

基于 NSCT 和 IHS 变换域的灰度可见光 与红外图像融合方法

孔韦韦, 雷英杰, 雷 阳, 倪学亮

(空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 针对灰度可见光与红外图像的融合问题, 提出了一种基于非下采样轮廓波变换(non-subsampled contourlet transform, NSCT)和 IHS 变换域的自适应融合方法。该方法利用 IHS 变换域的有效分离图像亮度信息和光谱信息的优势, 对灰度可见光图像进行彩色传递并得到亮度、色调、饱和度(intensity hue saturation, IHS)三个分量的值; 然后通过 NSCT 变换分别对可见光图像的 I 分量和红外图像进行多尺度和多方向分解, 并采用一定的融合规则得到融合图像的低频分量和高频分量, 而后进行 NSCT 逆变换得到灰度融合图像并将其作为最终融合图像的 I 分量, 最后进行 IHS 逆变换得到红绿蓝(red-green-blue, RGB)彩色融合图像。理论分析和仿真实验验证了该算法的有效性。

关键词: 图像融合方法; 亮度、色调、饱和度变换; 非下采样轮廓波变换; 彩色传递

中图分类号: TP 182

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.07.009

Fusion technique for gray-scale visible light and infrared images based on NSCT and IHS transform

KONG Wei-wei, LEI Ying-jie, LEI Yang, NI Xue-liang

(Missile Inst., Air Force Engineering Univ., Sanyuan 713800, China)

Abstract: With regard to the fusion problem of gray-scale visible light and infrared images, an adaptive fusion technique based on non-subsampled contourlet transform (NSCT) and intensity hue saturation (IHS) transform is presented. With the help of the advantages of IHS transform, which can separate the intensity information from the spectrum information in the image, the color transfer approach is conducted to colorize the gray-scale visible light image and the three component values of I, H and S can be gained. Multi-scale and multi-direction decomposition of the gray-scale visible light image's intensity component and infrared image are performed by NSCT. By adopting certain fusion rules, the low-frequency and high-frequency components of the fusion image can be gained, besides, being the intensity component of the final fusion image, the gray-scale fusion image can be also got by use of the inverse NSCT. Finally, the red-green-blue (RGB) colorized fusion image is reconstructed by the inverse IHS. The theory analysis and simulation examples show that the technique is effective.

Keywords: image fusion technique; intensity hue saturation (IHS) transform; non-subsampled contourlet transform (NSCT); color transfer

0 引言

图像融合就是将多个图像传感器或同一图像传感器以不同工作模式获取的关于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^[1]。目前, 图像融合技术已被广泛地应用于遥感^[2-5]、军事、医学图像处理^[6]、目

标识别^[7]以及计算机视觉等领域。近年来, 国内外许多学者针对图像融合问题提出了多种融合算法, 而基于多分辨率分析的图像融合方法由于可以在不同尺度、不同分辨率上有针对性地突出图像的重要特征和细节信息, 更是被广泛地应用于实际, 并取得了巨大成功。

小波变换^[8-9]以其具有的多分辨率和良好的时频分析

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-11-30。

基金项目: 国家自然科学基金(60773209); 陕西省自然科学基金(2006F18)资助课题

作者简介: 孔韦韦(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为图像信息处理和智能信息融合。E-mail: kwwking@163.com

特性,在图像融合领域得到广泛应用,但小波的每一级分解只能“捕获”有限的方向信息,即水平、垂直和对角线方向,因而它不是最稀疏的函数表示方法。随后出现的脊波^[10]理论和曲波^[11]理论虽在一定程度上对小波的缺陷进行了改进,但仍不足以高效地表示图像。2002年,Do和Vetterli提出了一种“真正”的二维图像表示方法——轮廓波变换^[12](contourlet transform, CT)。CT不仅具有小波变换的多尺度、时频局部特性,而且还有很好的方向性和各向异性,能够得到图像的稀疏表达,文献^[13]将其应用于图像融合,并取得了较好的融合效果。然而,由于CT在对图像进行分解和重构的过程中,需要对图像进行上下采样,这使得CT不具有平移不变性,图像融合中会表现出明显的Gibbs现象。文献^[14]提出了一种改进的CT——非下采样CT(non-subsample contourlet transform, NSCT),NSCT不仅继承了CT的多尺度、多方向等优良特性,而且还具备平移不变性,具有优良细节“捕捉”能力。

本文提出一种基于NSCT和IHS变换域的灰度可见光和红外图像融合方法。该方法利用IHS分量的相对独立性和NSCT对图像细节信息优异的“捕捉”能力对灰度可见光和红外图像进行了融合并实现了彩色传递。仿真结果表明该方法能很好地将源图像中的有用信息提取并注入到融合图像中,具有优良的视觉效果,因而该方法在目标检测和导弹精确制导领域中具有很好的应用前景。

1 图像的NSCT变换

NSCT变换是一种离散图像的多尺度、多方向计算框架,它是在CT的理论基础上提出的。同CT类似,NSCT变换仍将多尺度分析和多方向分析分开进行,不同的是NSCT在图像分解和重构过程中,取消了直接对相应的信号分量进行上采样和下采样,而是直接对相应的滤波器进行采样,从而使得NSCT除了具有多尺度、多方向和良好的时频特性外,还具备平移不变性,而这一性质对图像融合质量又是十分关键的。

NSCT变换分为非下采样金字塔分解(nonsampled pyramid, NSP)和非下采样方向滤波器组分解(nonsampled directional filter bank, NSDFB)两大部分。前者采用二通道非下采样滤波器组使NSCT具备了多尺度性,源图像经一级NSP分解可产生一个低通子带图像和一个带通子带图像,以后每一级NSP分解都在低通分量上迭代进行以获取图像中的奇异点。因而,二维图像经 k 级NSP分解后,可得到 $k+1$ 个与源图像具有相同尺寸大小的子带图像,其中包括1个低通图像和 k 个大小相同但尺度不同的带通图像,该分解类似于采用à trous算法进行的一维非下采样小波变换,三级金字塔分解过程如图1所示。NSDFB是在Bamberger和Smith所设计的扇形方向滤波器组^[15]基础上所构造的一组二通道非下采样滤波器组,它可将NSP变换每一尺度上的带通图像再进行 l 级方向分解,并得到 2^l 个与源图像具有相同尺寸大小的方向子带图像,

从而实现频域中更为精确的方向分解。NSDFB赋予了NSCT的多方向性质,一个四通道方向分解如图2所示。

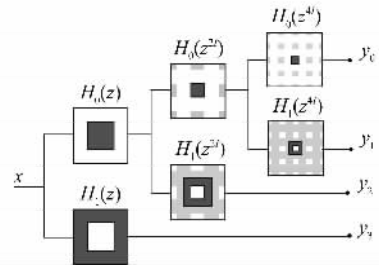


图1 三级金字塔分解过程

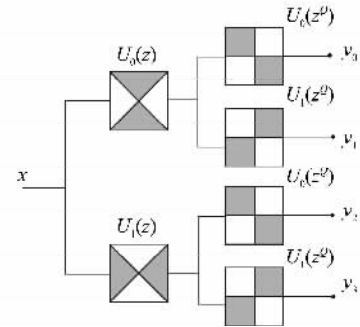


图2 四通道方向分解图

2 基于NSCT和IHS的图像融合

IHS空间^[16-17]由亮度、色调和饱和度三个相对独立的分量构成,它可将一幅彩色图像中携带的亮度信息与彩色信息相分离。其中,亮度代表图像的亮度信息,而色调和饱和度则反映图像的光谱信息,该空间符合人的视觉特性,因而,基于多分辨率分析的融合更适合在IHS彩色空间中进行,但该思路不适用于灰度可见光图像和灰度红外图像的融合。因而,本文拟在灰度可见光图像进行NSCT变换前,对其进行彩色传递,传递完后再提取其I分量参与NSCT变换,从而提高人眼对图像的分辨能力。

NSCT变换的目的在于将源图像进行一系列的尺度分解和方向分解,随后对不同尺度和不同方向频带分别进行融合处理。其中,分解所得到的低通图像代表了源图像的主要信息,可看做源图像的近似分量,而一系列带通图像则分别从不同方向、不同角度描述了源图像的边缘信息,是源图像的细节分量。而可见光图像和红外图像的成像机理又是不同的,可见光图像可以提供丰富的背景信息,但对热辐射源信息不敏感,而背景信息又主要分布在低频区域;红外图像能提供热辐射源信息,但热辐射源信息主要集中在高频区域,因此,对这两种图像进行NSCT分解可将二者的低通分量和带通分量分离,有利于将可见光图像中丰富的背景信息和红外图像中的热辐射源信息相融合,增强图像的信息表达能力。

2.1 图像融合总体框架

基于NSCT和IHS变换的图像融合具体步骤如下:
 输入 灰度可见光图片V、红外图片IR和与灰度可见

光图片场景类似的彩色参考图片 Can 各一张;

输出 经过 NSCT 和 IHS 变换处理后的可见光和红外图片的彩色融合图片 F 。

步骤 1 利用彩色参考图片对灰度可见光图片进行彩色传递,并提取出它的 I 分量 V_I ;

步骤 2 采用 NSCT 对 V_I 和 IR 分别进行多尺度和多方向分解,并得到各自的低通子带系数 $\{V_{I_j}^l, IR_j^l\}$ 和带通子带系数 $\{V_{I_j}^h, IR_j^h\}$, 其中, J 为 NSP 分解尺度数, $l_j (1 \leq j \leq J)$ 为 j 尺度下的方向分解级数;

步骤 3 采用一定的低通分量和带通分量融合规则对步骤 2 中的系数进行融合,得到融合后的低通子带系数 f_j 和带通子带系数 f_j^h ;

步骤 4 对步骤 3 中的融合系数进行 NSCT 逆变换得到融合图像 F' ;

步骤 5 将 F' 作为新的 I 分量,联合彩色传递后可见光图片的 H 分量和 S 分量作 IHS 逆变换,得到最终的 RGB 彩色融合图像 F 。

2.2 灰度可见光的彩色传递

在将参考图像的颜色信息传递给灰度可见光图像之前,首先必须对参考图像进行 RGB 到 IHS 空间的转换,这是因为 IHS 空间的三分量相互独立,因而改变单个分量的值,将不会影响到另外两个分量。RGB 到 IHS 空间的转换沿用文献[18]中方法进行。转换完毕后,首先根据灰度可见光图像的亮度分量对参考图像的亮度分量加以修改,然后再将参考图像中与灰度可见光图像像素统计特征值最为匹配的像素点的 H 分量和 S 分量传递给灰度可见光图像,使其获得参考图像的颜色信息,具体传递过程如下:

(1) 修改彩色参考图像中的亮度分量

$$I_{can}(i)' = \frac{\sigma_V}{\sigma_{can}}(I_{can}(i) - \mu_{can}) + \mu_V \quad (1)$$

式中, $I_{can}(i)$, $I_{can}(i)'$ 分别为修改前参考图像的亮度分量值和修改后参考图像的亮度分量值; μ_V , σ_V 和 μ_{can} , σ_{can} 分别为灰度可见光和参考图像的亮度均值和标准差。

(2) 将灰度可见光和修改后参考图像进行窗口邻域划分,计算两幅图像对应邻域中对应像素之间的差异度

$$diff = (\mu_V - \mu'_{can})^2 + (\sigma_V - \sigma'_{can})^2 \quad (2)$$

式中, μ_V , σ_V 和 μ'_{can} , σ'_{can} 分别为灰度可见光和修改后参考图像的亮度均值和标准差。

(3) 将灰度可见光图像中所有像素点均与修改后参考图像对应像素求差异度 $diff$, 并找到 $diff$ 取最小值时所对应修改后参考图像的像素点,并将该像素点的 H 分量和 S 分量传递给对应的灰度可见光图像像素。

2.3 低通图像融合算法

针对遥感图像的低通分量融合,目前主要有以下几种策略:“偏袒”法,就是将两幅或者多幅源图像中光谱特性较好的一幅提取出低频分量直接作为融合图像的低频分量;绝对平均法,将若干幅源图像的低频分量分别赋予同等权重加以融合;自适应加权平均法,以图像中某些可以量化的

特征值来衡量各幅源图像低频分量的权值。可见光图像背景信息丰富,红外图像热辐射源信息突出,如果单一取可见光图像的低频分量作为融合图像的低频分量,必将损失红外图像中的一部分热辐射源信息,而如果采取绝对平均法,不但会损失可见光图像的部分光谱信息,而且还会造成融合图像的整体对比度下降,影响视觉效果,因此,本文提出一种基于区域平均能量的融合算法:

(1) 针对图像的复杂程度可以选择不同的窗口大小加以处理,通常取一个 $n \times n$ 的正方形邻域, n 为不小于 3 的奇数,如果图像灰度分布和纹理比较复杂, n 可取较大一些的值。图像区域内的平均能量为

$$E'_x(x, y) = \frac{1}{n \times n} \sum_{m=-(n-1)/2}^{m=(n-1)/2} \sum_{r=-(n-1)/2}^{r=(n-1)/2} c^2(x+m, y+r) \quad (3)$$

式中, $E'_x(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的低通区域平均能量; x 代表彩色传递后可见光图像的 I 分量图像或红外图像; c 代表低通分量系数。

(2) 计算两幅图像对应的区域平均能量的匹配度

$$M(x, y) = \frac{2}{E'_{V_I} + E'_{IR}} \cdot$$

$$\sum_{m=-(n-1)/2}^{m=(n-1)/2} \sum_{r=-(n-1)/2}^{r=(n-1)/2} c_{V_I}(x+m, y+r) \cdot c_{IR}(x+m, y+r) \quad (4)$$

(3) 根据算术平方数的性质得知

$$0 \leq M(x, y) \leq n^2 \quad (5)$$

为了方便对比两幅图像的区域平均能量匹配度,特将 $m(i, j)$ 进行归一化处理,得到归一化后的区域平均能量匹配系数

$$M'(x, y) = \frac{2}{n^2(E'_{V_I} + E'_{IR})} \cdot \sum_{m=-(n-1)/2}^{m=(n-1)/2} \sum_{r=-(n-1)/2}^{r=(n-1)/2} c_{V_I}(x+m, y+r) \cdot c_{IR}(x+m, y+r) \quad (6)$$

归一化匹配度的意义在于描述了两幅图像对应像素点的特征相似程度, $M'(i, j)$ 的值越大代表两幅图像的像素点特征越接近,反之,则表明两图像像素点特征差异越明显。

(4) 根据归一化匹配度的值决定两幅图像对应低频分量的加权系数,在这里取阈值 $\lambda = 0.85$, 融合图像的低频系数选取原则如下

$$C_F(x, y) =$$

$$\begin{cases} C_{V_I}(x, y), & \text{若 } M'(x, y) \leq \lambda \text{ 且 } E'_{V_I}(x, y) \geq E'_{IR}(x, y) \\ C_{IR}(x, y), & \text{若 } M'(x, y) \leq \lambda \text{ 且 } E'_{IR}(x, y) \geq E'_{V_I}(x, y) \\ 0.5 \times (C_{V_I}(x, y) + C_{IR}(x, y)), & \text{若 } M'(x, y) > \lambda \end{cases} \quad (7)$$

式中, F, V_I, IR 分别代表融合图像,彩色传递后可见光图像的 I 分量图像和红外图像。

2.4 带通图像融合算法

图像的带通信息通常对应其中的细节和边缘信息,而在红外图像中,带通分量包含的信息往往就是其中具备一定信噪比的热辐射源信息或目标信息,因此针对带通分量的融合思想十分重要。本文提出的带通分量融合算法仍将从区域角度考虑,不同于大多数文献的是,我们将采用邻域系数差

和信息熵双重指标进行融合图像带通分量系数的选取。

(1) 受到文献[19]的启发,我们对“邻域系数差”这一范数加以定义,并将其作为带通分量系数融合指标之一

$$\| e_x(x, y) \|_{n \times n} =$$

$$\sum_{m=-(n-1)/2}^{m=(n-1)/2} \sum_{r=-(n-1)/2}^{r=(n-1)/2} || e_x(x+m, y+r) | - e'(x, y)_{n \times n} | \quad (8)$$

式中, $e'(x, y)_{n \times n}$ 为 $n \times n$ 邻域内的带通分量系数绝对值的平均值,表达式如下

$$e'(x, y)_{n \times n} =$$

$$\frac{1}{n^2} \sum_{m=-(n-1)/2}^{m=(n-1)/2} \sum_{r=-(n-1)/2}^{r=(n-1)/2} | e_x(x+m, y+r) | \quad (9)$$

$$e_F(x, y) = \begin{cases} e_{V_I}(x, y), & \text{若 } \| e_{V_I}(x, y) \|_{n \times n} > \| e_{IR}(x, y) \|_{n \times n} \\ e_{IR}(x, y), & \text{若 } \| e_{V_I}(x, y) \|_{n \times n} < \| e_{IR}(x, y) \|_{n \times n} \\ e_{V_I}(x, y), & \text{若 } \| e_{V_I}(x, y) \|_{n \times n} = \| e_{IR}(x, y) \|_{n \times n} \text{ 且 } En_{V_I}(x, y) \geq En_{IR}(x, y) \\ e_{IR}(x, y), & \text{若 } \| e_{V_I}(x, y) \|_{n \times n} = \| e_{IR}(x, y) \|_{n \times n} \text{ 且 } En_{V_I}(x, y) < En_{IR}(x, y) \end{cases} \quad (11)$$

式中, F, V_I, IR 分别代表融合图像,彩色传递后可见光图像的 I 分量图像和红外图像。

3 仿真实验

为了对上述理论分析和算法作进一步的验证,并对灰度可见光和红外图像的融合结果进行量化测量,本文选取一组灰度可见光和红外图像进行仿真融合实验,这一组图像均来源于荷兰 TNO Human Factors Research Institute 提供的“UN Camp”可见光和红外序列图,大小均为 360×270 ,如图 3(a)和 3(b)所示,图 3(c)为一幅场景与灰度可见光图像相似的彩色参考图像。针对图像的融合方法,本文将分别采用二维离散小波变换方法(double wavelet transform, DWT),CT 和文中提出的 NSCT 变换方法,为了进行有效对比,三种变换方法的分解级数均定为 3 级,并令所有方法的邻域大小尺寸均为 3×3 ,对应的融合图像如图 3(d)、3(e)和 3(f)所示。图 3(g)为以图 3(c)作为参照对 NSCT 法灰度融合图像进行 IHS 逆变换后的彩色融合图像。

此外,由于可见光和红外图像无法得到标准的融合参考图像,传统的均方根误差指标将无法用于衡量图像的融合质量,因而本文采用了熵,交叉熵,标准差和平均梯度四个评价参数对三种方法的灰度图像融合性能作出了定量比较,比较结果如表 1 所示。

表 1 三种方法的灰度图像融合性能比较

	熵	交叉熵	标准差	平均梯度
DWT	5.908 1	0.176 6	23.44 9	5.733 7
CT	6.124 4	0.031 1	23.13 2	9.216 5
NSCT	6.726 2	0.025 3	29.76 6	9.895 0

熵用来刻画一个对象所蕴涵的平均信息量的多少,一幅图像的熵越大,表明它所包含的信息量就越丰富;交叉熵用来测定两幅图像间灰度分布的信息差异,就融合图像而

式中,下标 x 代表彩色传递后可见光图像的 I 分量图像或红外图像, e 代表带通分量系数。

(2) 信息熵可以用来有效地描述图像中的信息量及其分布情况,因而也可以作为指导带通分量系数融合的一项指标,表达式如下

$$\| En_x(x, y) \|_{n \times n} =$$

$$- \sum_{m=-(n-1)/2}^{m=(n-1)/2} \sum_{r=-(n-1)/2}^{r=(n-1)/2} f_x(x+m, y+r) \ln f_x(x+m, y+r) \quad (10)$$

式中, f 代表像素点的灰度值。

(3) 融合图像带通分量系数选取原则如下

言,交叉熵的值越小,融合图像从源图像中汲取的信息就越多,融合效果就越好;标准差描述了像素点与图像平均值的离散程度,标准差越大,图像反差越大,效果越好;最后一个指标平均梯度用来衡量一幅图像的清晰程度,平均梯度越大,对应的图像越清晰。

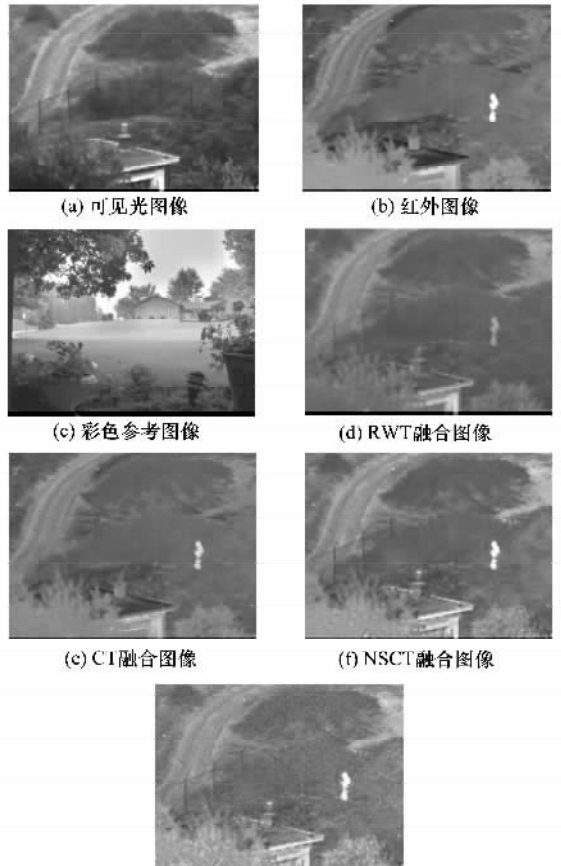


图 3 源图像及三种方法的融合效果图

针对三种方法的灰度融合图像,从表 1 的客观评价结果来看,本文提出的 NSCT 方法的四项指标均优于其他两种方法,其中熵值高于 DWT 法达 14%,超过 CT 法也近 10%;对应的交叉熵指标值远远低于 DWT 法,而和 CT 法基本相当,这些都表明 NSCT 法融合图像不仅包含丰富的信息量,而且还很好地保持了源图像中的重要边缘和细节特征信息。三种方法的标准差指标,DWT 法略高于 CT 法,但两者均大幅低于 NSCT 法,差距接近于 7;至于反映图像清晰度的平均梯度指标,DWT 法最不理想,指标值不足 6,而 CT 法和 NSCT 法的指标值均超过 9,其中 NSCT 法略高于 CT 法,体现出两种方法较为理想的视觉效果。

从直观角度加以分析,三种方法都较好地保持了两幅源图像中的重要信息,并将二者的特征信息作了较好地融合,三幅灰度融合图像不仅保留了可见光图像中丰富的背景信息,而且突出了红外源图像中的目标信息。但不难看出,DWT 法融合图像的整体对比度最差,NSCT 法最好,CT 法其次。其中 DWT 法的目标信息和背景信息反差较小,相对另外两种方法,目标信息尤其是图像中人的信息不明显;从图像清晰度角度来看,CT 法和 NSCT 法均优于 DWT 法,但 CT 法由于自身无法避免的 Gibbs 效应使其在图像某些边缘和细节部分易出现模糊现象,譬如图 3(e)中间偏左栅栏位置就出现了一定程度的模糊,而 NSCT 法由于具备平移不变性质,因而有效地克服了 CT 法易出现的块状模糊现象。综合多方面因素,NSCT 法融合图像不仅具备较高的整体对比度,有效地突出了目标信息,而且很好地保持了源图像中的细节信息和边缘信息,充分结合了可见光图像和红外图像各自的优势,具备优良的视觉效果。而以参考图像为参照的 NSCT 彩色融合图像在 NSCT 灰度融合图像优良视觉效果的基础上,提取了参考图像中对应场景的色彩信息,并将其较为精确地传递到了灰度融合图像中的对应景物上,从图 3(g)中我们可以看到,图像左下方区域的树丛,栅栏周围的树木以及道路两旁的植物均被描绘成了绿色,并且树木的枝干和树叶也比较清晰,符合自然景物的色彩特点。总体上看,彩色传递后的融合图像场景信息清晰,目标信息明确,景物上色自然丰富,为原始灰度融合图像融入了更多的信息,有利于人眼对目标和环境的判断识别。

4 结 论

本文充分利用了 NSCT 变换和 IHS 色空间各自的优势,提出了基于 NSCT 和 IHS 变换域的灰度可见光和红外图像融合算法。理论分析和仿真实验证明该方法不仅可以保留两幅源图像的特征信息和突出各自的细节信息,而且还使最终融合图像中具备了自然彩色信息,产生了良好的视觉效果。将 NSCT 变换和 IHS 色空间结合起来进行可

见光和红外图像的融合研究是一条新的思路,具有强大的生命力和很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 敬忠良,肖刚,李振华. 图像融合——理论与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [2] 张强,郭宝龙. 基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 74-80.
- [3] 黄海东,王斌,张立明. 一种基于非降采样 Contourlet 变换的遥感图像融合方法[J]. 复旦大学学报:自然科学版, 2008, 47(1): 124-128, 134.
- [4] 蒋年德,王耀南,毛建旭. 基于 2 代 Curvelet 改进 IHS 变换的遥感图像融合[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12): 2376-2382.
- [5] Ni W, Guo B L, Yang L. Data fusion of multisensor remote sensing images using region based contourlet contrast[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(2): 364-369.
- [6] 张彬,许廷发,倪国强. 小波变换在医学图像融合中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 202-206.
- [7] 王加,蒋晓瑜,纪伯公. 一种用于目标识别的图像融合算法[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 92-95.
- [8] 薛坚,于盛林,王红萍. 一种基于提升小波变换和 IHS 变换的图像融合方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(2): 340-345.
- [9] 高继镇,刘以安. 基于小波系数模糊积分的图像融合算法研究[J]. 计算机应用, 2008, 28(7): 1753-1755.
- [10] DoM N, Vetterli M. The finite ridgelet transform for image representation[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(1): 16-28.
- [11] Candes E J, Donoho D L. Curvelets: a surprisingly effective non-adaptive representation for objects with edges[R]. USA: Department of Statistics, Stanford University, 2002.
- [12] DoM N, Vetterli M. *Contourlets beyond wavelets*[C]// 2002: 1-27.
- [13] 李光鑫,王柯. 基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 112-117.
- [14] Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: Theory, design and applications[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [15] Bamberger R H, Smith M J T. A filter bank for the directional decomposition of images: Theory and design[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, 40(4): 882-893.
- [16] 王加,蒋晓瑜,纪伯公. 基于感知颜色空间的灰度可见光与红外图像融合算法[J]. 光电子激光, 2008, 19(9): 1261-1264.
- [17] Tu T M, Su S C. A new look at IHS-like image fusion methods[J]. *Information Fusion*, 2001, 21(2): 177-186.
- [18] 阮秋琦. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [19] 叶传奇. 基于多尺度分解的多传感器图像融合算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.