

文章编号 1004-924X(2013)10-2671-08

四元数曲波变换多源多聚焦彩色图像融合

朱 明¹, 孙继刚^{1,2}, 梁 伟³, 郭立强^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 空军航空大学 吉林 长春 130022)

摘要:为了改善已有多源多聚焦彩色图像融合算法存在的模糊效应问题,提出一种基于四元数曲波变换的彩色图像融合算法。首先,把传统曲波变换推广到四元数,定义了四元数曲波变换,并给出了该变换的离散化算法。接着,以四元数矩阵的形式对待融合的彩色图像建模,通过四元数曲波变换对图像的四元数值进行多分辨率分析。然后,采用“最小、最大”融合规则来完成融合图像的多分辨率分析。最后,采用逆四元数曲波变换得到融合后的彩色图像。实验结果表明:提出的方法能够有效地去除图像模糊,无论是在主观评价还是在客观评价上都优于已有的算法。与最新文献中基于二维经验模式分解(BEMD)的融合算法相比,其图像锐利度(ISM),图像对比度(ICM),彩色信息丰富度(CCM)等3项客观评价指标上都有较大幅度的提升。

关键词:彩色图像;图像融合;四元数;四元数曲波变换

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20132110.2671

Multiple multifocus color image fusion using quaternion curvelet transform

ZHU Ming¹, SUN Ji-gang^{1,2}, LIANG Wei³, GUO Li-qiang^{1*}

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: math_circuit@qq.com

Abstract: To solve the image blur problem existed in multiple sources and multi-focus color image fusion algorithms, a novel fusion algorithm based on the quaternion curvelet transform was proposed. First, the traditional curvelet transform was generalized to a quaternion algebra from a real and complex number, and the definition of quaternion curvelet transform and its discrete algorithm were given. Then, the original color image was molded in a quaternion matrix form, and the quaternion-value of the image was analyzed in a multiresolution through quaternion curvelet transform. Furthermore, the “min, max” selection rule was adopted to form a multiresolution of the fused color image. Finally, the fused color image was obtained from the inverse quaternion curvelet transform. The competing

收稿日期:2013-04-24;修订日期:2013-06-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61203242)

multiple multifocus color image fusion methods and the proposed method were compared by the subjective and objective analysis. The experimental results indicate that the proposed method significantly solve the image blur problem, and its Image Sharpness Metric(ISM), Image Contrast Metric (ICM) and Color Colorfulness Metric(CCM) are raised considerably as compared with those of Bidimensional Empirical Mode Decomposition(BEMD)).

Key words: color image; image fusion; quaternion; quaternion curvelet transform

1 引言

图像融合是将多个成像传感器或同一传感器在不同时间获得的同一场景的图像信息加以综合,以获得新的关于此场景更准确的描述。图像融合的主要目的是减少由单一成像传感器获取图像信息的不确定性,通过对多幅图像间的信息互补来为后续的决策提供更可靠的信息来源。

自上个世纪 80 年代以来,图像融合领域已经取得了很多研究成果,但这些成果多是针对灰度图像的融合算法^[1-5],而彩色图像的融合算法相对较少。基于此,本文根据实际需要,重点研究了多源多聚焦彩色图像融合。多聚焦彩色图像融合算法大体可分为三类:空域方法^[6-8],频域方法^[1-2, 9]以及空域和频域相结合的方法^[10]。

目前,大多数彩色图像融合都可归类于空域的方法,也就是聚焦测度的计算和融合过程都是在空域内进行的。这类算法首先是待融合的彩色图像划分成若干个子块,然后计算对应子块的聚焦测度,把聚焦测度值大的子块作为融合图像的子块。这里,聚焦测度可以是图像梯度能量,修正 Laplacian 总和(Sum Modified Laplacian, SML)算子^[6-7],或者模糊测度^[8]。这类方法的优点是算法简单,缺点是只能融合两幅图像,无法实现多源图像融合。另外,由于空域方法要对图像进行子块划分,融合后的图像容易产生马赛克效应。

基于小波变换的融合是典型的频域方法。这里,聚焦测度的计算以及融合过程都是在变换域中进行的。由于小波变换无法直接处理彩色图像,只能以分通道的形式对彩色图像进行处理。这种方法得到的融合图像会存在一定程度的颜色失真,同时融合后的彩色图像仍然存在比较严重的模糊效应。

基于二维经验模型分解(Based on 2D Empirical Model Decomposition, BEMD)的彩色图像融合

算法与基于小波变换的图像融合算法类似。首先,把待融合的彩色图像在 YIQ 颜色空间进行 BEMD 分解,得到 Residue 分量和 IMF 分量。对于 Residue 分量采用局部重要性融合规则得到融合图像的对应分量;对于 IMF 分量采用主成分分析融合规则得到相应的融合分量。最后,通过逆 BEMD 分解得到融合图像。该方法的融合效果比基于小波的方法要好一些,而且能够实现多源图像融合。但该算法在去除图像模糊方面并不令人满意。

文献[10]提出的彩色图像融合算法属于空域和频域相结合的方法,其聚焦测度的计算是在频域,而融合过程则是在空域中实现的。该算法首先把待融合的彩色图像由 RGB 颜色空间变换到 HSI 颜色空间,对 I 颜色分量进行静止小波变换(Stationary Wavelet Transform, SWT)得到一个亮度图像的多分辨率分析。文中对细尺度和粗尺度系数采用加权求和的方式计算聚焦测度,从而得到一个判决图。该图标记了融合图像的像素到底是来自于源图像 A 还是 B,由此可以得到一个初步的融合图像,再经过像素邻域的一致化校验就得到最终的融合图像。该算法的融合效果要优于空域的方法,但它与空域的方法有一个共同的缺点,也就是不能实现多源图像的融合。

本文针对已有多源多聚焦彩色图像融合算法中所存在的模糊失真现象,提出了一种基于四元数曲波变换的融合算法。与传统基于小波变换以及基于 BEMD 的彩色图像融合方法相比,本文的方法最大限度地去除了融合图像的模糊失真,其图像锐利度(ISM),图像对比度(ICM)和彩色信息丰富度(CCM)指标都优于已有算法。

2 四元数曲波变换

小波变换在一维信号处理中得到了成功的应用,但对于高维信号(如图像)处理,其效果并不理想。主要原因是图像中的有用信息往往具有任意

的方向性,如图像边缘。而二维小波是由一维小波做张量积得来的,所欠缺的恰恰就是方向性,只有 x 轴、 y 轴和对角线方向。这样一来,无法利用二维小波对图像中的有用信息进行最优逼近。

为了解决二维小波在图像处理中缺乏方向性的问题,以曲波变换^[11-12]为代表的一大批后小波处理方法被相继提出。这些后小波处理方法在图像处理中得到了广泛应用。但后小波处理方法和传统小波处理方法一样,只能处理灰度图像。对于彩色图像,只能以分通道的形式进行处理。实验结果表明,分通道处理方法的效果并不理想。因此,需要研究一种有别于分通道处理,可以直接处理彩色图像的变换方法。本文在四元数层面对传统的曲波变换进行推广,给出了四元数曲波变换的定义。

2.1 四元数

四元数是复数的推广,是由一个实部和 3 个虚部构成,即:

$$q = q_r + q_i \cdot i + q_j \cdot j + q_k \cdot k, \quad (1)$$

其中,3 个虚部满足如下乘法规则:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1, \quad (2)$$

$$ij = -ji = k, jk = -kj = i, ki = -ik = j. \quad (3)$$

若四元数 q 的实部为零,称 q 为纯四元数。

四元数的范数为:

$$\|q\| = \sqrt{qq} = \sqrt{q_r^2 + q_i^2 + q_j^2 + q_k^2}. \quad (4)$$

对于一幅彩色图像 $f(x, y)$,把它以纯四元数的形式进行表示:

$$f(x, y) = f_R(x, y) \cdot i + f_G(x, y) \cdot j + f_B(x, y) \cdot k, \quad (5)$$

其中, $f_R(x, y)$ 、 $f_G(x, y)$ 和 $f_B(x, y)$ 分别代表彩色图像的 R、G 和 B 分量。 x 和 y 分别代表像素所在图像矩阵的行号和列号。这样,一幅彩色图像就可以用四元数矩阵来表示。基于四元数的彩色图像处理就是直接处理这个四元数矩阵,相对于传统的分通道处理或是变换成灰度图像后再处理的方法而言,四元数方法更能体现出彩色图像的整体性。

2.2 四元数曲波变换

四元数值曲波由下式确定:

$$\Phi_{j,k,l}(X) = \Phi_j(R_{\theta_j}(X - X_k^{(j,D)})), \quad (6)$$

其中, $\Phi_{j,k,l}(X)$ 是由四元数值母曲波 $\Phi(X)$ 进行一系列的平移、旋转和抛物线状尺度变换得到的。

这里抛物线状尺度变换由下式给出:

$$f(x_1, x_2) = f(2^{2j}x_1, 2^jx_2), j = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

设 $R_{\theta_j}(\cdot)$ 代表旋转变换,则方向为 l ,尺度为 j 的旋转角度以及平移分量由式(8)和式(9)确定:

$$\theta_l = 2\pi \cdot 2^j \cdot l, l = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

$$X_k^{(j,D)} = R_{\theta_j}^{-1}(k_1 2^{-j}, k_2 2^{-j/2}), \quad (9)$$

其中, $R_{\theta_j}^{-1}$ 代表 R_{θ_j} 的逆变换, k_1, k_2 为任意的整数。

所有四元数值曲波所构成的集合是一个紧标架系统,也就是对于任意的二维四元数值函数 f 都能够以四元数曲波级数的形式展开:

$$f(X) = \sum_j \sum_k \sum_l \langle f(X), \Phi_{j,k,l}(X) \rangle \Phi_{j,k,l}(X), \quad (10)$$

其中,

$$\langle f(X), \Phi_{j,k,l}(X) \rangle = \int_{R^2} f(X) \overline{\Phi_{j,k,l}(X)} dX. \quad (11)$$

定义为四元数曲波变换。

上文是在连续情况下给出了四元数曲波变换的定义。接下来,将给出该变换的离散化算法。图 1 是四元数曲波变换及其逆变换的离散化算法的结构图,具体步骤如下:

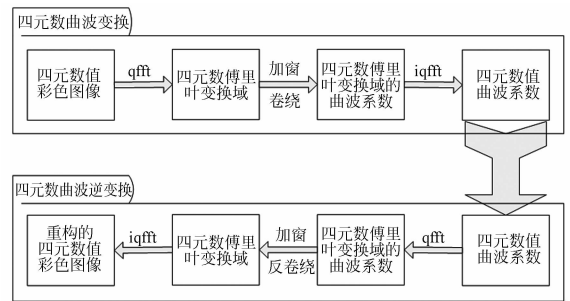


图 1 离散四元数曲波变换及其逆变换流程图

Fig. 1 Flowchart of discrete quaternion curvelet transform and its inverse transform

第一步,把彩色图像以四元数矩阵的形式进行表示。

第二步,对彩色图像进行四元数傅里叶变换(Quaternion Fourier Transform, QFT)^[13]。这里,用四元数工具箱中的“qfft”及“iqfft”函数来实现四元数傅里叶变换及其逆变换。

第三步,在尺度 j ,角度 θ_j 上对 QFT 系数进行插值,将插值结果乘以抛物线状窗函数并进行围绕原点的卷绕操作,就得到了四元数曲波系数在 QFT 域的表达式。有关加窗及卷绕操作的详细步骤与传统曲波变换的实现过程类似,详见文

献[14]。

第四步,对上述结果进行逆四元数傅里叶变换,最终得到四元数值曲波系数。

把上述步骤反向操作就可实现逆四元数曲波变换。

3 算法原理

3.1 基于四元数曲波变换的融合算法

基于四元数曲波变换的多源多聚焦彩色图像融合架构如图 2 所示。具体融合步骤如下:首先,把待融合的多幅彩色图像以四元数矩阵的形式进行表示。接下来,对上述图像进行四元数曲波变换,这样每幅图像便由一个四元数值曲波系数集来描述。然后,采用适当的融合规则,分别对粗尺度系数和细尺度系数进行融合,得到融合图像的多分辨率分析。最后,再通过逆四元数曲波变换来得到融合后的彩色图像。

图 2 所示的融合架构与传统基于小波变换的融合架构类似,但本文所提出的算法并不是简单的以四元数曲波变换替代小波变换,而是改变了彩色图像的处理方式。具体地,传统小波变换无法直接处理彩色图像,而只能以分通道的形式处理,本文所提出的变换却能够实现彩色图像的整体处理。这种处理方式最大限度地去除了模糊效应以及避免了颜色失真,从而得到最佳的融合效果。

本文所采用的融合规则是“最小、最大”规则。众所周知,多分辨率分析中的粗尺度系数是对图像的一个近似表达,包含了图像的平均灰度信息。为了体现出多聚焦彩色图像中的细节信息,增强图像对比度,对粗尺度系数采用“最小”融合规则。

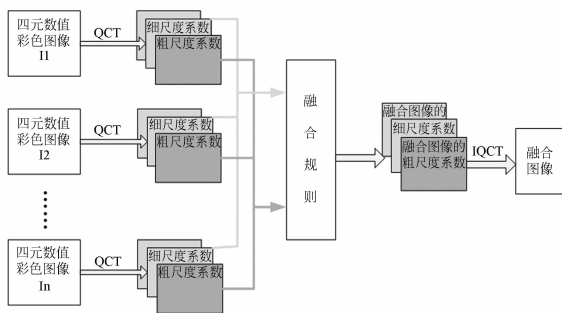


图 2 基于四元数曲波变换的多源多聚焦彩色图像融合算法流程图

Fig. 2 Block diagram of multiple multifocus color image fusion based on QCT

也就是选择对应像素点范数值最小的粗尺度系数作为融合图像的粗尺度系数。

多分辨率分析中的细尺度系数反映图像的高频信息,范数值大的细尺度系数表示该点的像素值与其周围的像素值有着较大的变化,也就是存在边缘等细节信息。对于细尺度系数采用“最大”融合规则,并选择对应像素点范数值最大的细尺度系数作为融合图像的细尺度系数。

3.2 客观评价指标

彩色图像融合效果的系统评价始终是个活跃的研究领域,大批科研人员都致力于这方面的研究。图像融合效果的评价有两种:主观评价和客观评价。

主观评价主要依靠人眼观察,看融合图像的整体色彩分布、整体亮度、图像的边缘和其它信息是否丰富以及融合图像有没有模糊现象。主观评价方法是从视觉的角度给出融合图像的整体评估。但这种方法只是对融合质量的一个定性分析,主观性强。为了避免主观性的一些负面效应,还要给出融合图像的定量分析,也就是客观评价指标。

目前,有关图像融合的客观评价指标多是对灰度图像的。例如,基于统计特性的客观评价指标:均方根误差,平均灰度梯度,灰度偏差等;另外就是基于信息量的客观评价指标:基于熵的评价方法,基于互信息的评价方法等。但这些评价指标并不适用于彩色融合图像的评价。主要原因是构造一个符合人眼视觉感知的客观评价指标是个难点。目前,关于彩色图像融合的客观评价指标仍然是图像融合领域中具有挑战性的难题。

本文的客观评价指标来源于文献[15],它们是:图像的锐利度(ISM: Image Sharpness Metric),图像的对比度(ICM: Image Contrast Metric),彩色信息的丰富度(CCM: Color Colorfulness Metric)。之所以选择上述指标,是由于它们是在 CIE $L^* a^* b^*$ (CIE1976)颜色空间计算得来的。该颜色空间的颜色分布与人眼对色彩的视觉感知相近,其 L^* 分量与人眼对光线的感知相吻合。下面对上述客观评价指标做简要叙述。

3.2.1 图像的锐利度(ISM)

ISM 指标是融合图像细节信息(如边缘信息)的评价指标,是由图像梯度计算得来的,由下式确定:

$$ISM = \frac{1}{|W|} \sum [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}, \quad (12)$$

其中, G_x 和 G_y 分别是融合图像在 x 轴和 y 轴方向的索贝尔梯度算子。通过对各个像素点计算 G_x 和 G_y 的值来得到融合图像的局部梯度信息,再经过累加求和、取平均就得到整幅图像的平均梯度值,即 ISM 值。ISM 值越大,说明图像的细节信息越多,融合效果就越好。

3.2.2 图像的对比度(ICM)

ICM 指标是由灰度对比度和彩色对比度构成,分别由式(13)和式(14)计算得到:

$$C_g = \alpha_I \sum_{k=0}^{N_I-1} \frac{I_k}{N_I} p(I_k), \quad (13)$$

$$C_C = \alpha_L \sum_{k=0}^{N_L-1} \frac{L_k}{N_L} p(L_k), \quad (14)$$

其中, $p(\cdot)$ 是图像直方图函数, α_I, α_L 是与之相关的参数,详见文献[15]。ICM 指标由公式(15)确定:

$$ICM = (0.5 \cdot C_g^2 + 0.5 \cdot C_C^2)^{1/2}. \quad (15)$$

ICM 的取值范围是 $[0, 1]$, ICM 值越大,说明对比度越好,融合图像的质量就越高。

3.2.3 彩色信息的丰富度(CCM)

CCM 值由彩色色度 CCM_1 和彩色差分梯度 CCM_2 构成。 CCM_1 由公式(16)计算得来:

$$CCM_1 = \left(\frac{1}{M \times N} \sum_i \sum_j C_{i,j}^* \right)^{1/2}, \quad (16)$$

其中, $C_{i,j}^*$ 是 C^* 中的元素, $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 。

$$CCM_2 = \left[\frac{1}{|W|} \nabla f(i, j | w) \right]^{1/2}, \quad (17)$$

其中, $\nabla f(i, j | w)$ 是像素点 (i, j) 处的彩色差分梯度计算公式。

CCM 值由公式(18)确定:

$$CCM = (CCM_1 + CCM_2) / 2. \quad (18)$$

CCM 值越大,说明融合图像的色彩越丰富,融合质量越高。

4 实验与结果分析

本文选取两组多源多聚焦彩色图像来验证所提出算法的有效性,所选的图像可以从网站^[16]上下载。第一组实验所用的图像如图 3 所示,实验结果如图 4 所示。在图 4 中,图 4(a)、图 4(c)和图 4(e)分别是基于 BEMD 的融合算法、基于小波

变换的融合算法和本文所提出的基于四元数曲波变换的融合算法结果。而图 4(b)、图 4(d)和图 4(f)分别是图 4(a)、图 4(c)和图 4(e)的局部放大图,用于客观评价。基于小波变换的方法也采用“最小、最大”的融合规则。



(a) 原始图像 A

(b) 原始图像 B

(a) Original image A

(b) Original image B



(c) 原始图像 C

(d) 原始图像 D

(c) Original image C

(d) Original image D

图 3 多源多聚焦彩色图像

Fig. 3 Multiple multifocus color images

在图 4 中,图 4(a)和图 4(c)的左下角“枪口”处存在模糊现象,而本文算法的融合结果并没有模糊现象发生。截取融合图像的右上角得到局部放大图,可以看到基于 BEMD 的融合结果中,“枪口”处有一点模糊,同时,“子弹壳”上也存在模糊现象。图 4(d)中,“枪口”处有明显的模糊。对比之下,本文的融合结果几乎找不到模糊现象。



(a) 基于 BEMD 的融合结果

(b) 图 4(a)的子图像

(a) Fusion results based on BEMD (b) Subimage taken from 4(a) BEMD



(c) 基于 DWT 的融合结果 (d) 图 4(c) 的子图像
 (c) Fusion results based on DWT (d) Subimage taken from 4(c)



(e) 本文的融合结果 (f) 图 4(e) 的子图像
 (e) Fusion results of proposed method (f) Subimage taken from 4(e)

图 4 多源多聚焦彩色图像融合结果

Fig. 4 Fusion results of multiple multifocus color images

表 1 第一组实验的客观评价指标

Tab.1 Objective evaluation results of the first set of experiments

融合方法	客观评价指标		
	ISM	ICM	CCM
BEMD	72.725 7	0.353 0	13.732 9
DWT	68.271 3	0.318 5	14.580 4
本文的方法	87.373 0	0.353 9	15.197 8

以上是对融合结果的主观评价。接下来,本文给出融合结果的客观评价。表 1 列出了图 4(a)、4(c)和 4(e) 三幅图像的 ISM、ICM 和 CCM 客观评价结果。本文算法的 3 个客观评价指标均



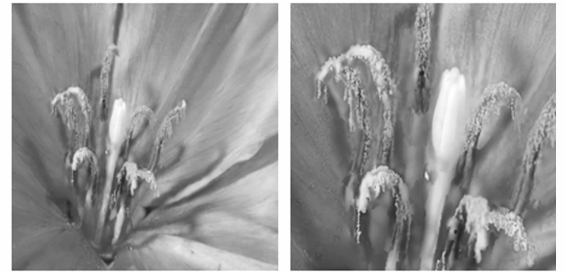
(a) 原始图像 A (b) 原始图像 B
 (a) Original image A (b) Original image B



(c) 原始图像 C (d) 原始图像 D
 (c) Original image C (d) Original image D

图 5 多源多聚焦彩色图像

Fig. 5 Multiple multifocus color images



(a) 基于 BEMD 的融合结果 (b) 图 6(a) 的子图像
 (a) Fusion results based on BEMD (b) Subimage taken from 6(a)



(c) 基于 DWT 的融合结果 (d) 图 6(c) 的子图像
 (c) Fusion results based on DWT (d) Subimage taken from 6(c)



(e) 本文的融合结果 (f) 图 6(e) 的子图像
 (e) Fusion results of proposed method (f) Subimage taken from 6(e)

图 6 多源多聚焦彩色图像融合结果

Fig. 6 Fusion results of multiple multifocus color images

大于其它算法,与目前最新文献中的基于 BEMD 的方法相比,3 个客观评价指标分别提高了 20.14%,2.55%和 10.67%。通过客观的定量分析,可以看出本文的方法要优于已有的融合算法。

接下来进行第二组实验。图 5 是待融合的原图像,图 6 是不同算法的融合结果。图 6(b)、6(d)和 6(f)分别是上述 3 种算法结果的局部放大图。对比 3 幅子图,基于 BEMD 的融合结果和基于小波的融合结果都有不同程度的模糊现象,基于小波的模糊程度要大一些。这一点可以从表 2 中的 ISM 客观评价指标得以验证。而本文的方法基本上没有模糊现象。

表 2 第二组实验的客观评价指标

Tab. 2 Objective evaluation results of the second set of experiments

融合方法	客观评价指标		
	ISM	ICM	CCM
BEMD	30.147 6	0.318 0	11.852 7
DWT	24.441 3	0.316 7	12.439 3
本文的方法	31.351 9	0.339 4	12.697 2

表 2 是对图 6 中 6(a)、6(c)和 6(e)这 3 幅融合图像的一个客观评价。从表 2 我们可以看到,本文算法的 3 个客观评价指标均大于其它算法,

与目前最新文献中的基于 BEMD 的方法相比,3 个客观评价指标分别提高了 3.99%,6.73%和 7.12%。与第一组实验相比,上述 3 个客观评价指标的提高量略小一些,这主要是因为第二组实验中待融合图像的纹理比较单一。

通过上述两组实验的主观及客观评价分析可知,本文所提出的基于四元数曲波变换的多源多聚焦彩色图像融合算法优于已有的算法,能够较好地去除融合图像的模糊现象。

5 结 论

本文在分析多聚焦彩色图像融合的研究现状的基础上,提出了基于四元数曲波变换的多源多聚焦彩色图像融合算法。本文算法中,每幅源图像都由一组四元数曲波系数来描述,通过“最小、最大”融合规则,构建了融合图像的四元数值多分辨率分析。通过逆四元数曲波变换得到融合图像,并与基于 BEMD 的算法及基于小波的算法进行了定性及定量的比较。实验结果表明,本文算法能够有效地去除图像模糊,与最新的文献中所提算法相比较,本文的融合结果在主观视觉感知性方面得到了较大的改善。同时,其客观评价指标也都有较大幅度的提升。

参考文献:

[1] HUI L, MANJUNATH B S, MITRA S K. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform [J]. *Graphical Models & Image Process.*, 1995, 57(3):235-245.

[2] AMOLINS K, ZHANG Y, DARE P. Wavelet based image fusion techniques-An introduction, review and comparison [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 249-263.

[3] 高恒振,万建伟,粘永健,等. 组合核函数支持向量机高光谱图像融合分类[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):878-883.

GAO H ZH, WANG J W, NIAN Y J, *et al.*. Fusion classification of hyperspectral image by composite kernels support vector machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 878-883. (in Chinese)

[4] 杨粤涛,朱明,贺柏根,等. 采用改进投影梯度非负矩阵分解和非采样 Contourlet 变换的图像融合方法 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5):1143-1150.

YANG Y T, ZHU M, HE B G, *et al.*. Fusion algorithm based on improved projected gradient NMF and NSCT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1143-1150. (in Chinese)

[5] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)

[6] ZHAO H, LI Q, FENG H J. Multi-focus color image fusion in the HSI space using the sum-modified-laplacian and the coarse edge map [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(9), 1285-1295.

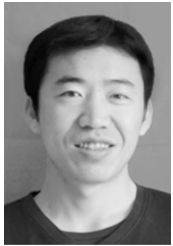
[7] HUANG W, JING Z L. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(4):493-500.

- [8] MARUTHI R. Spatial domain method for fusing multi-focus images using measure of fuzziness [J]. *Int. J. Comput. Appl.*, 2011, 20(7):48-57.
- [9] CHEN Y, WANG L, SUN Z, *et al.*. Fusion of color microscopic images based on bidimensional empirical mode decomposition [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(21): 21757-21769.
- [10] SHI H L, FANG M. Multi-focus color image fusion based on SWT and IHS [C]. *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2007, Haikou, P.R. China; ICFSKD*, 2007, 2:461-465.
- [11] CANDES E J, DONOHO D L. Continuous curvelet transform I. Resolution of the wavefront set [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2005, 19 (2):162-197.
- [12] E. J. CANDES E J, DONOHO D L. Continuous curvelet transform II. Discretization and frames [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2005, 19 (2):198-222.
- [13] ELL T A, SANGWINE S J. Hypercomplex Fourier transforms of color images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1):22-35.
- [14] CANDES E J, DEMANET L, DONOHO D L, *et al.*. Fast discrete curvelet transforms [J]. *Multi-scale Model. Simul.*, 2006, 5(3): 861-899.
- [15] YUAN Y, ZHANG J, CHANG B, *et al.*. Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image [J]. *Opt. Eng.*, 2011, 50 (3): 033202.

作者简介:



朱 明(1964—),男,江西南昌人,研究员,博士生导师,1985 年于南京航空航天大学获得学士学位,1991 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事视频图像处理、自动目标识别及成像目标跟踪等方面的研究。E-mail: zhu_mingca@163.com



孙继刚(1977—),男,吉林长春人,博士研究生,讲师,2007 年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: 37871870@qq.com



梁 伟(1979—),男,汉族,吉林蛟河人,博士,讲师,2011 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像处理、光电跟踪与计算机控制等方面的研究。E-mail: liangweiafce@126.com



郭立强(1982—),男,吉林和龙人,助理研究员,2005 年、2008 年于延边大学分别获得学士、硕士学位,2011 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所从事博士后工作,主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: math_circuit@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)