

基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法

李光鑫,王 珂

(吉林大学通信工程学院,吉林长春 130025)

摘 要: 以红外和彩色可见光图像为研究对象,提出一种基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法.算法首先通过 IHS(Intensity-Hue-Saturation)变换将彩色可见光图像从 RGB 颜色空间变换到 IHS 空间,进而利用 Contourlet 变换和加权融合规则将 I 分量图像与红外图像进行融合,然后将得到的灰度融合图像进行线性拉伸以获得与 I 分量相同的均值和方差,最后用拉伸后的灰度融合图像替换原来的 I 分量,并通过 IHS 逆变换得到最终的 RGB 彩色融合图像.算法一方面将 Contourlet 变换这一新的数学工具引入到图像融合中,另一方面提供了一种新的红外和可见光图像的彩色融合方法.实验结果表明,同样采用本文的彩色融合方法,Contourlet 变换的融合结果优于小波变换,而且本文彩色融合方法的融合性能明显超过传统 IHS 变换融合法.

关键词: 彩色图像融合; Contourlet 变换; 小波变换; IHS 变换

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)01-0112-06

Color Image Fusion Algorithm Using the Contourlet Transform

LI Guang-xin, WANG Ke

(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China)

Abstract: With the particular research on thermal and visual images, a color image fusion algorithm using the contourlet transform is presented. Firstly, through the IHS (Intensity-Hue-Saturation) transform, the color visual image is converted from RGB color space to IHS space. Next, with the contourlet transform and weighted average fusion rule, the intensity component and thermal image are merged into a grayscale image, which is then linearly stretched to have the same mean and variance as the intensity component. Finally, the stretched grayscale fused image replaces the original intensity component, and the final RGB color fused image is achieved by the inverse IHS transform with the H, S and replacement component. On the one hand, with the proposed scheme, the contourlet transform as a new mathematical tool is introduced to image fusion area. On the other hand, the algorithm provided a new color image fusion strategy of thermal and visual images. The experimental results show that, with the proposed color fusion method, the fused image produced by the contourlet transform is of better quality than that obtained through the wavelet transform. Moreover, the color fusion approach obviously improves fusion performance over the traditional IHS transform fusion method.

Key words: color image fusion; contourlet transform; wavelet transform; IHS transform

1 引言

小波变换以其良好的时频分析特性被广泛地应用于图像融合,并成为图像融合领域的重要方法^[1~3].但是小波变换本身存在着一些缺点:小波变换不能最优地表示含线或者面奇异的高维函数,小波基的支撑区间为不同尺寸大小的正方形,随着分辨率变细,小波只能用“点”来逼近奇异性曲线,这样就不能稀疏地表示原函数;另外,小波变换只能“捕获”有限的方向信息,即水平、垂直和对角方向,方向性的缺乏使小波变换不能充分地利用图像本身的几何正则性,小波变换并不是最优的或者说最稀疏的函数表示方法^[4~6].

为了发展出一种新的高维函数的最优表示方法,以 Ridgelet^[7], Curvelet^[8]为代表的一系列新的数学工具应运而生.继 Curvelet 之后,Minh N Do 和 Martin Vetterli 提出了一种

“真正”的二维图像表示方法:Contourlet 变换^[5,6]. Contourlet 变换提供了一种具有灵活局部性和方向性的多分辨率图像表示方法,与小波变换不同的是:Contourlet 变换具备多个“方向”的基,不仅限于小波变换的 3 个方向;其基的支撑区间具有大小变化的“长条形”结构,继承了 Curvelet 变换的各向异性尺度关系.

Contourlet 变换在方向性和各向异性上要优于小波变换,更好地利用了图像的几何特性.以红外和彩色可见光图像为研究对象,本文提出一种基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法.一方面,结合 IHS 变换,算法提供了一种新的红外和可见光图像的彩色融合方法;另一方面,算法将 Contourlet 变换这一新的方向多分辨率分析工具引入到图像融合中,扩展了 Contourlet 变换的应用领域.实验结果表明,同样采用本文的彩色融合方法,Contourlet 变换的融合结果优于小波变换,而且无

论采用哪种变换,本文彩色融合法的融合性能均明显超过传统 IHS 变换融合法。

2 图像的 Contourlet 变换

连续 Contourlet 变换将 $L_2(R^2)$ 分解为一系列相互正交的多尺度多方向子空间(如图 1 所示):

$$L_2(R^2) = V_j \oplus \left(\bigoplus_j W_j \right) = V_j \oplus \left(\bigoplus_{k=0}^{2^j-1} W_{j,k}^{(l)} \right), \quad (1)$$

同小波多分辨率分析中定义的一样^[9], V_j 为近似子空间,尺度函数 ϕ 在 2^j 尺度上的平移函数族:

$$\{ \phi_{j,n}(t) = \phi_j(t - 2^j n) \}_n \quad (2)$$

构成 V_j 的一组标准正交基. W_j 为 2^j 尺度上的细节子空间,通过 Contourlet 变换, W_j 被分解为 2^j 个方向子空间 $W_{j,k}^{(l)}$, Contourlet 函数在 2^j 尺度上的平移函数族:

$$\{ c_{j,k,n}^{(l)}(t) = c_{j,k}^{(l)}(t - 2^{j-1} S_k^{(l)} n) \}_n \quad (3)$$

构成的紧框架张成方向子空间 $W_{j,k}^{(l)}$, 其中,

$$S_k^{(l)} = \text{diag}(2^{l_j-1}, 2), 0 \quad k < 2^{l_j-1} \text{ (近似水平方向)} \quad (4)$$

$$S_k^{(l)} = \text{diag}(2, 2^{l_j-1}), 2^{l_j-1} \quad k < 2^{l_j} \text{ (近似垂直方向)} \quad (5)$$

这就意味着对于近似水平方向和近似垂直方向, $W_{j,k}^{(l)}$ 的采样网格大小分别为 $2^{j+l_j-2} \times 2^j$ 和 $2^j \times 2^{j+l_j-2}$, $W_{j,k}^{(l)}$ 的采样网格示意图如图 2 所示. 这样,对于正整数列 $\{ l_j \}_j$, 函数族:

$$\{ \phi_{j,n}, c_{j,k,n}^{(l)} \}_j \quad j, 0 \leq k < 2^{l_j-1}, n \in Z^2 \quad (6)$$

构成 $L_2(R^2)$ 的紧框架, j, k, n 分别表示尺度、方向和像素点位置.

令 $a_L(n) = f$, $\phi_{j,n}$ 为函数 $f(t)$ $L_2(R^2)$ 与尺度函数 $\phi_{j,n}$ 的内积,那么图像 a_L 的离散 Contourlet 变换系数可表示为:

$$\{ a_j, c_{j,k}^{(l)} \}_{L < j, 0 \leq k < 2^{l_j-1}} \quad (7)$$

其中,

$$a_j(n) = f, \phi_{j,n} \quad (8)$$

$$c_{j,k}^{(l)}(n) = f, c_{j,k,n}^{(l)} \quad (9)$$

离散 Contourlet 变换分成多尺度分解和方向分解两步进行,首先由 LP(Laplacian Pyramid) 变换对图像进行多尺度分解以“捕获”奇异点,接着由方向滤波器组 DFB(Directional Filter Bank) 将同方向的奇异点合成线,Contourlet 变换的最终结果是用类似于线段(Contour segment)的基结构来逼近图像,这也是之所以称之为 Contourlet 变换的原因.LP 和 DFB 都具备完全重构特性,其组合而成的离散 Contourlet 变换也能实现完全重构,

离散 Contourlet 变换与 LP 具有相同的冗余度 1.33.

图 3 为离散 Contourlet 变换对图像的分解过程. 经过 LP 变换,输入图像 a_L 被分解成 $J-L$ 个带通图像 $b_j(j=L+1, L+2, \dots, J)$ 和低通图像 a_j , 也就是说,通过尺度 j 的 LP 变换,可将图像 a_{j-1} 分解成较粗的图像 a_j 和细节图像 b_j , 每个带通图像

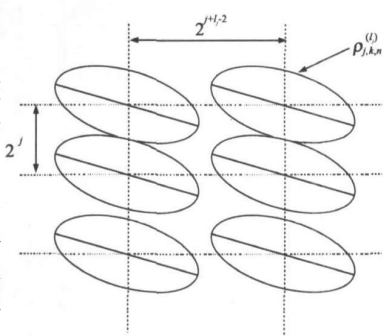


图 2 方向子空间 $W_{j,k}^{(l)}$ (近似水平方向)的采样网格

b_j 通过 l_j 层 DFB 可进一步分解成 2^{l_j} 个带通方向图像 $c_{j,k}^{(l)}(k=0, 1, \dots, 2^{l_j-1})$, 经过这样反复的迭代过程,最后离散 Contourlet 变换将图像 a_L 分解成低通图像 a_j 和一系列带通方向图像 $c_{j,k}^{(l)}$. 图 4 为 Boat 图像的离散 Contourlet 变换结果,共进行了 2 层 LP 分解,这两层分别被 DFB 分解成 4 个和 8 个带通方向图像.

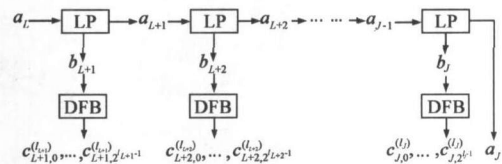


图 3 离散 Contourlet 变换对图像的多尺度多方向分解

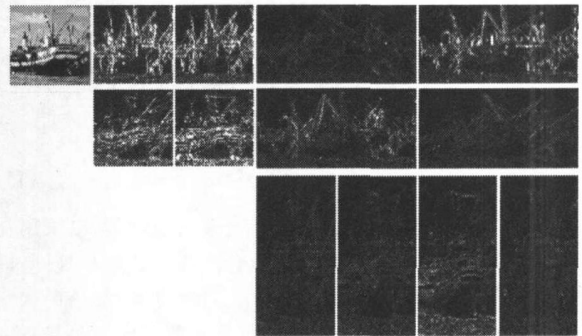


图 4 Boat 图像的离散 Contourlet 变换结果

3 算法步骤和原理

人眼只能分辨出近百个灰度级,但是却能分辨几千种颜色,所以彩色图像比灰度图像更利于目标的识别^[10]. 红外和可见光两类图像特征具有较大的互补性,现今的传感器技术能够方便地获取彩色的可见光图像,在对红外和可见光图像进行融合时,如果能够充分地利用可见光图像的彩色信息,那么得到的彩色融合结果会更符合人眼的视觉特性,从而能够增强融合图像的可辨识性. 以红外和彩色可见光图像为研究对象,本文提出一种基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法,其具体步骤和融合方法如下:

(1) 利用 IHS 变换将彩色可见光图像从 RGB 颜色空间变

换到 IHS 空间,本文采用文献[11]的方法进行 IHS 变换:

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$H = \tan^{-1} [V_2 / V_1] \quad (11)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (12)$$

(2) 基于 Contourlet 变换将 I 分量图像同红外图像进行灰度融合。

(3) 将得到的灰度融合图像 I_g 进行线性拉伸,使其与 I 分量图像具有同样的均值和方差:

$$I_g^* = (I_g / \sigma_g) (\mu_g - \mu) + \mu \quad (13)$$

其中, (μ, σ) 及 (μ_g, σ_g) 分别表示图像 I、 I_g 的均值和标准差。拉伸后灰度融合图像 I_g^* 同可见光图像的 I 分量具备相同的统计信息(二阶),从而使两者具有相近的亮度对比度。

(4) 用 I_g^* 替换可见光图像原有的 I 分量,最后利用 IHS 逆变换得到最终的 RGB 彩色融合图像, IHS 逆变换的公式如下:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{3}{\sqrt{6}} \\ 1 & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{-3}{\sqrt{6}} \\ 1 & \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

上述融合算法的核心是步骤(2),下面阐述该步骤的具体融合方法:

用 x_A, x_B 表示 I 分量图像和红外图像,首先利用 Contourlet 变换得到 x_A, x_B 的 Contourlet 系数 $\{a_{A,j,k}, c_{A,j,k}^{(l)}\}$ 和 $\{a_{B,j,k}, c_{B,j,k}^{(l)}\}$,对于低通图像采用算术平均法进行融合:

$$a_{F,j,k}(n) = \frac{1}{2} (a_{A,j,k}(n) + a_{B,j,k}(n)) \quad (15)$$

其中, $a_{F,j,k}$ 为融合低通图像。对于带通方向图像,可以采用在小波变换融合中较为常用的取大融合法作为其融合规则,即选取细节特征(如绝对值、方差、能量、对比度等)显著的像素作为融合带通方向图像的系数。该规则的假设前提是只有一幅源图像提供了有用信息,而这种假设有时是不合适的,在许多情况下两幅源图像均提供了有用信息,这时加权融合法可以作为一个更好的选择^[3]。本文构造一种加权融合规则对带通方向图像进行融合处理,其基本思想如下:

令 A, B 分别为带通方向图像 c_A 和 c_B 在窗口区域内的图像特征,当 A 和 B 相似时,采用加权平均法对 c_A, c_B 的窗口中心像素进行融合;当 A 和 B 相差较大时,只选择特征显著的像素作为融合带通方向图像 c_F 的中心像素。该加权融合规则思想可用下面的公式表示:

$$c_{F,j,k}^{(l)}(n) = w_{A,j,k}^{(l)}(n) c_{A,j,k}^{(l)}(n) + (1 - w_{A,j,k}^{(l)}(n)) c_{B,j,k}^{(l)}(n) \quad (16)$$

其中, w_A 为权值函数, w_A 的设计是构建融合规则的关键。用

$$q_{S,j,k}^{(l)}(n) = \left| c_{S,j,k}^{(l)}(n) \right| \left| c_{S,j,k}^{(l)}(n+n) \right| \quad (17)$$

来量化表示图像特征 $S(S=A, B)$,式(17)中, $R_{j,k}^{(l)}$ 为带通方向图像内以像素点为中心的窗口区域, $q_{j,k}^{(l)}(n)$ 为窗口的权系数。这样就可利用相关信号强度比^[12]:

$$M_{AB,j,k}^{(l)}(n) = q_{A,j,k}^{(l)}(n) / q_{B,j,k}^{(l)}(n) \quad (18)$$

来度量 A, B 之间的关系。设 $T \in [0, 1]$, 则 $M_{AB} > 1/T$ 可表示 A 比 B 显著,相应地 $M_{AB} < T$ 可表示 B 比 A 显著,而 A 和 B 相似的情况可用 $T < M_{AB} < 1/T$ 来表征。

根据前面的基本思想,当 $M_{AB} > 1/T$ 时,应取 $w_A = 1$; $M_{AB} < T$ 时,应取 $w_A = 0$ 。这样可以得到两个临界点 $(1/T, 1)$ 和 $(T, 0)$,对于 A, B 相似的情形,采用两个临界点的线性插值结果作为权值函数:

$$w_A = \frac{M_{AB} - T}{1/T - T} + \frac{M_{AB} - 1/T}{T - 1/T} \cdot 0 = \frac{T(M_{AB} - T)}{1 - T^2} \quad (19)$$

综合上面的设计,再规划节点 $M_{AB} = T, M_{AB} = 1/T$ 的取值和所属范围,就可以得到权值函数 w_A :

$$w_{A,j,k}^{(l)}(n) = \begin{cases} 1, & \text{当 } M_{AB,j,k}^{(l)}(n) > 1/T \\ 0, & \text{当 } M_{AB,j,k}^{(l)}(n) < T \\ \frac{T(M_{AB,j,k}^{(l)}(n) - T)}{1 - T^2}, & \text{当 } T < M_{AB,j,k}^{(l)}(n) < 1/T \end{cases} \quad (20)$$

利用上述加权融合规则可得到融合带通方向图像 c_F ,结合融合低通图像 $a_{F,j,k}$ 可进一步获得融合图像的 Contourlet 系数 $\{a_{F,j,k}, c_{F,j,k}^{(l)}\}$,然后通过 Contourlet 逆变换就得到融合图像 x_F ,这样就完成了算法的步骤(2), x_F 就是步骤(3)中的灰度融合图像 I_g 。

4 融合实验和结果分析

均方根误差和互信息是两个较为常用的图像融合质量客观评价方法^[3],它们是通过计算融合图像和标准参考图像之间的相近程度来评判融合质量的优劣。对于红外和可见光图像来说,无法得到标准的参考图像,因此均方根误差和互信息不能用于红外和可见光图像融合质量的评价。通用图像质量指标 UIQI^[13] (Universal Image Quality Index) 从相关性损失 (Loss of correlation)、亮度失真 (Luminance distortion)、对比度失真 (Contrast distortion) 三个方面综合度量了两幅图像间的差异,能够更好地反映图像间的相近程度,因此近来被广泛地应用于图像融合质量的评价^[11,14]。基于 UIQI, Gemma Piella 和 Henk Heijmans^[15] 提出了无需标准参考图像的图像融合质量客观评价方法:边缘融合质量指标 EFQI (Edge-Dependent Fusion Quality Index) 和加权融合质量指标 WFQI (Weighted Fusion Quality Index),本文采用 EFQI 和 WFQI 作为实验融合结果的客观评价指标。EFQI 的定义为:

$$Q_E(y_A, y_B, y_F) = Q_W(y_A, y_B, y_F)^{1-\alpha} \cdot Q_W(y_A, y_B, y_F) \quad (21)$$

Q_E 为 EFQI, Q_W 为 WFQI, y_A 、 y_B 、 y_F 分别为源图像 y_A 、 y_B 和融合图像 y_F 的边缘图像. WFQI 的定义如下:

$$Q_W(y_A, y_B, y_F) = c(\cdot) \left(A(\cdot) Q_0(y_A, y_F, |\cdot|) + (1 - A(\cdot)) Q_0(y_B, y_F, |\cdot|) \right) \quad (22)$$

$$c(\cdot) = C(\cdot) / \left(\frac{C(\cdot)}{C(\cdot)} \right) \quad (23)$$

$$C(\cdot) = \max(|y_A|, |y_B|) \quad (24)$$

$$A(\cdot) = (|y_A|) / (|y_A| + |y_B|) \quad (25)$$

$(|y_A|)$ 为图像 y_A 在窗口内的某些显著特征,如方差、能量等,是所有窗口的总和, Q_0 为总体图像质量指标 (Overall image quality index),其详式见文献 [15]. WFQI、EFQI 是两个综合考虑了人类视觉特性的客观评价指标,WFQI 衡量了融合图像包含源图像特征信息的多少,在 WFQI 基础上,EFQI 更着重考虑了人眼对图像边缘信息的敏感性,二指标的取值范围均为 $[-1, 1]$,越接近于 1 表示融合图像的质量越好.

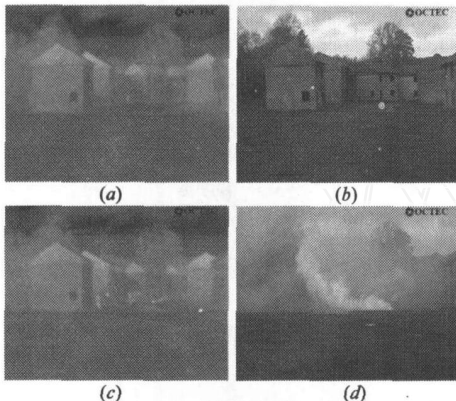


图 5 Octec1 和 Octec2 两组实验源图像:(a)、(b) Octec1 红外和彩色可见光图像;(c)、(d) Octec2 红外和彩色可见光图像

本文算法步骤 (2) 也可以采用小波变换对图像进行多尺度分解,此时小波低频分量图像采用算术平均法进行融合,小波高频分量图像采用本文所提出的加权规则进行合成.实验中将 Contourlet 变换融合法和小波变换融合法的融合结果进行了比较;另外,传统 IHS 变换融合法^[16]也可将红外和彩色可见光图像进行融合,为了验证本文彩色算法的有效性,文中也给出了 IHS 变换融合法的融合结果.实验中采用在无烟雾遮挡和有烟雾障碍两种情况下拍摄的 Octec1 和 Octec2 两组红外和彩色可见光图像作为源图像(见图 5);采用的小波变换为双正交 5-3 小波,分解层数为 4;Contourlet 变换的 LP 采用是 5-3 双正交滤波器,分解层数为 4,DFB 采用是 23-45 双正交 Quincunx 滤波器^[17],最细尺度的分解方向数为 16;小波高频分量图像及 Contourlet 带通图像利用加权规则进行融合时,阈值 T 均取 0.7,窗口区域大小均取 3×3 ,相应的窗口系数矩阵均为 $\{1/16, 1/8, 1/16\}$, $\{1/8, 1/4, 1/8\}$, $\{1/16, 1/8, 1/16\}$. 各种算法的融合效果如图 6 所示,融合结果的客观评价如表 1、2 所示.

由表 1、2 的客观评价结果可以看出,本文彩色融合法(无论是采用 Contourlet 变换还是小波变换)的 EFQI 和 WFQI 指标均明显高于 IHS 变换融合法,这说明本文算法的融合性能

优于 IHS 变换融合法.图 6(a)、(b) 分别展示了 IHS 变换融合法对 Octec1 和 Octec2 的融合结果,可以看出, IHS 算法较好地保持了红外图像提供的目标信息,两幅融合图像中均能清楚地再现人的信息,Octec2 场景中的火点也清晰可见.但无论是对于 Octec1 还是 Octec2,源彩色可见光图像中树木、地面、楼房的纹理信息,场景的颜色信息在 IHS 算法的融合图像中均不能得以很好的体现,Octec2 场景中烟雾障碍的空间位置信息也明显丢失. IHS 变换融合法直接用红外图像替换彩色可见光图像的 I 分量,因此其融合图像较好地突出了红外图像的光谱信

息,但是却丢失了可见光图像中大量的细节信息. Contourlet 变换和小波变换的运用使得源图像在各个频率通道内实现更为细致的融合,因此本文彩色融合法的融合图像(见图 6(c)~(f))更全面地体现了红外图像的光谱信息和可见光图像的空间细节信息.而且同 IHS 变换融合法相比,本文彩色融合法的

表 1 以 Octec1 为源图像,各算法融合结果的客观评价

融合方法	EFQI	WFQI
IHS 变换融合法 (R、G、B)	0.2063	0.1747
	0.1894	0.1550
	0.2945	0.2680
小波变换融合法 (R、G、B)	0.7634	0.8070
	0.7654	0.8074
	0.7958	0.8290
Contourlet 变换融合法 (R、G、B)	0.7794	0.8172
	0.7809	0.8174
	0.8091	0.8371

表 2 以 Octec2 为源图像,各算法融合结果的客观评价

融合方法	EFQI	WFQI
IHS 变换融合法 (R、G、B)	0.4344	0.4427
	0.4492	0.4414
	0.5493	0.5500
小波变换融合法 (R、G、B)	0.8004	0.8153
	0.8088	0.8178
	0.8308	0.8364
Contourlet 变换融合法 (R、G、B)	0.8041	0.8165
	0.8140	0.8209
	0.8347	0.8386

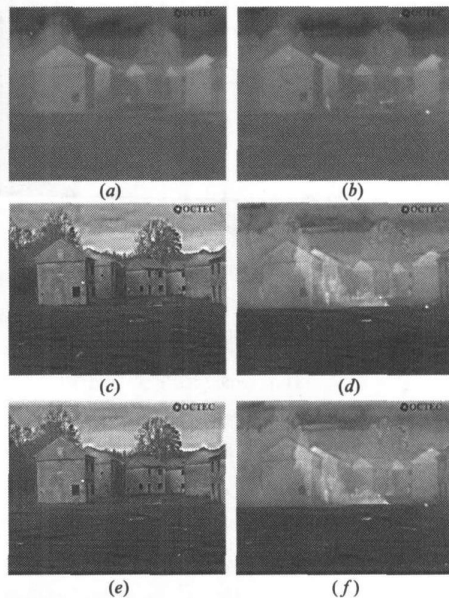


图 6 各种算法的彩色融合图像:(a)、(b) IHS 变换融合法分别对 Octec1 和 Octec2 的融合结果;(c)、(d) 小波变换融合法分别对 Octec1 和 Octec2 的融合结果;(e)、(f) Contourlet 变换融合法分别对 Octec1 和 Octec2 的融合结果

融合图像具有更接近于可见光图像的自然色彩. 这一方面是由于基于 Contourlet 变换和小波变换的多分辨率图像融合更好地囊括了各源图像的特征信息, 另一方面是因为式(13)所示的线性拉伸过程有效地降低了灰度融合图像同可见光图像 I 分量之间的亮度差异, 这两方面的因素使得灰度融合图像与可见光图像颜色分量 (H 和 S) 之间的映射更加准确. 接近于可见光图像的自然彩色效果符合人类的视觉感受, 有利于提高融合图像的解释质量.

比较表 1、2 中 Contourlet 变换融合法和小波变换融合法的实验数据, 可以看出, 在 R、G、B 三通道下, Contourlet 变换融合法的 EFQI 和 WFQI 指标均高于小波变换融合法, 这说明 Contourlet 变换融合法的性能要好于小波变换融合法. Contourlet 变换同小波变换一样, 具备良好的多分辨率性和局部性, 但不同的是, Contourlet 变换具有更好的方向性和各向异性, 能够有效地处理曲线奇异性, 因此 Contourlet 变换融合法保留源图像特征信息的能力更强, 具有更好的边缘保持能力, 从而能够获得更高的客观评价指标. 图 6(c)、(d) 和图 6(e)、(f) 分别展示了小波变换融合法和 Contourlet 变换融合法对 Octec1 和 Octec2 的融合结果, 同小波变换融合法相比, Contourlet 变换融合法的融合图像的纹理更加清晰, 场景实物边缘具有更好的单边性. 需要指出的是, 利用 Contourlet 变换虽然能够取得优于小波变换的融合结果, 但是 Contourlet 变换的算法复杂度更高. 对于一个 $N \times N$ 大小的图像, 如果 Contourlet 变换所需的 LP 和 DFB 的滤波器长度均为 K (通常 LP 和 DFB 的滤波器长度不等, 为了保持与小波变换的可比性, 本文假设二者长度相等), 那么进行 Contourlet 分解所需的运算次数最大接近于 $\frac{2}{3}(K+2)N^2 + \frac{4}{3}K \max\{l_j\}N^2$; 如果小波变换所用的低高通滤波器长度均为 K , 可以证明进行小波分解所需的运算次数最大接近于 $\frac{8}{3}KN^2$. 可见即使 $\max\{l_j\} = 2$ (通常大于 2), Contourlet 分解也要比小波分解多出 $\frac{2}{3}(K+2)N^2$ 次运算.

5 结论

基于 Contourlet 变换, 本文提出了一种红外和可见光图像的彩色图像融合算法, 该彩色融合方法的性能明显超过传统 IHS 变换融合法, 同小波变换相比, 算法利用 Contourlet 变换可以取得更为优良的融合结果. 同样作为一种具有良好局部性的多分辨率图像表示方法, Contourlet 变换的方向性和各向异性要优于小波变换, 因此 Contourlet 变换在图像融合乃至整个图像处理领域应该具有更好的应用前景. 与以往的红外和可见光图像的彩色融合方法不同^[18,19], 本文的彩色融合算法直接利用了可见光图像的真实彩色信息, 所得到的彩色融合图像更大程度地利用了图像场景的自然色彩, 因此比较符合人眼的视觉感受. 而且利用两点线性插值, 算法中给出了一种新的加权融合规则 (见算法步骤(2)), 该规则还可用于遥感、医学等其他的图像融合领域. 值得一提的是, Contourlet 变换是一种正在发展和完善的数学工具, 其应用面还有待进一步的扩展, 本文只是将其引入到图像融合当中, 在其他图像处理领

域的应用还需更多学者的尝试和探究.

致谢 本文的红外和彩色可见光实验源图像由 Octec 公司提供, 在此表示感谢.

参考文献:

- [1] G Pajares, J M Cruz. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(9): 1855 - 1872.
- [2] Z Zhang, R S Blum. A categorization and study of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(8): 1315 - 1326.
- [3] G Piella. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions[J]. Information Fusion, 2003, 4(4): 259 - 280.
- [4] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975 - 1981.
Jiao Li-cheng, Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1975 - 1981. (in Chinese)
- [5] M N Do, M Vetterli. Contourlets [A]. G V Welland. Beyond Wavelets [C]. New York: Academic Press, 2003.
- [6] M N Do, M Vetterli. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091 - 2106.
- [7] E J Candès. Ridgelets: Theory and Applications [D]. USA: Department of Statistics, Stanford University, 1998.
- [8] E J Candès, D L Donoho. Curvelets-A surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges [A]. L L Schumaker, et al. Curves and Surfaces [C]. Nashville: Vanderbilt University Press, 1999.
- [9] S G Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. San Diego, California: Academic Press, 1998.
- [10] D A Scribner, J M Schuler, P R Warren, et al. Infrared color vision: separating objects from backgrounds[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3379: 2 - 9.
- [11] Z Wang, D Ziou, C Armenakis, et al. A comparative analysis of image fusion methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(6): 1391 - 1402.
- [12] 李光鑫, 王珂, 张立保. 加权多分辨率图像融合的快速算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(12): 1529 - 1536.
Li Guang-xin, Wang Ke, Zhang Li-bao. Computationally efficient algorithm of multiresolution image fusion with weighted average fusion rule[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(12): 1529 - 1536. (in Chinese)
- [13] Z Wang, A C Bovik. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81 - 84.
- [14] A Toet, M A Hogervorst. Performance comparison of different graylevel image fusion schemes through a universal image quality index[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5096: 552 - 561.

- [15] G Piella, H Heijmans. A new quality metric for image fusion [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing[C]. Barcelona, Spain, 2003. III-173 - 176.
- [16] E M Schetselaar. Fusion by the IHS transform: Should we use cylindrical or spherical coordinates? [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4): 759 - 765.
- [17] S M Phoong, C W Kim, P P Vaidyanathan, et al. A new class of two-channel biorthogonal filter banks and wavelet bases [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43 (3): 649 - 665.
- [18] A Toet, J Walraven. New false color mapping for image fusion [J]. Optical Engineering, 1996, 35(3): 650 - 658.
- [19] A M Waxman, D A Fay, A N Gove, et al. Color night vision: fusion of intensified visible and thermal IR imagery [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2463: 58 - 68.

作者简介:



李光鑫 男, 1978 年出生于吉林长春, 2001 年、2005 年分别于北京理工大学自动控制系、吉林大学通信工程学院获工学学士和工学硕士学位, 现为吉林大学通信工程学院博士研究生, 主要研究方向为图像融合、图像处理. E-mail: guangxin.li@126.com



王珂 男, 1955 年出生于河北秦皇岛, 吉林大学通信工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、无线通信系统. E-mail: wangke@jlu.edu.cn

www.cnki.net