

应用引导滤波器和成像系统特性的多光谱与全色图像融合算法

李旭寒 董安国 封建湖
(长安大学理学院 西安 710064)

摘要 为了提高多光谱与全色图像融合的质量,提出一种应用引导滤波器和成像系统特性的多光谱与全色图像融合算法。该算法采用引导滤波器建立降质全色图像与多光谱图像的关系,进而利用这种关系对多光谱图像进行插值;再对待融合的多光谱和全色图像进行区域划分和 NSCT 变换,然后结合 LCCS、FOCC 和图像成像系统特征对图像高频系数进行区域融合,最后进行逆 NSCT 变换得到融合图像。实验数值表明,该算法在充分保留了多光谱图像光谱信息的同时,尽可能多地注入了全色图像的细节信息,提高了多光谱图像的融合效果。

关键词 图像融合,引导滤波器,成像系统特点,NSCT 变换,分水岭分割,局部相关系数,四阶相关系数
中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.7.055

Fusion Algorithm of Multispectral and Panchromatic Image Using Guided Filter and Imaging System Characteristics

LI Xu-han DONG An-guo FENG Jian-hu
(School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract In order to improve the quality of multispectral and panchromatic image fusion, a fusion algorithm of multispectral and panchromatic image using the guided filter and imaging system characteristics was proposed. First of all, it adopts the guide filter to establish the relationship between lower quality panchromatic image and multispectral image, and uses this relationship to interpolate the multispectral image. After that, multispectral and panchromatic images are proceeded division and NSCT transformation, and then the feature of LCCS, FOCC and image imaging system are combined for image region merging of high frequency coefficient. Finally, by NSCT inverse transformation, fusion image can be gotten. Numerical experiment shows that the algorithm not only retains the multispectral image spectrum information, but also injects the panchromatic image details into the fusion image as much as possible, improving the effect of the multispectral image fusion.

Keywords Image fusion, Guide filter, Characteristics of the imaging system, NSCT transformation, Watershed segmentation, FOCC, Correlation coefficient

1 引言

随着图像融合技术的发展,这一技术被越来越多地应用到多光谱图像与全色图像的融合中,如何有效地对多光谱图像与全色图像进行融合已成为当前遥感图像融合的重要任务之一。多光谱图像是在较窄的光谱段下形成的图像,具有较高的光谱分辨率,有利于目标物体的识别与解释,但空间分辨率低;全色图像所对应的光谱段较长,光谱分辨率低,但空间分辨率高,能够很好地反映地物的空间信息及其细节特征。将多光谱图像和全色图像进行融合的主要目标是得到具有全色图像高空间分辨率的多光谱图像,但要尽量保持原图像的光谱特性。

目前,在遥感图像融合领域中,传统的算法主要有 Brovey 变换算法、HIS 变换算法、PCA 变换算法等,这些算法虽然运行简单、实时性较好,但不能很好地实现多光谱与全色图像的融合;小波变换、Contourlet 变换和非下采样 Contour-

let 变换(NSCT)融合算法虽然获得了较好的融合结果,但它们是针对整个图像场景进行处理,没有考虑空间特征不同的各个区域固有的特征^[1,2],且在细节提取过程中没有考虑融合图像的关系;文献[1]、文献[3]和文献[4]中的方法都是基于窗口级对图像进行处理,但忽略了窗口间的相关性,具有一定的局限性;文献[5]中虽然是基于区域进行融合,但是分割的区域较大,而且融合算法中需要人工选取两个阈值,阈值选取过大虽然较好地保持了光谱特征,但是同时导致融合图像的细节较少,融合图像呈现模糊现象^[5]。

由于全色图像和多光谱图像的空间分辨率不一致,因此相同目标在全色图像和多光谱图像中所对应的像素个数不同,要对全色图像和多光谱图像进行融合,就必须对多光谱图像进行插值,得到与全色图像分辨率一致的图像。图像融合是对插值后的多光谱图像进行融合,因此多光谱图像插值是图像融合中很重要的一步。为了得到较好的插值图像,将与多光谱图像像素点所对应的全色图像的像素点取平均值后得

到稿日期:2015-06-15 返修日期:2015-08-31 本文受国家自然科学基金项目(11171043,11201038)资助。

李旭寒(1990-),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理,E-mail:1241363413@qq.com;董安国(1964-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为数值代数、数字图像处理、复杂交通系统建模及优化。

到降质的全色图像,再以降质的全色图像为引导图像,采用引导滤波器得到降质的全色图像与多光谱图像的对应关系,并假设全色图像和插值后的多光谱图像也存在这种对应关系,从而根据全色图像得到多光谱图像需要插值的像素点的值。然后对全色图像进行区域划分^[6],并将划分结果对应到插值后的多光谱图像,接着对全色图像和插值后的多光谱图像进行相同层数的 NSCT 变换,再根据各区域的 LCCS 和 FOCC 值以及图像成像系统的特征制定高频系数融合规则,最后对融合系数进行 NSCT 反变换,得到最终融合图像。实验数值表明,该算法在充分保留多光谱图像光谱信息的同时,尽可能多地注入了全色图像的细节信息,提高了多光谱图像的融合效果。本文的主要创新点体现在采用引导滤波器对多光谱图像进行插值,并结合 LCCS、FOCC 和图像成像系统特征对图像高频系数进行融合。

2 NSCT 变换

在 Contourlet 变换的基础上,Cunha A L 等人提出了 NSCT 变换,该变换取消了 Contourlet 变换在图像分解和重构中的上采样和下采样过程,尽管这样会产生数据冗余,但算法具有平移不变性,能够有效降低配准误差对融合性能的影响。由于图像经 NSCT 分解后得到的各子带图像与原图像具有相同的尺寸,因此更容易找到各子带图像之间的对应关系,从而有利于融合规则的制定,更适合图像融合。

基于 NSCT 变换的图像融合算法的基本思想是先将全色图像和多光谱图像进行相同层数的 NSCT 分解得到相应的低频及高频系数;然后将多光谱图像的高频系数用全色图像分解的高频系数代替,低频系数保持不变;最后将多光谱图像进行 NSCT 反变换,得到融合后的图像。

下面以分解层数 $r=1,2$,每层上的方向数 l 分别为 1 和 2 的 NSCT 变换进行描述。

步骤 1 将原图像 X 进行非下采样的塔式分解。原图像 X 分别经过滤波器 H_0 和 H_1 得到高频图像 X_{10} 和低频图像 X_{11} 。

步骤 2 将步骤 1 中得到的高频图像 X_{10} 采用非下采样的方向滤波器组进行滤波。这里是第 1 层,即层方向数 $l=1$,图像 X_{10} 分别经过 2^l 个方向滤波器 h_0 和 h_1 得到 2^l 个带通方向子带图 $X_{10}^{(1)}, X_{10}^{(2)}$ 。

步骤 3 将步骤 1 中得到的低频图像 X_{11} 进行类似于步骤 1 的操作(见图 1),得到高频图像 X_{20} 和低频图像 X_{21} 。

步骤 4 将步骤 3 中得到的高频图像 X_{20} 进行类似于步骤 2 的操作。这里是第 2 层,即层方向数 $l=2$,有 2^l 个方向滤波器 h_0', h_1', h_2', h_3' ,从而得到 2^l 个带通方向子带图 $X_{20}^{(1)}, X_{20}^{(2)}, X_{20}^{(3)}, X_{20}^{(4)}$ 。

以上是 NSCT 分解步骤,下面是重构步骤:

步骤 5 将步骤 4 中得到的 2^l 个带通方向子带图 $X_{20}^{(1)}, X_{20}^{(2)}, X_{20}^{(3)}, X_{20}^{(4)}$ 分别经过步骤 4 中 2^l 个滤波器所对应的恢复图像的滤波器 g_0', g_1', g_2', g_3' 得到高频图像 \hat{X}_{20} ,再将 \hat{X}_{20} , X_{21} 分别经过步骤 3 中的滤波器所对应的重构滤波器 G_0', G_1' 得到低频图像 \hat{X}_{11} 。

步骤 6 将步骤 2 中得到的 2^l 个带通方向子带图 $X_{10}^{(1)}, X_{10}^{(2)}$ 分别经过步骤 2 中 2^l 个滤波器所对应的恢复图像的滤波

器 g_0, g_1 得到高频图像 \hat{X}_{10} ,再将 $\hat{X}_{10}, \hat{X}_{11}$ 分别经过步骤 1 中滤波器的所对应的重构滤波器 G_0, G_1 得到重构图像 \hat{X} 。

以上所描述的步骤中,所有涉及到的滤波器均是根据所选塔式分解和方向滤波器组的类型来确定,是常量。每一个输出图像均具有相同的尺寸,每层上的方向数可自己设定。图 1 为 NSCT 变换的结构图。

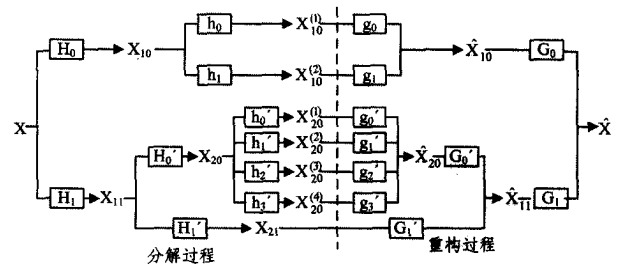


图 1 NSCT 变换结构图

3 基于引导滤波器和成像系统特性的融合算法

3.1 引导滤波器

引导滤波器是由 He 等人^[7]提出来的,它是在假设被过滤的图像和引导图像存在线性关系的前提下实现的。一方面,引导滤波器具有很好的保留边缘、平滑噪声的作用;另一方面,在引导图像的帮助下,该滤波器可以使输出图像具有更多的边缘信息。这里利用引导滤波器找出降质全色图像和多光谱图像的线性关系,再根据这种关系以全色图像为引导图像构造出多光谱图像插值点的像素值。

对于输入图像 p ,输出图像 q 是假设在以像素点 k 为中心的窗口 ω_k 中引导图像 I 的线性变换:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (1)$$

其中, ω_k 是一个大小为 $r \times r$ 的方形窗口, r 是正整数, I_i 代表第 i 个像素值。线性系数 a_k 和 b_k 是通过建立一个代价函数模型求出输入图像 p 和输出图像 q 的最小差异而确定的,为常量。实现代价函数的最小差异化的方法为:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2) \quad (2)$$

其中, ϵ 为正则化参数,系数 a_k 和 b_k 为:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \overline{\mu_k} \overline{p_k}}{\sigma_k^2 + \epsilon}, b_k = \overline{p_k} - a_k \overline{\mu_k} \quad (3)$$

其中, σ_k^2 和 μ_k 分别为在窗口 ω_k 中图像 I 像素值的方差和均值, $|\omega|$ 为在 ω_k 中的像素点个数, $\overline{p_k} = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i$ 是在窗口 ω_k 中图像 p 的灰度均值。所有像素点 i 被包含该点的多个窗口覆盖,不同窗口求出的 a_k 和 b_k 不同,因此将不同窗口求出的结果平均值作为 a_k 和 b_k 的值。因此输出图像 q 为:

$$q_i = \overline{a_i} I_i + \overline{b_i} \quad (4)$$

其中, $\overline{a_i} = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k, \overline{b_i} = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k$ 。

3.2 局部相关系数

一幅图像某一区域的像素点之间具有很强的相关性,图像的局部特征可由该区域多个像素共同来表征。将全色图像与多光谱图像进行融合时,如果图像之间的局部相关系数较大,说明两幅图像相应局部区域存在相似的光谱特征,用全色

图像的高频系数替换多光谱图像的高频系数能充分提高空间分辨率且不会出现严重失真的情况;反之,如果低频部分的局部相关系数太小,说明该像素位置上地物的光谱特征差别很大,不能直接进行替换,要根据成像系统特征对全色图像高频系数做适当的调整后再替换。局部相关系数的计算公式如下^[8]:

$$LCCS(i) = \sigma_{A,B}(i) / \sqrt{\sigma_A(i)\sigma_B(i)} \quad (5)$$

其中, $\sigma_{A,B}(i)$ 是 A、B 两幅图像中对应的第 i 个区域的局部协方差, $\sigma_A(i)$, $\sigma_B(i)$ 分别是图像 A、B 中对应的第 i 个区域的局部方差。

为了更好地衡量图像之间的结构相似性,研究人员提出了一种新的指标来衡量图像之间的空间相似性——四阶相关系数。四阶相关系数是在相关系数基础上提出来的,其计算公式如下^[9,10]:

$$FOCC_{A,B}(i) = \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{(m,n) \in \Omega_i} (A(m,n) - \mu_A(i))^2 (B(m,n) - \mu_B(i))^2$$

$$\sqrt{\left(\sum_{(m,n) \in \Omega_i} (A(m,n) - \mu_A(i))^4 \right) \left(\sum_{(m,n) \in \Omega_i} (B(m,n) - \mu_B(i))^4 \right)}$$

(6)

其中, Ω_i 表示第 i 个区域, $|\Omega_i|$ 是第 i 个区域的像素个数, $\mu_A(i)$ 和 $\mu_B(i)$ 分别表示 A 和 B 在对应的第 i 个区域内的像素均值。由于多光谱图像是在有限的波段范围内,因此插入的高频细节可能导致部分融合系数没有在多光谱图像的波长范围内,这样融合图像就会出现严重的光谱失真现象。为了更好地用全色图像中的高频系数替换多光谱图像的高频系数,将局部相关系数与四阶相关系数进行比较,从而决定高频系数的替换准则^[1]。

3.3 多光谱成像系统模型

由于不同图像成像传感器的相对光谱响应函数以及各波段的辐射调整系数等成像系统特性的不同,因此将全色图像细节信息注入到多光谱图像中时要适当考虑融合图像之间以上因素的影响^[11]。

第 k 波段图像 (m,n) 位置处的辐射亮度与该点的灰度值的关系为:

$$L_k(m,n) = \left(\frac{L_k^{\max} - L_k^{\min}}{DN_k^{\max} - DN_k^{\min}} \right) \times (DN_k(m,n) - DN_k^{\min}) + L_k^{\min}(m,n) \quad (7)$$

$$L_k(m,n) = Gain_k \times DN_k(m,n) + Bias_k \quad (8)$$

$$Gain_k = \frac{L_k^{\max} - L_k^{\min}}{DN_k^{\max} - DN_k^{\min}} \quad (9)$$

$$Bias_k = L_k^{\min} - \left(\frac{L_k^{\max} - L_k^{\min}}{DN_k^{\max} - DN_k^{\min}} \right) \times DN_k^{\min} \quad (10)$$

其中, $L_k(m,n)$ 是第 k 波段图像 (m,n) 位置处的辐射亮度, L_k^{\max} 是第 k 波段图像中最大的辐射亮度值, L_k^{\min} 是第 k 波段图像中最小的辐射亮度值, DN_k^{\max} 是第 k 波段图像中与最大的辐射亮度值对应的最大灰度值, DN_k^{\min} 是第 k 波段图像中与最小的辐射亮度值对应的最小灰度值。 $Gain_k$ 是第 k 波段图像的增益系数,如式(9)所示; $Bias_k$ 是第 k 波段图像的偏差系数,如式(10)所示。

同理,全色图像 (m,n) 位置处的辐射亮度与对应位置的灰度之间的关系为^[12]:

$$L_p(m,n) = Gain_p \times DN_p(m,n) + Bias_p \quad (11)$$

由式(8)和式(11)得全色图像和多光谱图像的灰度关系可表示为:

$$\frac{L_k(m,n)}{L_p(m,n)} = \frac{Gain_k \times DN_k(m,n) + Bias_k}{Gain_p \times DN_p(m,n) + Bias_p} \quad (12)$$

对可见光及近红外波长范围内,到达传感端的太阳辐射能量为:

$$L(m,n,\lambda) \approx \rho(m,n,\lambda) E(m,n,\lambda) \quad (13)$$

其中, $\rho(m,n,\lambda)$ 为地表光谱反射率, $E(m,n,\lambda)$ 为地表端太阳辐射能量。

从而,多光谱图像的灰度值可表示为:

$$DN_k = \frac{\int_{\lambda_{\min}^k}^{\lambda_{\max}^k} \rho_k(m,n,\lambda) E(m,n,\lambda) R_k(m,n,\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}^k}^{\lambda_{\max}^k} \rho_p(m,n,\lambda) E(m,n,\lambda) R_p(m,n,\lambda) d\lambda} \times \left(\frac{Gain_p}{Gain_k} \times DN_k + \frac{Bias_p}{Gain_k} - \frac{Bias_k}{Gain_k} \right) \quad (14)$$

由式(14)可知,图像的灰度值与 $\rho(m,n,\lambda)$, $R(\lambda)$, $Gain$, $Bias$ 有关。为了实现图像的有效融合,尽量减少光谱失真,对融合图像的以上相关系数做如下调整:

$$\alpha_k^{(1)} = \begin{cases} \frac{\rho_k(m,n)}{\bar{\rho}(m,n)}, & \bar{\rho}(m,n) \neq 0 \\ 0, & \bar{\rho}(m,n) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\rho_k(m,n)$ 是第 k 波段图像 (m,n) 位置处的光谱反射率,可以根据图像的灰度值表示为:

$$\rho_k(m,n) = \frac{DN_k(m,n) - DN_k^{\min}}{DN_k^{\max} - DN_k^{\min}} \quad (16)$$

$\bar{\rho}(m,n)$ 是光谱反射率的平均值,如式(17)所示:

$$\bar{\rho}(m,n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \rho_k(m,n) \quad (17)$$

由于每幅图像的成像传感器相对的光谱响应函数不同,因此在对多光谱图像细节信息进行融合时将全色图像和多光谱图像重合的光谱相应曲线考虑进去才不至于影响多光谱图像的光谱分辨率。 $R(\lambda)$ 的调整系数定义为:

$$\alpha_k^{(2)}(m,n) = P(MS_k | pan) = \frac{P(MS_k \cap pan)}{P(pan)} \quad (18)$$

其中, $P(MS_k | pan)$ 为光子能同时被全色图像传感器和 k 波段多光谱图像传感器检测到的概率; $P(MS_k)$ 为光子能被 k 波段多光谱图像传感器检测到的概率; $P(pan)$ 为光子能被全色图像传感器检测到的概率。根据光谱响应函数的物理意义, $P(MS_k | pan)$, $P(pan)$ 定义为:

$$P(MS_k | pan) = P(MS_k) \cap P(pan) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \min(R_k(\lambda), R_{pan}(\lambda)) d\lambda \quad (19)$$

$$P(pan) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{pan}(\lambda) d\lambda \quad (20)$$

由式(14)知, $Gain_k$ 和 $Gain_p$ 对多光谱图像的细节信息注入有一定的影响,为减小对多光谱图像光谱信息的影响,定义:

$$\alpha_k^{(3)}(m,n) = \frac{Gain_p}{Gain_k} \quad (21)$$

将全色图像细节信息注入到多光谱图像中去,是一个非线性模型,除了要调整图像的 $Gain$,还要调整 $Bias$,如下:

$$\alpha_k^{(4)}(m,n) = \alpha_k^{(1)}(m,n) \times \alpha_k^{(2)}(m,n) \times \left(\frac{Bias_p}{Gain_k} - \frac{Bias_k}{Gain_k} \right) \quad (22)$$

4 融合算法思想

基于 NSCT 变换的图像融合算法继承了小波变换的多尺度性、良好的时频分析特性,以及 Contourlet 变换的多方向性,同时还具有平移不变性,因此采用 NSCT 变换提取高频系数有利于融合规则的制定;由于不同物质的空间特征不同,对图像进行区域划分并逐区域进行融合保证了图像中空间特征不同的各个区域固有的特征^[5],再根据各区域的 LCCS 和 FOCC 值以及图像成像系统的特征制定高频系数融合规则。

融合算法的步骤如下:

(1)对全色图像 PI 进行降质,取与多光谱图像对应像素点的均值为降质全色图像该像素点的值。

(2)采用引导滤波器得到降质全色图像与原多光谱图像的线性关系,假设全色图像和插值后的多光谱图像也存在这种关系,从而对多光谱图像插值得到与 PI 大小一致,为 256×256 的插值后的多光谱图像 MI_k (k 代表的是多光谱图像的波段序号)。

(3)采用改进的分水岭算法对 PI 进行区域划分,并将区域划分结果映射至图像 MI_k 。

(4)对 MI_k 和 PI 分别进行 3 层 NSCT 变换,得到低频系数矩阵 $MI_{k,l}$, PI_l 和高频系数矩阵 $MI_{k,r+1}^j$, PI_{r+1}^j , 其中 r ($r=1, 2, 3$) 为分解层数, l ($l=3, 2, 1$) 为层方向数, j ($j=1, \dots, 2^l$) 为每一层上的方向子带数。

(5)根据步骤(3)中的划分结果计算 $MI_{k,l}$ 和 PI_l 中第 i 个区域的 $LCCS(i)$, $FOCC(i)$ 和调整系数,融合图像 F_k 第 i 区域的像素点的高频系数 $F_{k,r+1}^{j,i}(m, n)$ 的计算公式如下^[1]:

$$F_{k,r+1}^{j,i}(m, n) = \begin{cases} PI_{r+1}^{j,i}(m, n), & \text{if } LCCS(i) > FOCC(i) \\ \alpha_k^{(1)} \cdot \alpha_k^{(2)} \cdot \alpha_k^{(3)} PI_{r+1}^{j,i}(m, n) + \alpha_k^{(4)}, & \text{if } LCCS(i) \leq FOCC(i) \end{cases} \quad (23)$$

其中, $F_{k,r+1}^{j,i}(m, n)$ 表示第 k 波段多光谱图像的融合图像在第 i 区域中点 (m, n) 处的第 r 层的第 j 个方向的子带系数, $PI_{r+1}^{j,i}(m, n)$ 表示全色图像在第 i 区域中点 (m, n) 处的第 r 层的 j 方向上的子带系数。这里,区域间的水岭上的像素点的高频系数用调整后的全色图像对应点的高频系数替换。

(6)以多光谱图像的低频系数作为融合图像的低频系数,对融合图像进行逆 NSCT 变换,得到融合图像 F_k 。

该算法的融合思想框图如图 2 所示。

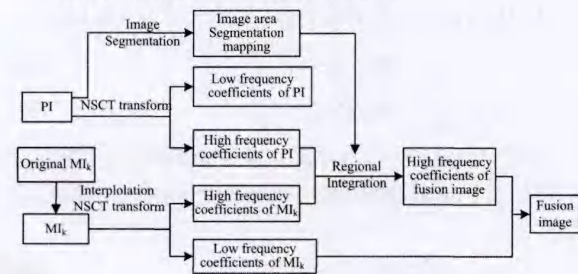


图 2 融合思想框图

5 实验结果和分析

为了评价该算法的性能,选取 3 组 Landsat7 遥感图像作

为测试对象,分别用本文、NSCT 融合算法、文献[1]以及文献[5]的融合方法对测试图像进行融合,通过主观评价和客观评价指标对融合效果进行分析对比,以验证本文方法的正确性和优越性。本文选取平均梯度、标准差、相关系数和光谱扭曲程度以及算法的运行时间作为客观评价指标,平均梯度越大,表示图像就越清晰;标准差越大,图像的对比度就越大,灰度级分布越分散,视觉效果越好;相关系数体现了融合图像保持光谱特性的能力,即反映了融合图像与多光谱图像的相似程度,其值越大,光谱失真越小,融合效果越好;光谱扭曲程度越大,则说明图像失真越严重。

图 3 给出了第 1 组细节较多的实验原图像和各算法融合后得到的图像。图 3(a)、图 3(b)分别是全色图像、插值后的多光谱图像,其图像大小为 256×256 ;图 3(c)为 NSCT 算法的融合结果,图 3(d)为文献[1]算法的融合结果,图 3(e)为文献[5]算法的融合结果,图 3(g)为本文算法的融合结果,从主观方面上来看,图 3(c)出现了严重的光谱扭曲,图 3(e)的视觉效果较为模糊,图 3(d)和图 3(f)的纹理及边缘效果较好。表 1 列出第 1 组图像融合实验的客观评价指标,本文算法得到的平均梯度、标准差、相关系数、光谱扭曲程度和运算时间均优于文献[5]算法,说明本文算法在增强多光谱图像的细节信息方面较好,同时在保留光谱信息方面优于文献[5]算法且算法运算复杂度低。本文算法得到的标准差、相关系数和光谱扭曲程度均优于 NSCT 算法,但是平均梯度略差且运算时间较长,这是由于 NSCT 算法中将多光谱图像的细节信息全部用全色图像的细节信息替换,不需要对全色图像和多光谱图像的对应细节信息进行区域比较,因此 NSCT 算法运算时间较短且平均梯度值较大,但光谱扭曲程度也很大。本文算法得到的平均梯度、相关系数、标准差和光谱扭曲程度均优于文献[1]算法,但是运算时间相对于文献[1]算法较长,但是相差不大,这是因为文献[1]算法没有对图像进行区域划分且融合准则相对简单,所以文献[1]算法的运算时间较短。结合主观和客观评价,本文算法相对于对比算法效果较好。



图 3 第 1 组实验原图像与融合图像

表1 第1组图像融合实验客观评价指标

融合算法	平均梯度	标准差	相关系数	光谱扭曲程度	运行时间(s)
NSCT算法	3.183	23.339	0.8675	3.342	99.07
文献[1]算法	3.015	26.655	0.9715	2.476	138.20
文献[5]算法	2.902	24.996	0.9772	3.275	154.41
本文算法	3.171	29.572	0.9857	2.386	141.63

图4和表2为第2组图像实验各融合图以及融合实验的客观评价指标,图5和表3为第3组图像实验各融合图以及融合实验的客观评价指标。从图4、表2和图5、表3可以再一次看出相对其他几种融合算法,本文算法得到的融合图像更具有优越性。



图4 第2组实验原图像与融合图像

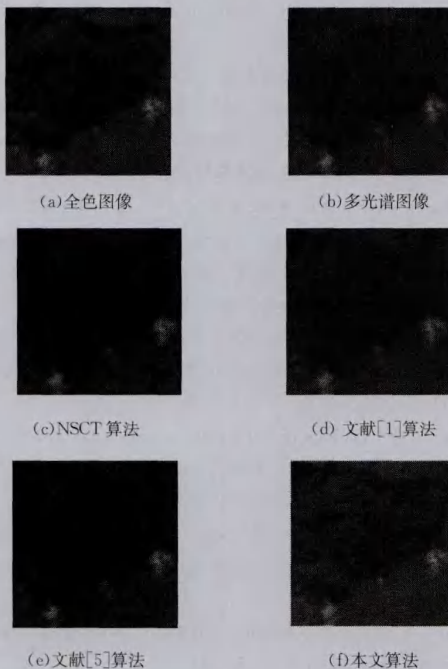


图5 第3组实验原图像与融合图像

表2 第2组图像融合实验客观评价指标

融合算法	平均梯度	标准差	相关系数	光谱扭曲程度	运行时间(s)
NSCT算法	2.857	18.237	0.8503	3.342	96.32
文献[1]算法	2.742	14.752	0.9635	2.476	127.84
文献[5]算法	2.786	17.772	0.9664	3.275	143.22
本文算法	2.831	18.132	0.9671	2.386	137.51

表3 第3组图像融合实验客观评价指标

融合算法	平均梯度	标准差	相关系数	光谱扭曲程度	运行时间(s)
NSCT算法	2.613	17.126	0.8712	2.981	98.73
文献[1]算法	2.497	13.553	0.9582	2.357	135.61
文献[5]算法	2.543	16.875	0.9704	3.014	148.92
本文算法	2.587	17.206	0.9731	2.150	140.43

由于空间分辨率和光谱分辨率是互相矛盾的,多光谱图像和全色图像融合要尽可能在提高空间分辨率的同时避免过多的光谱损失^[13,14],因此结合细节增强与光谱保留两方面综合权衡,同时由以上第2组、第3组图像融合实验可知,本文提出的算法在一定程度上具有有效性和优越性。

结束语 文中提出的应用引导滤波器的多光谱与全色图像融合算法,充分考虑了多光谱图像插值的重要性,采用引导滤波器建立降质的全色图像与多光谱图像的关系,进而对多光谱图像进行插值;再应用 NSCT 变换提取图像的细节信息,采用改进的分水岭算法对图像进行分割,并结合 LCCS、FOCC 和图像成像系统特征对图像高频系数进行区域融合,最后进行逆 NSCT 变换得到融合图像。实验结果表明,所提出的融合算法在充分保留多光谱图像的光谱特征的同时,尽可能多地注入了全色图像的细节信息,提高了融合图像的几何分辨率。文中算法只针对静止图像,对于连续的视频图像还能否达到很好的融合效果,后面将做进一步研究。

参考文献

- [1] Tao Xu-ting, He Hong-jie, Chen Fan, et al. Pan-sharpening Algorithm for Remote Sensing Images Based on Local Correlation [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 03100031-03100036 (in Chinese)
陶旭婷, 和红杰, 陈帆, 等. 基于局部相关性的遥感图像全色锐化算法[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 03100031-03100036
- [2] Mahyari A G, Yazdi M. Panchromatic and Multispectral Image Fusion Based on Maximization of Both Spectral and Spatial Similarities[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 1976-1985
- [3] Huo Jun-tao, Na Yan. Fusion Algorithm of Multispectral and Panchromatic Images Based on Unsubsampling Contourlet Transform[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3): 282-284 (in Chinese)
霍军涛, 那彦. 基于 NSCT 的多光谱和全色图像的融合[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 282-284
- [4] Ma Yan-jun, Shi Ai-ye, Xu Li-zhong. Fusion Remote Sensing Images Using Region-based Operator[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(2): 228-233 (in Chinese)
马艳军, 石爱业, 徐立中. 基于区域特性选择的遥感图像融合方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 228-233
- [5] Ye Chuan-qi, Wang Bao-shu, Miao Qi-guang. Fusion Algorithm of Multi-spectral and High-Resolution Images Based on Region

Feature in NSCT Domain[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1240-1247(in Chinese)

叶传奇, 往宝树, 苗启广. 一种基于区域的 NSCT 域多光谱与高分辨率图像融合算法[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1240-1247

[6] Guan Xin-ping, Huang Na, Tang Ying-gan. New Watershed Segmentation Algorithm via Marker Threshold[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(4): 972-975(in Chinese)

关新平, 黄娜, 唐英干. 一种基于标记阈值的分水岭分割新算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 972-975

[7] He K, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409

[8] Choi J, Yu K, Kim Y. A new adaptive componentsubstitution based satellite image fusion by using partial replacement[J]. IEEE Transactions on Geroscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 295-309

[9] Wang Xiao-yan, Liu Yong, Jiang Zhi-yong. An IHS Fusion Method Based on Structural Similarity[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 670-676(in Chinese)

王晓艳, 刘勇, 蒋志勇. 一种基于结构相似度的 IHS 变换融合算法[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 670-676

[10] Zhang Jun-ping, Qi Chen, Tang Wen-yuan. Multi-sensor Image Fusion Based on Transferable Parameters[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008, 2(1): II1096-II1099

[11] Zhang Qiang, Guo Bao-long. Fusion of Multispectral and Panchromatic Image Based on the Physical Characteristics of Imaging System[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 27(2): 243-248(in Chinese)

张强, 郭宝龙. 基于成像系统物理特性的多光谱图像与全色波段图像融合[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 243-248

[12] Wang Jin-ling, Song Ke-fei, He Xiao-jun. Multi-spectral image fusion based on characteristic of imaging system[C]// Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation. Yinchuan, China, 2013: 643-647

[13] Zhou Zhi-qiang, Peng Si-long, Wang Bo. An optimized approach for Pansharpening very high resolution multispectral[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing letters, 2012, 9(4): 735-739

[14] Wang Wen-qing, Jiao Li-cheng, Yang Shu-yuan. Fusion of multi-spectral and panchromatic images via sparse representation and local autoregressive model[J]. Information fusion, 2014, 20(5): 73-87

(上接第 289 页)

达到了 91.06%, 说明了 HMM 的有效性。此外, 为了进一步提高模型的准确率, 如对步态转换间的识别, 未来需要在特征提取和模型结构方面进行更加深入的研究。

参 考 文 献

[1] Jiang Ming, Wang Zhe-long, Liu Xiao-bo, et al. Research on human daily activity Recognition method based on BSN and CHMMs[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(1): 121-126(in Chinese)

姜鸣, 王哲龙, 刘晓博, 等. 基于 BSN 和 CHMMs 的人体日常动作识别方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(1): 121-126

[2] Ugulino W, Cardador D, Vega K, et al. Wearable computing, accelerometers' data classification of body postures and movements[M]// Advances in Artificial Intelligence-SBIA 2012. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 52-61

[3] Yang A Y, Jafari R, Sastry S S, et al. Distributed recognition of human actions using wearable motion sensor networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2009, 1(2): 103-115

[4] Meng Ming, She Qing-shan, Luo Zhi-zeng. The application of HMM in gait recognition using lower limb SEMG[J]. J. Huazhong Univ. of Tech. Sci. (Natural Science Edition), 2011, 39(2): 176-179(in Chinese)

孟明, 余青山, 罗志增. HMM 在下肢表面肌电信号步态识别中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 176-179

[5] Gao Yun-yuan, Meng Ming, Luo Zhi-zeng, et al. Multi-Mode and Gait Phase Recognition of Lower Limb Prosthesis Based on Multi-Source Motion Information[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 24(11): 1574-1578(in Chinese)

高云园, 孟明, 罗志增, 等. 利用多源运动信息的下肢假肢多模式

多步态识别研究[J]. 传感技术学报, 2012, 24(11): 1574-1578

[6] Zhang Jin-yu, Wang Lan, Zhang Li-xun. Research on real-time gait phase measuring based on multi-sensor[J]. Harbin Engineering University, 2007, 28(2): 218-221(in Chinese)

张今瑜, 王岚, 张立勋. 基于多传感器的实时步态检测研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(2): 218-221

[7] Novak D, Reberšek P, De Rossi S M M, et al. Automated detection of gait initiation and termination using wearable sensors [J]. Medical Engineering & Physics, 2013, 35(12): 1713-1720

[8] Alaqtash M, Yu H, Brower R, et al. Application of wearable sensors for human gait analysis using fuzzy computational algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(6): 1018-1025

[9] De Rossi S M M, Crea S, Donati M, et al. Gait segmentation using bipedal foot pressure patterns[C]// 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Bio-mechatronics (BioRob). IEEE, 2012: 361-366

[10] Mannini A, Sabatini A M. A hidden Markov model-based technique for gait segmentation using a foot-mounted gyroscope[C]// 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2011: 4369-4373

[11] Rabiner L. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(2): 257-286

[12] Wilson A D, Bobick A F. Parametric hidden markov models for gesture recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(9): 884-900

[13] Bao L, Intille S S. Activity recognition from user-annotated acceleration data[M]// Pervasive Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 1-17

[14] Fawcett T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern recognition letters, 2006, 27(8): 861-874