOI:10.1049/iet-ipr. 2009. 0194]
- [19] Xu G L, Wang X T, Xu X G. Improved bi-dimensional EMD and Hilbert spectrum for the analysis of textures [J]. Pattern Recognition, 2009, 42(5):718-734. [DOI:10.1016/j. patcog. 2008. 09. 017]
- [20] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure [J]. Electronic Letters, 2000, 36(4):308-309. [DOI:10.1049/el:20000267]