

中图法分类号: TP751.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1086-08

论文索引信息: 储珺, 王璐, 冯瑞娜. 角点测度在月球表面多光谱图像融合中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1086-1093

角点测度在月球表面多光谱图像融合中的应用

储珺¹⁾, 王璐²⁾, 冯瑞娜³⁾

¹⁾(南昌航空大学软件学院, 南昌 330063) ²⁾(南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063)

³⁾(南昌航空大学飞行器工程学院, 南昌 330063)

摘要: 根据 Harris 角点检测原理, 提出角点测度的概念, 并以角点测度响应值作为高频图像融合系数的选择依据, 进而提出基于图像冗余小波域的角点测度重要中心系数算法。算法首先利用冗余小波变换把多光谱图像分解成小波平面和相似平面, 然后利用角点测度响应函数来估计小波平面的角点测度, 用基于角点测度响应值的重要中心系数融合规则融合小波平面。对相似平面则采取加权平均的融合规则, 最后通过冗余小波逆变换得到融合图像。在实验中, 用 Clementine 月球表面多光谱数据和 SPOT5 多光谱数据验证了算法的有效性, 并和其他方法做了比较, 除了基于视觉的主观比较以外, 还引入了标准差、熵、清晰度和相关系数等客观评价指标对融合结果进行评价, 结果表明, 算法有效地保持了原图像的细节特征, 如边缘、角点等。

关键词: 图像融合; 角点测度; 冗余小波变换; 月球表面多光谱图像

Lunar surface multi-spectral image fusion based on corner measurement

Chu Jun¹⁾, Wang Lu²⁾, Feng Ruina³⁾

¹⁾(School of Aeronautics Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063 China)

²⁾(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063 China)

³⁾(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063 China)

Abstract: In this paper, we propose a concept of corner measurement according to Harris corner detection principle, and take corner measure amplitude as a choice of fused coefficients for high-frequency image. And then the significant central coefficient (SCC) image fusion algorithm based on corner measure is presented in redundant wavelet field. The basic idea of the proposed algorithm is first to decompose an image into wavelet planes and approximate planes by using redundant wavelet transform, and then use the corner measurement response function to evaluate corner measure amplitude for the wavelet plane. Significant central coefficient (SCC) image fusion algorithm based on corner measure fusion rule is adopted for wavelet planes. For the approximate planes, average coefficient fusion rule is adopted. Finally, the fusion image was obtained by taking redundant wavelet inverse transform. In the experiment, we adopt multi-spectral data of Clementine lunar surface and multi-spectral data of SPOT5 to verify the validity of our algorithm, and we also compare it with other methods. Beside the subjective comparison based on vision, we introduce objective evaluation index such as the standard deviation, entropy, clarity and the correlation coefficient of the integration to evaluate fusion results. The experiments show that the algorithm can maintain details information feature such as the corner and edge of source images more effectively.

Keywords: image fusion; corner measure; redundant wavelet transformation; multi-spectral image of lunar-surface

收稿日期: 2009-10-29; 修回日期: 2010-01-31

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)项目(2009CB320902); 国家自然科学基金资助项目(60742005, 60954002)。

第一作者简介: 储珺(1967—), 女, 博士, 教授。2005年毕业于西北工业大学机电学院, 获机械设计理论专业博士学位, 主要从事图像处理、计算机视觉方面的研究。E-mail: chujun99602@163.com。

0 引言

月球表面的不同元素和含有不同元素的岩石对各个谱段电磁波的反射率不同,所以月球表面同一场景不同谱段图像的灰度、对比度和纹理特征也各不相同。通过融合两个或多个谱段的月球表面图像,能够充分利用每个谱段图像包含的冗余信息和互补信息,获取月球表面同一场景具有更丰富光谱和细节信息的图像。目前,图像融合方法主要分为基于空间域和基于变换域的方法。基于变换域的多光谱图像融合方法主要有塔形分解(如拉普拉斯塔形分解)^[1]、Contourlet 变换^[2]、小波变换^[3-8]。在拉普拉斯塔形分解融合算法中,不同分辨率的细节信息彼此相关,当要融合的图像差别较大时,这种相关性易引起算法的不稳。小波变换具有良好的分频特性,能从一定程度上克服这种不足。经小波分解后的相似平面反映原图像光谱特征;小波平面则反映了原图像的细节信息。目前的基于小波变换的融合方法大都是针对小波平面的融合规则进行研究的,如邻域方差加权平均法^[4-5]、重要中心系数法^[6]和最大幅值法(MAA)^[7]。其中,加权平均法采用小波平面上对应位置小波系数的加权平均,这种方法实现最简单,但是这种简单的叠加会使融合图像的信噪比降低,容易导致融合图像的边界模糊;重要中心系数法则根据原图像第 i 级小波平面上对应位置小波系数的相对大小进行区域计数,并根据区域计数器的值来确定融合图像对应区域中心位置小波系数的取值;最大幅值法^[7]则根据原图像第 i 级小波平面上对应位置小波系数绝对值的相对大小来确定融合图像对应位置小波系数的取值。但是这些方法在图像融合过程中没有考虑图像本身的形态特征。角点是图像的一个重要形态特征,它具有旋转不变性和对光照不敏感性,针对月球表面图像具有纹理稀少、目标和背景灰度对比度小等特点,通过对 Harris 角点特征量的计算和分析,提出角点测度的概念;在小波变换和冗余小波重要中心系数法的基础上,提出一种基于角点测度的图像融合方法,并和其他方法做了比较。除了基于视觉的主观比较以外,还引入标准差、熵、清晰度和相关系数等客观评价指标对融合结果进行评价。

1 角点测度

角点通常是指图像灰度突变点,是多光谱图像中除光谱特征的一类重要形态特征。月球表面多光谱图像融合的关键是有效保持原图像中的光谱特征以及增强图像的形态特征,因此角点特征对月球表面多光谱图像的融合具有重要意义。根据 Harris 等人^[9] 1988 年提出的点特征提取算子原理,提出了角点测度概念,并以角点测度函数值来反映边缘和角点特征的显著程度。即若某像素点的角点或边缘特征越显著,则该点的角点测度函数值越大;反之,则该点的角点测度函数值越小。角点测度响应函数定义如下:

$$R(i, j) = |R| = \det(\mathbf{C}) - k \operatorname{tr}^2(\mathbf{C}) \quad (1)$$

其中

$$\det(\mathbf{C}) = \lambda_1 \lambda_2 \operatorname{tr}(\mathbf{C}) = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (2)$$

$$\mathbf{C}(i, j) = \begin{bmatrix} I_x^2(i, j), I_{xy}(i, j) \\ I_{xy}(i, j), I_y^2(i, j) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $I_x(i, j)$, $I_y(i, j)$ 和 $I_{xy}(i, j)$ 分别为图像中像素点 (i, j) 在 x, y 方向的偏导及二阶混合偏导; λ_1, λ_2 是矩阵 \mathbf{C} 的两个特征值,分别表示图像中像素点 (i, j) 梯度变化的最大值和最小值; $\det(\mathbf{C})$ 表示矩阵 \mathbf{C} 的行列式值, $\operatorname{tr}(\mathbf{C})$ 表示矩阵 \mathbf{C} 的迹。

角点响应测度值越大,该点包含的形态特征(边缘点和角点)越显著。当角点响应测度值 $R(i, j)$ 较大且 $R(i, j)$ 大于零时,对应点为角点;如果 $R(i, j)$ 较大但 $R(i, j)$ 小于零,则对应于边缘。对每一像素点利用上述角点测度响应函数进行估计,即得到与原图像大小相同的角点测度响应幅值图。角点测度响应幅值图中每个像素点的值,即角点测度响应幅值。角点测度响应幅值表现了图像像素点某邻域内像素灰度的变化率,反映了原图像在这一位置所含形态特征的显著程度,因此它可以作为融合的依据。

2 基于冗余小波变换的角点测度重要中心系数融合算法

目前最常用的小波变换法有小波域相关系数法、邻域方差加权平均法、加权平均法、重要中心系数法和最大幅值法,其中,小波域相关系数法、邻域

方差加权平均法和加权平均法采用小波平面上对应位置小波系数的加权平均,会导致图像的边界模糊;冗余小波域重要中心系数法则根据原图像第 i 级小波平面上对应位置小波系数的相对大小进行区域计数,并通过区域计数器的值来确定融合图像对应区域中心位置小波系数的取值;小波域最大幅值法^[12]以原图像小波平面上对应位置小波系数绝对值大的作为融合小波平面上对应位置的小波系数输出。但是这些方法在图像融合的过程中没有考虑图像本身的具体形态特征,如边缘和角点等形态特征。角点响应测度函数反映了小波平面对应位置形态特征(边缘和角点)的显著程度,其幅值越大,说明该点的形态特征(边缘和角点)越显著。因此,本文通过对角点响应测度函数的分析,在多孔小波变换和重要中心系数法的基础上,提出一种依据角点测度响应函数幅值确定融合规则的方法——基于角点测度的多光谱图像融合方法。

2.1 冗余小波变换

Atrous(多孔)冗余小波变换^[10-11]算法就是利用卷积核对图像进行滤波,把图像分解为不同频率通道上的相似平面和小波平面。设 f 表示原图像, H 表示卷积核。 α_i 表示其第 i 级相似平面, $\omega_i(f)$ 表示其第 i 级小波平面,它们的大小都与原图像相同。原图像经过 N 级分解得到一个相似平面 α_N 和 N 个小波平面 $\omega_i(f)$,具体分解过程如下:

$$\begin{cases} \alpha_0(f) = f \\ \alpha_{i-1}(f) = \alpha_i(f) * H \\ \omega_i(f) = \alpha_{i-1}(f) - \alpha_i(f) \end{cases} \quad (4)$$

由上述分解过程可知,其重构过程为

$$f = \alpha_N(f) + \sum_{i=1}^N \omega_i(f) \quad (5)$$

2.2 算法描述

以两幅图像为例说明本文的融合算法,设两幅源图像为 f_A 、 f_B ,融合后的图像为 F ,图 1 为两幅原图像的融合流程图。

对两幅源图像经过 N 级小波分解,例如,图 1 中的 RWT 部分(多孔冗余小波分解),原图像被分解成一个相似平面 α_N 和 N 级小波平面 $\{\omega_1(f), \omega_2(f), \dots, \omega_N(f)\}$ 。相似平面主要包含源图像的低频信息,小波平面反映原图像的高频信息,即原图像的细节特征。为了更有效地保持源图像的光谱特征,本文对源图像相似平面对应位置的系数求均值作为融合图像相似平面对应位置的系数。

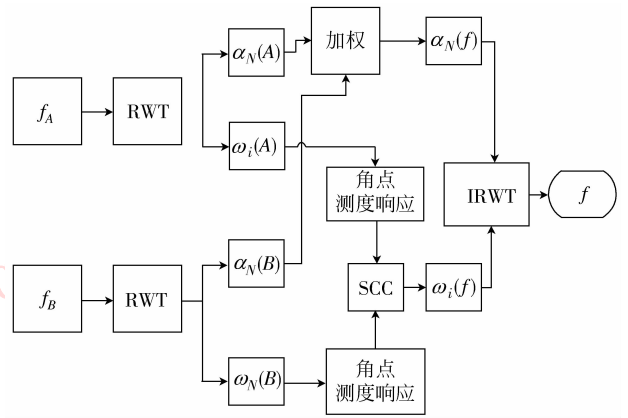


图 1 基于角点测度的图像融合方法流程图

Fig. 1 The flowchart of image fusion based on corner measurement

对反映高频信息的同组每级小波平面,根据角点测度响应函数计算每个像素点的角点测度响应幅值,得到与原图像大小相同的角点测度响应幅值图 $R_i(A)$ 和 $R_i(B)$ 。给定一个大小为 $K \times L$ 的滑动窗口, K 和 L 通常为奇数,定义区域计数器为 C_A 和 C_B ,当该窗口在每组同级小波平面内滑动时,对滑动窗口进行如下的区域计数操作:

If $R_i(A)(m+k, n+l) = R_i(B)(m+k, n+l)$;
 $C_A = C_A + 1; C_B = C_B + 1$;
 If $R_i(A)(m+k, n+l) > R_i(B)(m+k, n+l)$;
 $C_A = C_A + 1$
 else $C_B = C_B + 1$

式中, $k \in \left[-\left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor, \dots, 0, \dots, \left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor\right]$

$l \in \left[-\left\lfloor \frac{L}{2} \right\rfloor, \dots, 0, \dots, \left\lfloor \frac{L}{2} \right\rfloor\right]$

$\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

根据区域计数器的大小可以确定融合图像对应小波平面上对应区域中心位置系数的取值。角点响应测度值反映了该点包含的形态特征(边缘和角点)的显著程度,因此计数器 C_A 和 C_B 取值的相对大小能够在一定程度上说明原图像在给定位置邻域内形态特征(边缘和角点)的显著程度。若 C_A 值较大,说明原图像 f_A 在给定位置的邻域内形态特征较为突出,应使其对融合结果有较大贡献,反之,则应增加 f_B 对融合结果的影响。其具体融合规则如下:

If $C_A > C_B$
 $\omega_i(F) = \omega_i(A)(m, n)$;
 If $C_A < C_B$

$$\omega_i(F) = \omega_i(B)(m, n);$$

If $C_A = C_B$ and

$$R_i(A)(m+k, n+l) > R_i(B)(m+k, n+l)$$

$$\omega_i(F) = \omega_i(A)(m, n);$$

else $\omega_i(F) = \omega_i(B)(m, n);$

其中, $\omega_i(A)$ 和 $\omega_i(B)$ 表示原图像第 i 级小波平面小波系数, $\omega_i(F)$ 表示第 i 级小波平面经融合后的小波系数。当该算法游历完所有像素时, 得到每组第 i 级小波平面的融合图像。

对从融合规则得到的相似平面和 N 级小波平面, 进行冗余小波逆变换求融合图像图 1 中的 IRWT 部分(多孔冗余小波重构)。

3 实验结果与分析

采用小波域均值法(IA)、邻域方差加权平均法、小波系数相关性法、重要中心系数法(SCC)、最大绝对幅值法和本文算法, 对月球表面多光谱图像和地面多光谱图像进行了融合实验。实验过程中发现, 冗余小波分解层数较低时融合质量随分解层数的增加有较大提高, 但当分解层数达到 3~4 层时, 随着分解层数的增大, 图像高频信息微弱。本文实验中冗余小波分解层数选为 3 层, 滑动窗口为 3×3 的窗口。

本文实验数据是美国的 Clementine 月球表面数据, 它包含 5 个波段的可见光图像和 6 个波段的近红外图像。其中可见光的 5 个波段分别是 415 nm、750 nm、900 nm、950 nm 和 1 000 nm。月球表面没有大气、没有海洋, 也没有生物, 更无人造目标; 月球本身不发光, 主要靠反射太阳光, 因此月球表面图像特征与月表矿物的组成相关。通过对月球表面矿物的反射光谱曲线研究发现, 月表的主要矿物质是长石、橄榄石、单斜辉石、斜方辉石等, 这些物质在 750 nm 波段周围对太阳光的反射率达到了峰值、在 1 000 nm 波段周围达到谷值, 因此 750 nm 和 1 000 nm 两个波段的图像数据在光谱特征和形态特征等方面差别较大, 融合后可以较好地保持两幅原图像的不同特征。所以在实验中选择 750 nm 和 1 000 nm 两个波段的数据作为输入图像, 其图像空间分辨率为 64 m。图 2(a)(b) 分别为月球表面 750 nm 和 1 000 nm 波段的图像, 图像大小为 256×256 , 图 2(c)~(h) 分别是各算法得到的融合结果图像; 图 2(i)~(n) 分别是图 2(c)~(h) 方框内区域放大图像。

从视觉效果上看, 实验 1 中两个波段的月表原图像经几种方法融合后都较好地保持了原图像的光谱特征, 但在原图像形态特征的保持上却有差异。从融合结果特征较突出的方框内局部放大图像图 2(h)~(l) 可以看出, 小波域均值法和邻域方差加权平均融合结果最模糊, 说明这两种方法不能有效保存源图像的高频信息; 小波系数相关性方法和重要中心系数法融合结果清晰度虽然较前两种方法有所改善, 但仍存在边界较模糊的问题; 局部窗口最大幅值法优于前 4 种方法, 但是局部区域仍然较模糊。本文方法优于前 5 种方法, 图像清晰, 局部区域边缘清晰。

为了说明本算法同样适用于地面多光谱图像的融合, 在实验中, 也采用扬州某地的多光谱图像 SPOT5 作为输入图像进行融合, 其空间分辨率为 10 m。为了更好地突现融合效果以及更方便地对融合结果进行比较, 实验中选择了 SPOT5 4 个波段图像中形态特征差异较大的 B1(0.50~0.59 μm) 波段和 B2(0.61~0.68 μm) 波段的数据作为输入图像。图 3(a)(b) 为配准后的两个原图像, 图像大小为 256×256 。在 B1 波段图像中公路、桥梁边缘十分清晰, 房屋轮廓却很模糊, 而在 B2 波段图像中公路、桥梁边缘十分模糊, 房屋轮廓却相对较清晰; 在 B2 波段图像中地物(水和农田)灰度对比度小, 很容易分辨, 在 B1 波段图像中则很难分辨。图 3(i)~(n) 分别是图 2(c)~(h) 方框内区域的放大图像。

从实验 2 可知, 几种融合方法都将多光谱 B1 波段和 B2 波段图像的空间信息(如公路、桥梁边缘和房屋轮廓)有机结合, 融合后图像中公路和桥梁边缘都比 B2 图像中的更清晰, 图像的灰度对比度都有所降低, 地物较 B1 图像中更容易分辨。但小波域均值法和邻域方差加权平均法融合结果显示, 公路、桥梁边缘仍较模糊, 灰度对比度也相对较高, 说明这两种方法不能有效地保存源图像的高频信息; 小波系数相关性方法和重要中心系数法融合结果清晰度较前两种方法有所改善, 但是仍存在局部区域边界较模糊的问题, 最大绝对幅值法优于前 4 种方法, 但是也存在局部区域模糊问题。本文方法则优于前 5 种方法, 图像清晰, 局部区域边缘清晰。

为了进一步说明本文方法的有效性, 采用了标准差(SV)、信息熵(IE)、清晰度(ID)和相关系数(CC)^[12] 4 个准则来衡量图像融合的效果, 这是目前

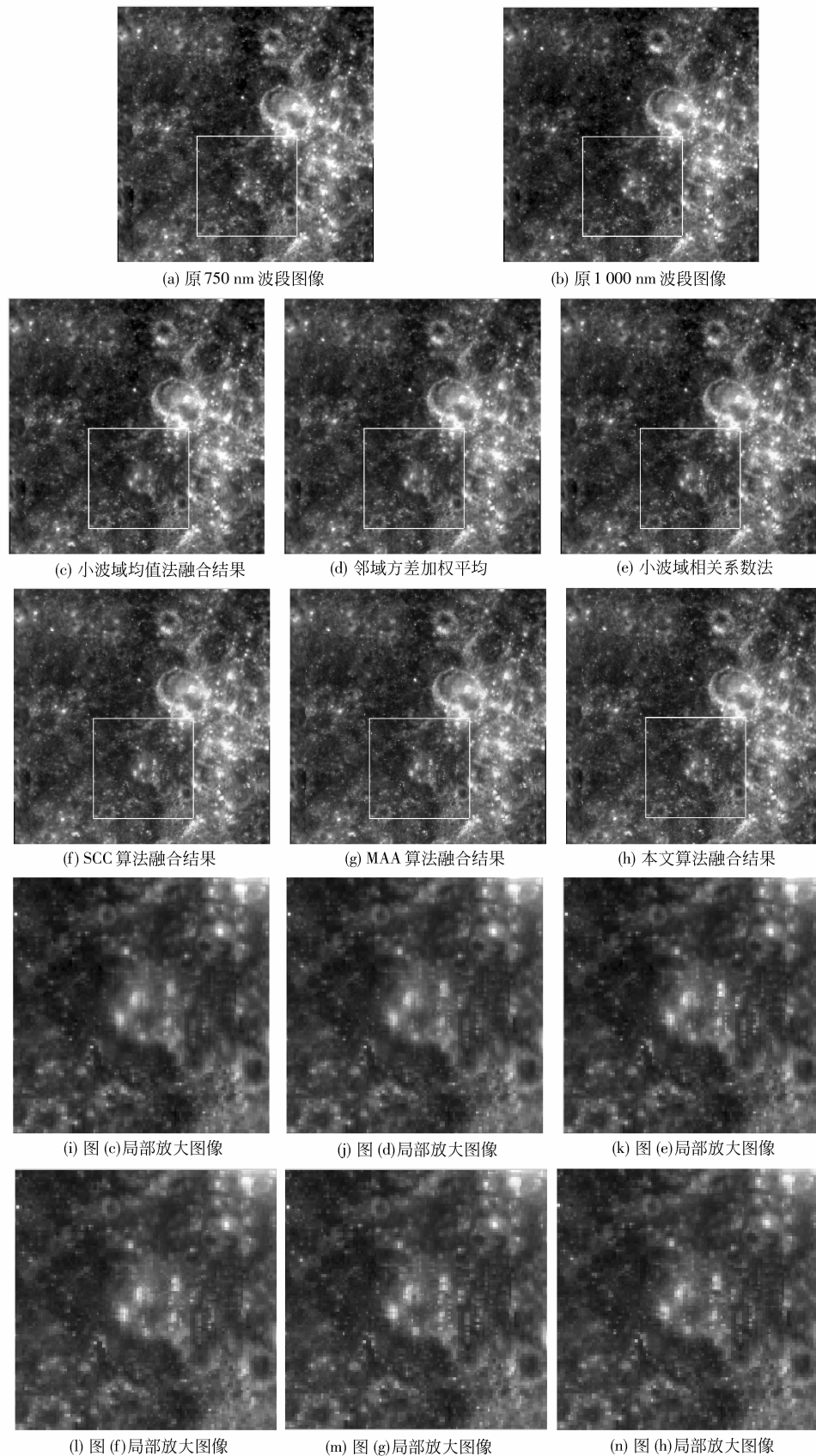


图 2 不同方法对月球表面多光谱图像融合的结果

Fig. 2 The fusion results of different methods

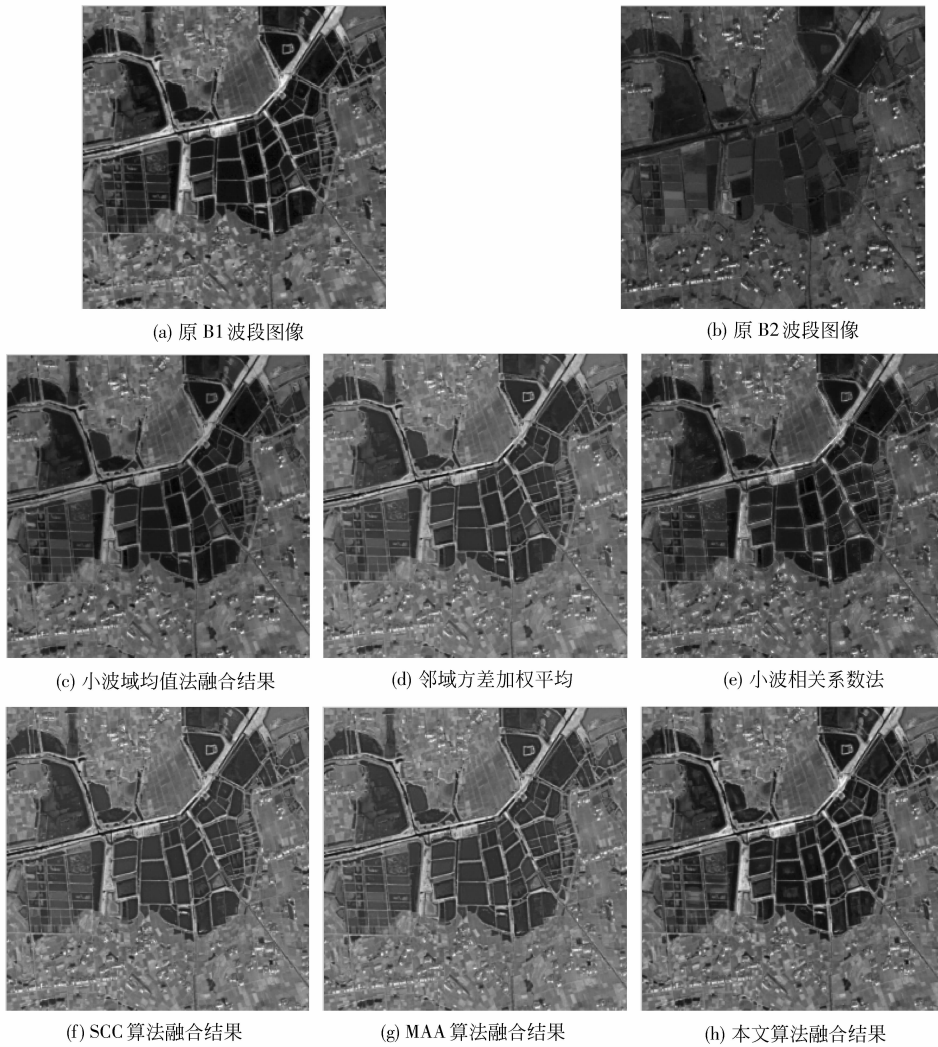


图 3 不同方法对地面多光谱图像融合的结果

Fig. 3 The fusion results of different methods

图像融合通用的量化评价指标,其中,标准差用于评价图像反差的大小,若标准差大,则图像的反差大、携带的信息更多;信息熵能够客观地反映融合图像所含信息量大小,信息熵越大,融合图像所含信息越丰富;图像清晰度(又称平均梯度)可以反映出图像微小细节反差及纹理变化特征,用来评价图像的清

晰程度。一般情况下,清晰度越大,细节保持得就越完整,融合图像就越清晰;相关系数反映了两幅图像的相关程度,通常情况下,融合图像与原图像的相关系数越大,融合图像中包含的原图像的信息就越多。表 1、表 2 分别列出了两组实验中各融合算法结果的质量评价参数值(I_A 、 I_B 表示原图像, I_F 表示融合图像)。

表 1 实验 1 中各融合算法结果的质量评价参数

Tab. 1 Comparison of the fusion results of different methods in experiment 1

	小波域均值	邻域方差	相关系数法	SCC	MAA	本文方法
标准差 (SV)	47.196 419	47.258 496	47.462 032	47.822 699	47.852 956	47.921 606
信息熵 (IE)	6.798 811	7.375 635	7.326 135	7.391 112	7.392 308	7.393 561
清晰度 (ID)	12.551 133	12.751 088	13.042 672	13.992 689	14.052 875	14.075 403
$CC(I_A, I_F)$	0.987 588	0.987 302	0.985 699	0.983 526	0.983 212	0.981 638
$CC(I_B, I_F)$	0.987 093	0.986 983	0.984 485	0.983 039	0.983 409	0.984 975

表 2 实验 2 中各融合算法结果的质量评价参数

Tab. 2 Comparison of the fusion results of different methods in experiment 2

	小波域均值	邻域方差	相关系数法	SCC	MAA	本文方法
标准差 (SV)	20.231 562	21.884 622	21.292 515	23.486 036	23.481 918	24.311 467
信息熵 (IE)	6.180 859	6.304 103	6.305 343	6.437 921	6.435 598	6.539 720
清晰度 (ID)	7.013 721	8.606 099	7.963 308	10.273 028	10.290 652	11.111 251
$CC(I_A, I_F)$	0.960 669	0.970 377	0.960 789	0.967 170	0.967 723	0.896 767
$CC(I_B, I_F)$	0.794 361	0.742 224	0.733 161	0.708 301	0.705 445	0.616 129

分析上述表 1、2, 可以得出如下结论:

1) 两组实验中, 6 种融合结果的相关系数相差不大, 这是由于几种方法中, 图像低频信息均采用的是加权平均的融合规则。实验 1 中, 两幅原图像光谱形态特征均较相似, 因此所有方法的实验结果与源图像的相关系数基本接近, 说明它们从两幅源图像中都充分提取了有用信息; 实验 2 中, 融合图像与 B1 波段图像的相关系数明显高于 B2 波段图像, 说明融合图像更有效地保持了 B1 波段图像的光谱信息。

2) 两组实验中, 小波域均值法、邻域方差和小波相关系数法的信息熵、标准差和清晰度较低, 重要中心系数法和最大绝对幅值法的信息熵、标准差和清晰度高于前 3 种方法。

3) 两组实验中, 由于本文方法采用小波平面对应位置的角点特征响应函数幅值作为融合的依据, 所以信息熵、标准差和清晰度均高于其他 5 种方法, 说明本文方法在用于月表多光谱图像(纹理特征稀少)和地面多光谱(纹理特征丰富)融合时, 融合图像的反差大、携带的信息更多, 对原图像的细节特征保持更完整, 图像更清晰。

4 结 论

在对图像角点特征和 Harris 角点算子分析的基础上, 提出角点测度的概念, 并进一步在小波变换和重要中心系数法的基础上提出一种根据 i 级小波平面上对应位置角点响应测度值进行区域计数的方法——基于小波域的角点测度重要中心系数方法。实验结果显示, 本文方法无论是视觉效果还是客观定量分析都取得了较好的结果, 说明本文算法与现有算法相比, 能够更有效地提取源图像的有用信息, 并更好地保持了原图像的不同细节特征和光谱特

征, 图像更清晰, 得到了融合质量更高的图像。此外, 实验还表明, 本文算法不仅适用于纹理特征稀少的月表多光谱图像融合, 同样适用于纹理特征丰富的地面多光谱融合。

参考文献 (References)

- [1] Jin H Y, Yang X H, Jiao L C, et al. Image Enhancement via fusion based on Laplacian pyramid directional filter banks [J]. *Image Analysis and Recognition*, 2005, 3656: 239-246.
- [2] Bai Rui, Yang Wanhai, Zhang Yanni. Remote sensing image fusion algorithm based on Contourlet transform [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(6): 1173-1177. [白蕊, 杨万海, 张艳妮. 基于 Contourlet 变换的遥感图像融合 [J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(6): 1173-1177.]
- [3] Li Xu, Michel Roux, He Mingyi, et al. A new method of image fusion based on redundant wavelet transform [C]// *Visual Information Engineering, 5th International Conference*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008, 12-17.
- [4] Tao Bingjie, Wang Jingru, Zhang Qiheng. Image fusion based on relativity of wavelet coefficients [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(3): 227-230. [陶冰洁, 王敬儒, 张启衡. 基于小波系数相关性的图像融合新方法 [J]. *激光与红外*, 2006, 36(3): 227-230.]
- [5] Li Min, Zhang Xiaoying, Mao Jie. Neighboring region variance weighted mean image fusion based on wavelet transform [J]. *Theory and Methods*, 2008, 27(1): 5-7. [李敏, 张小英, 毛捷. 基于邻域方差加权平均的小波图像融合 [J]. *理论与方法*, 2008, 27(1): 5-7.]
- [6] Youcef Chibani, Amranem Houacine. On the use of redundant wavelet transform for multisensory image fusion [C]// *The 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. Jounieh, Lebanon: IEEE, 2000, 1: 442-445.
- [7] Gao Jingmin, Liu Zhenhui, Ren Tao. A new image fusion scheme based on wavelet transform [C]// *2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control*. Dalian: Dalian University, 2008: 441-445.

- [8] Zhang Yifan, He Mingyi. Integrated orientation texture feature and its application in multi-spectral image fusion [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(1) : 82-86. [张易凡, 何明一. 综合有向纹理特征及其在多光谱图像融合中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1) : 82-86.]
- [9] Harris C, Satephens M. A combined corner and edge detector [C] // Alvey Vision Conference. Manchester: University of Manchester, 1988: 147-152.
- [10] Bijaoui A, Starck J L, Murtagh F. Restauration des images multi-echelles par l' Algorithme á Trous [J]. Traitement du Signal, 1994, 11(3) : 229-243.
- [11] Shi Wenzhong, Zhu Changqing, Tian Yan, et al. Wavelet-based image fusion and quality assessment [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 6(3-4) : 241-251.
- [12] Mallat S G. A theory for multi-resolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7) : 674-693.