

文章编号:1007-2780(2019)03-0278-05

区域方差和点锐度相结合的多聚焦图像融合

赵迪迪^{1,2}, 季轶群^{1,2*}

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院 & 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;

2. 江苏省先进光学制造技术重点实验室 & 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要:针对光学成像系统景深范围有限、景深范围外目标成像模糊的问题,提出一种区域方差和点锐度相结合的拉普拉斯金字塔变换图像融合方法。该方法首先对多幅源图像做拉普拉斯金字塔变换,提取源图像在不同频率层的特征信息;对金字塔顶层图像和其余各层图像,分别采用区域方差和点锐度作为融合度量,对其进行融合,得到融合图像的金字塔各层系数;最后进行拉普拉斯金字塔逆变换得到融合图像。仿真结果表明,本文方法得到的融合图像主观视觉效果和客观评价指标均优于其他常用算法,标准差、互信息和边缘保持度分别提高了 0.24%、6.8% 和 8.4%。该方法有效降低了融合图像的噪声,获得了更加丰富的边缘信息,对实现光学成像系统在大视场范围获取高分辨率光学图像具有重要意义。

关键词: 图像融合; 多聚焦图像; 拉普拉斯金字塔变换; 区域方差; 点锐度

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193403.0278

Multi-focus image fusion combining regional variance and EAV

ZHAO Di-di^{1,2}, JI Yi-qun^{1,2*}

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern

Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou 215006, China)

Abstract: Depth of field of traditional optical systems is limited, it is hard to achieve a wide field image with high resolution. A novel fusion method of multi-focus image based on Laplacian pyramid transform which evaluated by the metrics of regional variance and Point sharpness (EAV) was proposed. The fusion method firstly performs Laplacian pyramid transform on multiple source images, and fea-

收稿日期: 2018-08-12; **修订日期:** 2018-09-24.

基金项目: 国家自然科学基金(No.61405134); 江苏省自然科学基金(No.BK20130320); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61405134); Jiangsu Natural Science Foundation (No. BK20130320); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

* 通信联系人, E-mail: jiyiqun@suda.edu.cn

ture information at the layers with different frequencies were extracted. Then, the multiple source images were fused by utilizing the metric of regional variance for the top layer, and EAV for the other layers. Finally, the fused image was achieved through the inverse Laplacian pyramid transform. The obtained fused image is with lower noise and more abundant edge information than those achieved by the commonly used methods. After evaluation, the standard deviation, the mutual information and the edge retention are improved by a factor of 0.24%, 6.8% and 8.4%, respectively. It is of great significance for optical systems to achieve images with high-resolution over a wide field of view.

Key words: image fusion; multi-focus image; Laplacian pyramid transform; regional variance; EAV

1 引言

对于光学成像系统,由于其景深范围有限,无法使场景内所有目标同时清晰成像,需对场景内不同区域分别聚焦成像,通过融合算法,将不同区域的聚焦图像融合成一张全视场的清晰光学图像,这种算法即多聚焦图像融合。多聚焦图像融合方法,对于实现光学系统在大视场范围内获得高分辨率的光学图像具有重要意义。

多聚焦图像的融合算法可分为基于空间域^[1-3]和基于变换域^[4-6]两种。基于空间域,是在图像灰度空间上直接对像素点进行融合处理,速度较快,但当某些区域噪声较大或灰度变化平缓时,易产生块效应;基于变换域,是先对源图像进行变换,如金字塔变换、小波变换等,然后对变换系数按一定规则进行融合,得到融合图像的变换系数,最后通过逆变换得到融合图像。其中,基于变换域的图像融合是目前研究的热点,张晓菲等^[7]提出基于区域能量特征的小波变换图像融合方法,弥补了传统的小波变换融合算法中出现的信熵减小、清晰度降低的现象,但此方法在处理边缘细节时发现,对比度下降、易产生重影。叶明等^[8]提出区域清晰度的小波变换图像融合算法,可很好地消除传统空域融合方法存在的块效应,但图像噪声较大、像质下降明显。

拉普拉斯金字塔变换是 Burt 和 Adelson 提出的一种多分辨率、多尺度的图像融合方法^[9],本文基于拉普拉斯金字塔变换提出一种区域方差和点锐度相结合的融合算法。对金字塔顶层图像,即低频系数,采用区域方差作为融合度量,进行融合;其余各层为高频系数,采用点锐度作为融合度量,进行融合。最后做拉普拉斯金字塔逆变换,得到完整的全视场清晰光学图像。

2 拉普拉斯金字塔分解

对同一场景不同位置分别聚焦成像得到前景聚焦图像图 1(a)和后景聚焦图像图 1(b),作为源图像 A 和源图像 B。在前景聚焦图像中,黑色测试卡刻度清晰,灰色测试卡模糊。后景聚焦图像中,灰色测试卡刻度清晰,黑色测试卡模糊。

下列以源图像 A 为例进行计算,源图像 A 作为高斯金字塔的第 0 层,记为 I_0^A ,其余各层 $I_1^A \cdots I_N^A$, $I_{l+1}^A \cdots I_N^A$ 可利用式(1),对上一层进行高斯低通滤波和隔行隔列降采样得到。

$$I_{l+1}^A = \text{REDUCE}(I_l^A), \quad (1)$$

然后进行拉普拉斯金字塔分解。对 I_{l+1}^A 采用式(2)进行上采样,得到 I_{l+1}^{A*} 。

$$I_{l+1}^{A*} = \text{EXPAND}(I_{l+1}^A). \quad (2)$$

最后,根据式(3),利用 I_l^A 与 I_{l+1}^{A*} 的差值得到拉普拉斯金字塔第 l 层图像:

$$\begin{cases} L_l^A = I_l^A - I_{l+1}^{A*}, & 0 \leq l \leq N-1 \\ L_N^A = I_N^A, & l = N \end{cases}. \quad (3)$$

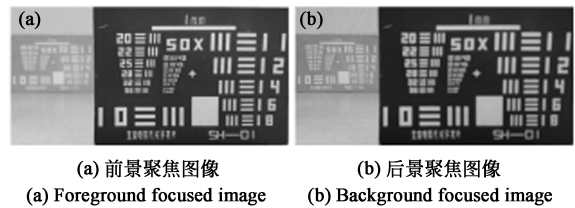


图 1 源图像

Fig.1 Source images

3 融合规则

拉普拉斯金字塔分解将两幅源图像分别分解到不同频率层,在不同频率层采用不同的融合规则,从而在融合图像中保留各源图像在不同频率

层的特征信息。

设 L_l^A 和 L_l^B 分别为源图像 A 和 B 的拉普拉斯金字塔第 l 层图像, 融合结果记为 L_l^F ($0 \leq l \leq N$)。当 $l=N$ 时, 对拉普拉斯金字塔顶层图像进行融合, 本文采用区域方差^[10]作为融合度量, 考察邻域像素间的关联性, 可有效保留图像的细节和边缘信息, 获得清晰的融合图像。区域方差可由式(4)得到:

$$G(i, j) = \sum_{q \in Q} w |L_N(i, j) - \mu|^2, \quad (4)$$

式中, LP_N 为金字塔顶层图像, 即低频系数矩阵, μ 表示邻域像素均值, w 为加权矩阵。

当 $0 \leq l < N$ 时, 对其余各层进行融合, 本文采用点锐度^[11]对像素点周围的灰度扩散程度做统计, 值越大说明扩散越剧烈、图像越清晰, 以此作为融合度量。点锐度可由式(5)得到:

$$E(i, j) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^8 |df/dx|}{m \times n}, \quad (5)$$

式中: m, n 为所选局部区域的长和宽, df 为灰度变化幅值, dx 为像元间距离增量。公式(5)可表示为: 对区域中的每点与其 8 邻域像素点做差, 对差值取绝对值后求加权和, 最后将所有点所得值相加除以像素总数。

由于区域方差和点锐度的数量级不同, 采用式(6)进行归一化处理:

$$Y(i, j) = \frac{X(i, j) - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (6)$$

式中: $X(i, j)$ 为区域方差或点锐度值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为矩阵 X 中的最大值和最小值, $Y(i, j)$ 为归一化后的区域方差或点锐度值。

设 T 为阈值, 本文取 0.05。当 $|Y_l^A - Y_l^B| > T$ 时, 采用选项融合策略:

$$L_l^F(i, j) = \begin{cases} L_l^A(i, j), & Y_l^A(i, j) \geq Y_l^B(i, j) \\ L_l^B(i, j), & Y_l^A(i, j) < Y_l^B(i, j) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $L_l^A(i, j)$ 和 $L_l^B(i, j)$ 分别表示源图 A 和源图 B 的第 l 层拉普拉斯金字塔系数, $LP_l^F(i, j)$ 表示融合图像 F 的第 l 层拉普拉斯金字塔系数。

当 $|Y_l^A - Y_l^B| \leq T$ 时, 采用平均融合策略:

$$L_l^F(i, j) = k_1 \cdot L_l^A(i, j) + k_2 \cdot L_l^B(i, j), \quad (8)$$

其中, $k_1(i, j) = \frac{Y_l^A(i, j)}{Y_l^A(i, j) + Y_l^B(i, j)}, k_2(i, j) = 1 - k_1(i, j)$ 。

本文融合方法流程图如图 2 所示。

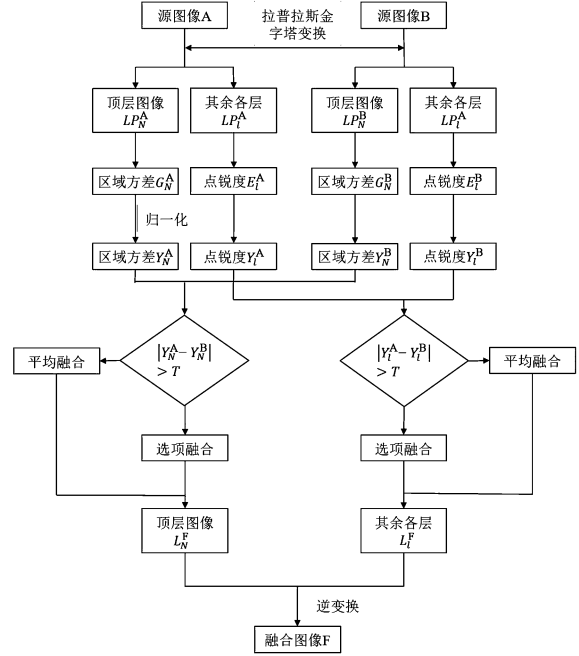


图 2 区域方差和点锐度相结合的图像融合方法流程图

Fig.2 Image fusion framework combining regional variance and EAV

4 拉普拉斯金字塔逆变换

对得到的融合图像拉普拉斯金字塔各层, 采用式(9), 从顶层开始逐层向下递推, 得到融合图像的高斯金字塔 $I_N^F \cdots I_{l+1}^F, I_l^F \cdots I_1^F, I_0^F$, 获得如图 3 所示的融合图像 I_0^F 。

$$\begin{cases} I_N^F = L_N^F, & l = N \\ I_l^F = L_l^F + I_{l+1}^F, & 0 \leq l \leq N \end{cases}. \quad (9)$$

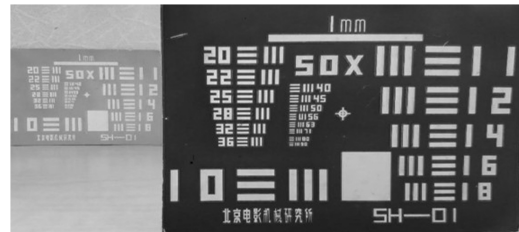


图 3 本文方法获得的融合图像

Fig.3 Proposed method fusion image

5 仿真对比

对同一场景,分别采用基于绝对值取大的离散小波变换、基于区域能量特征的小波变换和区域清晰度的小波变换图像融合算法进行图像融合,得到如图 4(b)、(c)、(d)所示相应的融合图像。

上述 3 种方法均实现了前景聚焦和背景聚焦图像的融合,保留了源图像的互补信息。但前两种方法对比度降低,刻度周围有重影。第三种方法细节信息模糊,图像噪声较大,像质下降明显。通过对比,本文采用区域方差和点锐度相结合的

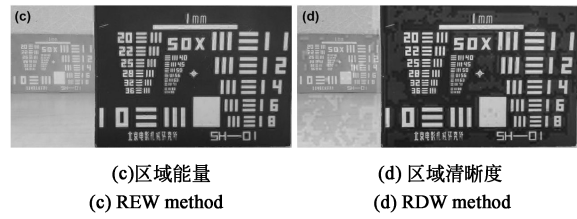
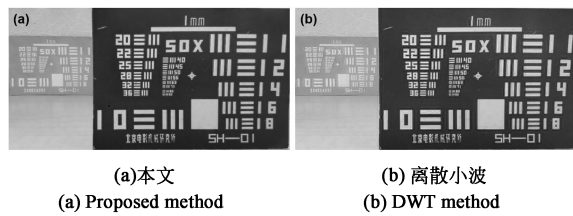


图 4 不同融合方法的性能比较
Fig.4 Fusion performance comparison of different methods

算法,得到的融合图像具有细节信息丰富,无重影,清晰度高,对比度高等优点。

表 1 给出了融合图像的评价指标,包括标准差、互信息、边缘保持度。标准差反映了像素值在其均值上下的波动程度;互信息反映了融合图像从源图像中获得的信息量;边缘保持度反映了源图像转移到融合图像的边缘信息量。3 种评价指标的值越大,融合效果越好。可以看出本文方法得到的融合图像评价指标均高于其他 3 种。

表 1 不同融合方法的性能指标比较

Tab.1 Comparison of performance indexes of different methods

评价指标	绝对值取大	区域能量	区域清晰度	本文方法
标准差	66.271 1	65.320 0	66.104 2	66.430 5
互信息	5.177 2	5.201 4	4.233 6	5.554 2
边缘保持度	0.557 1	0.517 8	0.541 1	0.603 7

6 结 论

针对传统光学成像系统景深范围有限,难以在大视场范围实现高分辨率成像的问题。本文提出一种基于区域方差和点锐度相结合的拉普拉斯金字塔变换融合算法。首先对多聚焦源图像进行拉普拉斯金字塔变换;然后,对拉普拉斯金字塔的顶层图像,采用区域方差考量邻域像素间的关联性,有效保留图像的细节信息;对

其余各层,采用点锐度对像素点周围的灰度扩散程度做统计,提高融合图像清晰度;最后,通过拉普拉斯金字塔逆变换,得到了噪声低、边缘信息丰富的多聚焦融合图像。进一步从标准差、互信息和边缘保持度等评价函数对其进行定量评价,结果表明本文提出的融合算法优于现有的常用图像融合方法,标准差、互信息和边缘保持度分别提高了 0.24%、6.8% 和 8.4%。对光学成像系统在大视场范围获得高分辨率的光学图像具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] JIA Y H. Fusion of Landsat TM and SAR images based on principal component analysis [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, 13(1): 46-49.
- [2] 蒋晓瑜,高雅允,周立伟.基于假彩色的多重图像融合 [J]. *北京理工大学学报*, 1997, 17(5): 645-649.

- JIANG X Y, GAO Z Y, ZHOU L W. Multi-sensor image fusion based on false color [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, 17(5): 645-649. (in Chinese)
- [3] SHARAMA R, PAVEL M. Adaptive and statistical image fusion: SID; symposium digest of technical papers of society for information display [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, 13(1): 46-49.
- [4] 韩潇, 彭力. 基于小波变换的多聚焦图像融合新算法[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(9): 1628-1631.
HAN X, PENG L. New multi-focus image fusion algorithm based on wavelet transform [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2014, 42(9): 1628-1631. (in Chinese)
- [5] 童涛, 杨桃, 孟强强, 等. 基于边缘特征的多传感器图像融合算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 311-317.
TONG T, YANG G, MENG Q Q, et al. Multi-sensor image fusion algorithm based on edge feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 311-317. (in Chinese)
- [6] 岳静静, 李茂忠, 陈骥, 等. 基于 NSCT-PCNN 的多聚焦红外图像融合[J]. 红外技术, 2017, 39(9): 798-806.
YUE J J, LI M Z, CHEN J, et al. Multi-focus infrared image fusion based on pulse coupled neural networks in a nonsubsampling contourlet transform domain [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(9): 798-806. (in Chinese)
- [7] 张晓菲, 郑永果. 基于区域能量特征的小波变换图像融合方法研究[J]. 信息技术与信息化, 2011, 1(1): 76-79.
ZHANG X F, ZHENG Y G. Research on image fusion based on wavelet transform and region energy rules [J]. *Information Technology & Informatization*, 2011, 1(1): 76-79. (in Chinese)
- [8] 叶明, 唐敦兵. 区域清晰度的小波变换图像融合算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1328-1333.
YE M, TANG D B. Image fusion algorithm based on wavelet transform and region image definition [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(9): 1328-1333. (in Chinese)
- [9] 赵小川. 现代数字图像处理技术提高及应用案例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
ZHAO X C. *Improvement and Application of Modern Digital Image Processing Technology* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012. (in Chinese)
- [10] 王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(7): 828-831.
WANG H N, ZHONG W, WANG J, et al. Research of measurement for digital image definition [J]. *Journal of Image and Graphic*, 2004, 9(7): 828-831. (in Chinese)
- [11] XYDEAS C S, PETROVIC V. Objective image fusion performance measure [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 308-309.
- [12] 桑琦, 陈浩, 李卫华. 基于小波变换的图像融合方法仿真[J]. 电子科技, 2017, 30(3): 1-3, 7.
SANG Q, CHEN H, LI W H. Image fusion method simulation based on wavelet transform [J]. *Electronic Science and Technology*, 2017, 30(3): 1-3, 7. (in Chinese)
- [13] 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.
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. (in Chinese)
- [14] 王昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2977-2984.
WANG X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)

作者简介:



赵迪迪(1994—),男,江苏苏州人,硕士研究生,2016年于苏州科技大学获得学士学位,主要研究方向为光学仪器与光学设计、图像处理。E-mail: 1016532033@qq.com



季轶群(1980—),女,江苏宜兴人,博士,副研究员,2009年于苏州大学获得博士学位,主要从事光学仪器与光学设计方面的研究工作。E-mail: jiyiqun@suda.edu.cn