

基于独立成分分析和IHS变换域的 灰度可见光和红外图像融合

邢雅琼¹, 王晓丹¹, 毕凯¹, 郝新娣²

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 总参第61研究所 密钥管理技术中心, 北京 100140)

摘要: 针对灰度可见光和红外图像的融合图像缺乏色彩信息、图像的高阶信息在变换域中统计独立性不足的缺陷, 提出一种基于独立分量分析和IHS(亮度-色度-饱和度)变换域的融合方法. 该方法利用IHS变换域能够有效分离图像亮度分量和彩色信息的优势, 对灰度可见光图像建立灰度图像的彩色传递模型. 利用各分量的独立性进行基于独立分量分析和IHS变换域的图像融合, 并得到最终的彩色融合图像, 使融合图像更加符合人类视觉要求. 仿真实验验证了所提出算法的有效性.

关键词: 独立成分分析; 亮度-色度-饱和度; 红外和可见光; 图像融合

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Fusion technique for grey-scale visible light and infrared images based on independent component analysis and intensity-hue-saturation transform

XING Ya-qiong¹, WANG Xiao-dan¹, BI Kai¹, HAO Xin-di²

(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Key Management Technology Center, General Staff 61th Research Institute, Beijing 100140, China. Correspondent: XING Ya-qiong, E-mail: shmilyds520@163.com)

Abstract: The image fusion based on gray-scale visible light and infrared images lacks color information. Meanwhile, the independency of images' high-order information is insufficient in transform domain statistics. Therefore, an image fusion approach based on independent component analysis and IHS transform space is presented. The IHS transform can separate the image intensity component and color information effectively. Firstly, the color transfer model of gray-scale image for gray-scale visible light images is erected by IHS transform. Then, according to each component's independency, the images are fused based on ICA and IHS transform. The final color fused image is got, which fits the need of human vision better. Experimental results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: independent component analysis; intensity-hue-saturation; visible and infrared; image fusion

0 引言

近年来, 传感器技术、微电子学和无线通信技术的发展, 使得包括传感器、数据处理、记忆和通信在内的低消耗、多功能的多传感器技术得到了极大的进步和改善. 同时, 多传感器网络技术的不断进步, 要求其处理技术能够有效地结合各个传感器的有用信息, 并将它们合并为一个具备综合性和高效性的数据信息. 由于各传感器采集的数据包含着对同一目标场景的互补信息, 对比和分析这些数据需要利用数据融合方法. 图像融合是数据融合众多分支中的一个子分

支, 用来处理图像信息^[1]. 图像融合的目标除了减少数据量外, 主要是为了创建新的图像, 使其更加符合人类或机器的理解和分析. 此外, 深层次的图像处理技术, 如图像分割、目标探测和目标识别可以实际应用于遥感技术和医学图像领域^[2], 而多源图像融合技术在导航和目标追踪的应用中越来越重要.

图像融合能够在信息表达的不同级别上执行, 分为像素级融合、特征级融合和决策级融合^[3]. Niklov等^[4]将图像融合算法分为空间域技术和变换域技术. 变换域是指按照一定规则对每个输入图像进行变换,

收稿日期: 2012-11-05; 修回日期: 2013-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60975026, 61273275).

作者简介: 邢雅琼(1986—), 女, 博士生, 从事智能信息处理、机器学习的研究; 王晓丹(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理、机器学习等研究.

并将其组合起来构成复合变换域,融合图像即是对复合变换域执行逆变换得到的,其过程也可以描述为从具有相似内容的图像中随机抽取子图像训练集,将其训练为一组具有统计独立性的向量基,并对这些向量基进行处理变换^[5-6],独立成分分析(ICA)可以很好地完成这一过程.ICA来源于盲源信号分离,将源信号按照线性变换的方式分离出来,根据这种性质,可以利用ICA变换消除源图像的高阶数据冗余,提高变换系数在变换域的统计独立性,增强目标信息在融合图像中的表达.因此,基于ICA的图像分析正成为极有发展前景的图像融合技术^[7-8].

红外图像与可见光图像的成像机理有所不同,且各自图像中均包含对方的互补信息,因此二者的融合可以更好地表达图像信息.一方面,红外传感器通过对目标场景的热辐射形成红外图像,其仅能够反映出目标场景的轮廓信息,且不受光照条件的影响^[9];另一方面,可见光图像具有的空间分辨率能够准确表达类似于边缘、纹理等细节信息,但在很大程度上依赖于光照条件,但是当照明条件不佳时,从可见光传感器中采集的图像呈现为灰色图像,从而导致背景信息缺乏自然色彩^[10].因此,如何将色彩信息添加到融合后的图像中便成为人们感兴趣的研究内容.图像处理中最基础的色彩空间是RGB空间,目前,国际上著名的基于RGB色空间的伪彩色图像融合算法有NRL法^[11]、MIT法^[12]和TNO法^[13].但是,在RGB空间中光谱信息与3个坐标R、G、B耦合性较强,其分量不仅表示色度也表示亮度,具有较强的关联性,R、G、B中任一分量的改变均会改变光谱信息,因此对3个分量分别处理会带来颜色信息的丢失和错乱.

针对这一问题,本文提出基于ICA和IHS(亮度-色度-饱和度)变换域的灰度可见光和红外图像融合算法.IHS彩色空间的3个分量之间相互独立,可以将亮度分量和彩色图像中携带的彩色信息分离开来^[14],然后利用ICA变换便能够捕获图像细节和重要信息的突出特性,较好地将在红外和灰度可见光图像最终融合为具有色彩信息的融合图像.实验结果表明,所提出方法能够有效地提取出图像的重要信息,并注入到融合图像中,在目标探测和识别方面具有较好的应用前景.

1 基于ICA变换的多源图像融合方法

为了在ICA域获得一套具有统计独立性的基向量用于图像融合,首先需要预先确定一组图像,并对这组图像进行训练^[15],所选择的训练图像只有内容和统计性质相似才能用于图像融合;然后用大小为 $N \times N$ 的矩形窗口 w 对输入图像 $i(x, y)$ 进行随机抽

取,其中心围绕像素值 (m_0, n_0) ,抽取的图像块定义为

$$p(m, n) = w(m, n)i(m_0 - N/2 + m, n_0 - N/2 + n). \quad (1)$$

式(1)中数值均为整数,范围在 $[0, N-1]$ 内,即 m 和 n 为区间 $[0, N-1]$ 上的整数,每个图像块 $p(m, n)$ 均可以表示为 M 个基向量 $b_i(m, n)$ 构成的线性组合,有

$$p(m, n) = \sum_{i=1}^M v_i b_i(m, n). \quad (2)$$

其中: v_1, v_2, \dots, v_M 为映射向量,是原图像在基向量中的表达.如,若 $v_i = \langle p(m, n), b_i(m, n) \rangle$,则二维图像块可以简化为一维表示的向量 \underline{p} ,该一维向量将 $p(m, n)$ 形成的矩阵的每一行按照像素位置首尾相接构成.那么,若一个图像块是通过一维向量表示的,则该图像块可以由基向量的线性组合表示为

$$\underline{p}(t) = \sum_{i=1}^M v_i(t) b_i = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_M] \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_M(t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

若使

$$B = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_M], \quad v(t) = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_M]^T,$$

则式(3)可以简化为

$$\underline{p}(t) = Bv(t), \quad (4)$$

$$v(t) = B^{-1}\underline{p}(t) = A\underline{p}(t). \quad (5)$$

其中: $B = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_M]$ 为未知的混合矩阵(分析核), $A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]^T$ 为分离矩阵(综合核).该变换反映了观测信号 $\underline{p}(t)$ 在一套基向量上的映射,其目的是估计一组($K \leq N^2$)基向量,该基向量可以有效捕获图像的特征和结构.

主成分分析(PCA)可以对所分析的数据进行降维约减处理,起到提高算法效率、降低计算量的作用.首先通过相关矩阵 $C = E\{pp^T\}$ 的特征值分解完成PCA变换.PCA处理后,运用最小化负熵的方法筛选具有统计独立性的基向量,输入图像块 $\underline{p}(t)$ 表达为其在ICA域中的系数 $v_k(t)$.然后,利用与其他变换相同的融合方法完成变换域系数融合,系数向量 $v_k(t)$ 在ICA域可以合成为图像 $v_f(t)$,这种变换域系数融

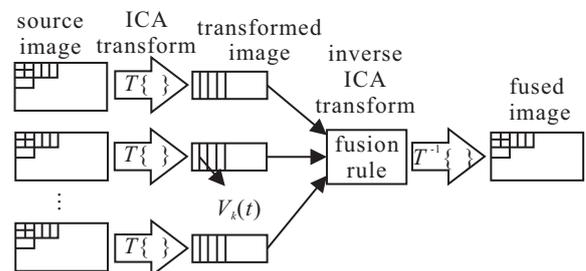


图1 基于ICA变换的图像融合基本框架

合的方法称为融合规则. 在 ICA 域完成系数融合并得到 $v_f(t)$ 后, 利用综合核 A 将其变换回空间域, 得到融合图像 $i_f(x, y)$. 图 1 为基于 ICA 变换的图像融合基本框架.

2 基于 ICA 和 IHS 的图像融合

IHS 属于定性处理颜色的显色系统——孟赛尔表色系统, 包含人的色彩感觉中的三元素: 亮度、色度和饱和度. IHS 变换已成为图像分析的一个标准过程, 用于在视觉上定量描述色彩, 广泛应用于图像融合中. 它可将亮度分量与一幅彩色图像中携带的彩色信息分开, 其中: 亮度代表图像的亮度信息, 色度和饱和度反映图像的光谱信息. 该空间符合人的视觉特性, 因此, 基于可见光和红外图像的融合更适合在 IHS 彩色空间中进行, 但该思路一般用于彩色可见光图像和灰度红外图像的融合. ICA 是基于线性变换的灰度可见光和红外图像融合法, 经过 ICA 分解的源图像会表现为许多具有统计独立性的基向量, 这些基向量能够表达出源图像的重要和有用信息. 对于红外图像而言, 由于目标信息和背景信息的辐射强度不同, 在 ICA 变换中, 可以将目标信息作为独立的信号源, 使融合图像更加突出目标信息. 此外, 对源图像进行 ICA 变换可以有效约减源图像的特征维数, 保持特征的高阶相互独立性, 从而突出图像的细节特征, 这些特点对图像融合是十分有意义的. 然而, 基于 ICA 变换的融合图像虽然增强了图像的信息表达能力, 但是缺乏自然色彩. 因此, 本文拟在灰度可见光图像进行 ICA 变换前, 对可见光图像进行 IHS 彩色传递, 再提取其 I 分量参与 ICA 变换来完成融合过程, 从而使融合图像具有自然色彩信息, 提高人眼对图像的分辨能力.

本文根据红外和可见光传感器成像原理的不同, 在基于 ICA 变换的图像融合过程中, 以近似负熵作为目标函数, 采用最大化负熵的优化算法; 然后在 ICA 变换域采用基于区域划分的融合规则, 对包含边缘的高能量区域采用绝对值取大的融合规则. 对连续背景的低能量区域则根据其不同的区域属性分别采用不同的融合规则, 这样既能够保留可见光图像中的边缘细节信息, 又可以突出红外图像的目标信息(热辐射源), 从而保持了重要区域和背景区域的区域一致性.

2.1 图像融合的基本流程

基于 ICA 和 IHS 的图像融合步骤如下.

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 G 各一张;

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

Step 1: 利用彩色参考图片 G 将彩色信息传递给

灰度可见光图像 V , 将其变换到 IHS 彩色空间, 并提取灰度成分 $V(I)$.

Step 2: 对 $V(I)$ 和 IR 进行 ICA 分解变换, 得到 $V(I)$ 和 IR 在 ICA 域的系数分别为 $v(i)_k(t)$ 和 $i_k(t)$.

Step 3: 采用基于区域的融合规则对系数 $v(i)_k(t)$ 和 $i_k(t)$ 进行融合, 得到 ICA 变换域的图像 $v_f(t)$.

Step 4: 对 $v_f(t)$ 进行 ICA 逆变换得到空间域的融合图像 F' .

Step 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 .

具体执行步骤如图 2 所示.

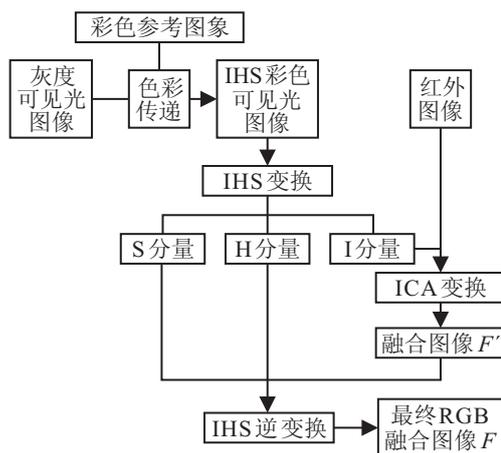


图 2 基于 ICA 和 IHS 变换的图像融合的基本步骤

2.2 灰度可见光图像的彩色传递

对灰度可见光图像进行彩色传递, 首先需要选取与灰度可见光图像景观和大小相似的参考图像, 然后利用 IHS 空间 3 个分量的独立性, 将 RGB 空间的参考图像转换到 IHS 空间, 使得对 IHS 空间参考图像的任一分量进行修改时, 均不会影响其他两个分量的值. 利用文献 [16-17] 中的彩色空间转换方法将参考图像由 RGB 空间转换到 IHS 空间, 然后依据灰度可见光图像的亮度分量对 IHS 空间参考图像的 I 分量进行修改, 灰度可见光图像的 H 分量和 S 分量由参考图像中与其最匹配的像素统计特征值进行传递, 从而使灰度图像具有与参考图像相似的颜色信息, 具体操作过程如下.

Step 1: 对彩色参考图像中的 I 分量进行修改, 有

$$I_G(i)' = \frac{\sigma_V}{\sigma_G} (I_G(i) - \mu_G) + \mu_V. \quad (6)$$

其中: $I_G(i)'$ 为修改前参考图像的 I 分量值, $I_G(i)$ 为修改后参考图像的 I 分量值; μ_V, σ_V 为灰度可见光图像的亮度均值和标准差; μ_G, σ_G 为参考图像的亮度均值和标准差.

Step 2: 按照窗口邻域大小对灰度可见光图像和

修改后的参考图像进行划分,对两幅图像对应邻域中相应的像素差异度进行计算,有

$$\text{dif } f = (\mu_V - \mu'_G)^2 + (\sigma_V - \sigma'_G)^2. \quad (7)$$

其中: μ_V, σ_V 为灰度可见光图像的亮度均值和标准差; μ'_G, σ'_G 为修改后参考图像的亮度均值和标准差.

Step 3: 按照式 (2) 计算灰度可见光图像和修改后参考图像中所有像素点之间的差异度 $\text{dif } f$. 当 $\text{dif } f$ 取最小值时, 修改后的参考图像对应像素点的 **H** 分量和 **S** 分量可以传递给相对应灰度可见光图像的像素点. 仿真实验结果验证了该方法的可行性和有效性.

2.3 基于区域划分的 ICA 图像融合

将 IHS 空间灰度可见光图像的亮度分量 $V(I)$ 和红外图像 IR 表示为向量, 并在训练阶段对 $V(I)$ 和 IR 的向量形式进行 ICA 变换, 变换后在 ICA 域内的系数分别为 $v_{V(I)}(t)$ 和 $v_{IR}(t)$; 然后根据 ICA 变换域的融合规则对 $v_{V(I)}(t)$ 和 $v_{IR}(t)$ 进行系数融合, 得到变换域融合系数 $v_f(t)$; 最后对 $v_f(t)$ 进行 ICA 逆变换从而得到融合图像^[18].

由于源图像灰度值的变化和大小可以表现出图像的各种特征, 在 ICA 域中, 图像特征通过变换系数 $v(t)$ 的模值大小体现出来. Mitianoudis 等^[17]根据图像在 ICA 域的这一特征提出一种基于区域的融合规则. 根据文献 [19] 中的方法, 图像各区域能量大小可以由变换域系数 $v(t)$ 的绝对值平均值度量, 即

$$E_{V(I)}(t) = |\bar{v}_{V(I)}(t)|, \quad E_{IR}(t) = |\bar{v}_{IR}(t)|, \quad (8)$$

其中 $E_k(t) (k = \{V(I), IR\})$ 为区域能量, $E_k(t)$ 越大, 图像块区域能量越大, 边缘纹理等细节信息表现得越丰富, 反之表示图像块区域能量较小, 图像区域所包括的细节信息不够丰富. 根据以上理论, 可将输入图像的子图像块分为两组: 当 $E_k(t)$ 大于某阈值时, 该区域属于包含轮廓边缘信息的高能量区域 (R_{\max}); 当 $E_k(t)$ 小于该阈值时, 该区域属于包含连续背景信息的低能量区域 (R_{\min}). 阈值大小由实验决定, 红外图像 IR 产生的分割图像为

$$s_{IR}(t) = \begin{cases} 1, & E_{IR}(t) > 2\text{mean}_t\{E_{IR}(t)\}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

由同样的方法可以得到可见光图像亮度分量 $V(I)$ 的分割图像 $s_{V(I)}(t)$, 融合分割图像 $s(t)$ 则由 IR 和 $V(I)$ 的分割图像 $s_{IR}(t)$ 和 $s_{V(I)}(t)$ 通过逻辑或运算合成, 有

$$s(t) = \text{OR}\{s_{IR}(t), s_{V(I)}(t)\}, \quad (10)$$

其中 **OR** 为逻辑或运算. 将输入的 $V(I)$ 和 IR 分割成高能量区域和低能量区域后, 对高能量区域 R_{\max} 的变换域系数采用绝对值取大的融合规则, 有

$$v_f(t) = \begin{cases} v_{IR}(t), & \text{abs}(v_{IR}(t)) > \text{abs}(v_{V(I)}(t)); \\ v_{V(I)}(t), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

根据 k 均值聚类方法, 将 R_{\min} 划分为 3 个区域: 重要区域 A_1 、次要区域 A_2 和背景区域 A_3 . 低能量区域 R_{\min} 的融合规则如下:

$$v_f(t) = \begin{cases} v_{IR}(t), & (m_0, n_0) \in A_1; \\ (v_{IR}(t) + v_{V(I)}(t))/2, & (m_0, n_0) \in A_2; \\ v_{V(I)}(t), & (m_0, n_0) \in A_3. \end{cases} \quad (12)$$

得到 ICA 域融合系数 $v_f(t)$ 后, 通过 ICA 逆变换可以将其变换回空间域, 并对重叠像素进行平均运算, 从而得到最终的融合图像 $I_f(x, y)$.

3 仿真实验

实验 1 根据上述理论和方法, 对灰度可见光和红外图像的融合结果进行仿真实验. 实验选取一组 UN Camp 灰度可见光和红外图像进行仿真融合实验, 图像大小为 360×270 , 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 图 3(c) 为场景与灰度可见光图像相似的彩色参考图像. 此外, 分别采用拉普拉斯金字塔变换 (LPT) 方法、离散小波变换 (DWT) 融合算法、轮廓波变换 (CT) 和基于区域划分的 ICA 图像变换方法进行比较, 对应的融合图像如图 3(d)~图 3(g) 所示. 图 3(h) 为以图 3(c) 作为参考图像采用本文方法得到的彩色融合图像. UN Camp 图像融合方法的比较结果如表 1 所示.

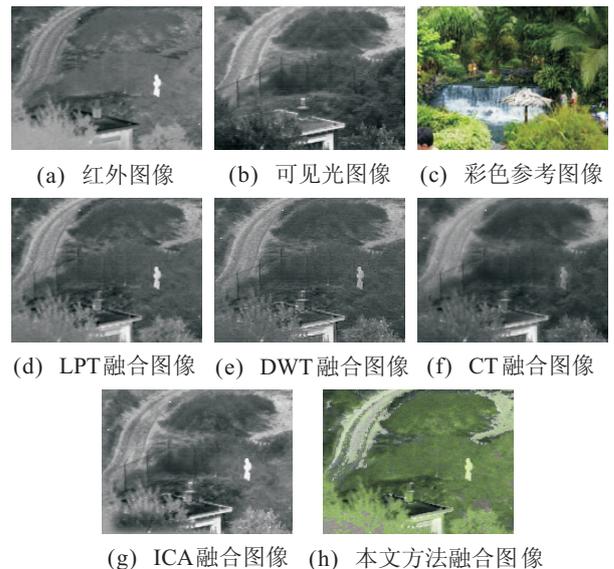


图 3 UN Camp 红外和可见光图像实验结果

表 1 UN Camp 图像融合方法的比较结果

方法	标准差	信息熵	平均梯度	相关系数
LPT 法	35.422 3	6.985 3	4.841 3	0.875 9
DWT 法	23.628 3	6.340 6	4.382 8	0.512 2
CT 法	23.132 2	6.124 4	4.293 7	0.628 0
ICA 法	35.810 6	7.098 9	4.972 9	0.943 9

根据可见光和红外图像融合的客观评价标准, 本文采用标准差、信息熵、平均梯度和相关系数4个评价参数对3种方法的灰度图像融合性能进行客观比较. 其中: 标准差也称为均方差, 它可以反映图像各个像元灰度相对于灰度平均值的离散情况, 标准差越大, 图像的反差越大, 可看到的信息越多, 图像质量越好; 信息熵是从信息论角度反映影像信息丰富程度的一种度量方法, 其大小反映了图像携带信息量的多少, 因此, 影像的信息熵越大, 其信息量越丰富, 质量也越好; 平均梯度能够敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力, 一般而言平均梯度越大, 影像越清晰^[17]; 相关系数是图像质量评价的一个客观标准, 它能够反映人眼的空间复杂度掩盖特性的性质, 可以用来判断融合图像相较于源图像的失真程度, 相关系数越大, 失真越小, 源图像的细节信息保留得越多, 图像质量越好.

由表1可见: 基于区域划分的ICA法的4个评价参数均高于其他3种方法; DWT法和CT法的标准差指标相当, 但低于ICA法; LPT法的标准差值相对较高, 接近于ICA法, 但仍低于ICA法; ICA法变换的信息熵是4种方法中唯一一个超过7的方法. 此外, ICA法变换后融合图像的相关系数高达0.9439. 这表明ICA法融合图像不仅包含丰富的信息量, 且具有较高的对比度, 图像失真程度最小, 较好地保持了源图像中的重要边缘和细节特征信息.

从主观评价的角度出发, 单独使用LPT法、DWT法、CT法和ICA法均可以保留源图像的重要信息. 在融合图像中, 既能看到可见光图像中的背景信息, 又可以看到红外图像中的目标信息. 从对比度的角度看, ICA法的图像对比度最好, 其目标信息和背景信息反差最大, DWT法的对比度在几种方法中表现较差, 目标信息和背景信息的区分并不明显. 从图像清晰度角度看, 采用区域划分融合规则的ICA法变换优于DWT法和LPT法. 综上所述, 本文采用的ICA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, 而且较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. 以参考图像为参照的ICA法彩色融合图像在ICA法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灰度融合图像的对应景物上. 由图3(g)可见, 图像左下方区域的树丛、栅栏周围的树木和道路两旁的植物均被描绘成了绿色, 符合自然景物的色彩特点, 且十分清晰. 此外, 图3(g)中的目标信息十分明显, 周围景物的对比度十分高, 总体上看, 彩色传递后的融合图像3(h)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更多的信息, 有利于人眼对目标和环境的判断识别.

实验2 实验2选取“Trees”可见光和红外序列图, 大小为 360×270 , 如图4(a)和图4(b)所示. 图4(c)为场景与灰度可见光图像相似的彩色参考图像. LPT法、DWT法、CT法和ICA法分别对应的融合图像如图4(d)~图4(g)所示. 图4(h)为以图4(c)作为参照对ICA法灰度融合图像进行IHS逆变换后的彩色融合图像. 4种方法应用于“Trees”图像的灰度图像融合性能比较结果如表2所示.

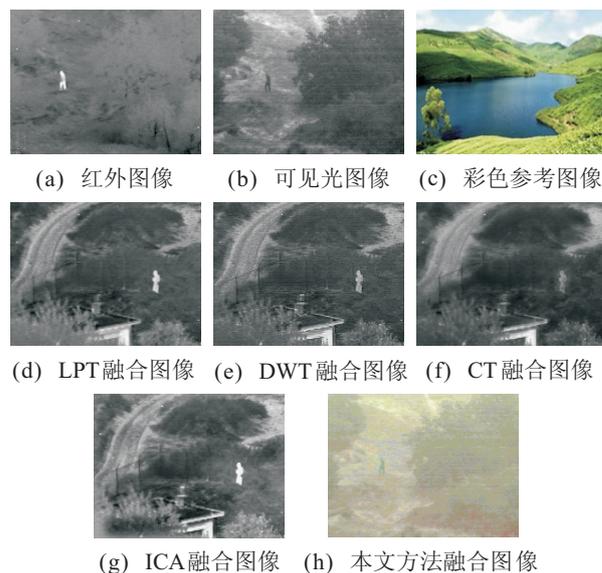


图4 “Trees”红外和可见光图像实验结果

表2 “Trees”图像融合方法的比较结果

方法	标准差	信息熵	平均梯度	相关系数
LPC法	23.2234	6.6189	3.3692	0.6359
DWT法	15.3732	5.9967	3.2589	0.7847
CT法	13.7724	5.6271	3.1915	0.7576
ICA法	25.0265	6.6624	3.4688	0.9821

从客观评价方面看, ICA法优于其他3种方法. DWT法针对灰度融合图像的标准差指标略高于CT法, 但二者均低于ICA法, LPT法的该项指标远高于DWT法和CT法. 其中, ICA法的相关系数高于DWT法近0.2, 高于CT法近0.23. 因此可以得到结论: 基于ICA法的灰度融合图像对比度高于其他3种方法, 图像比CT法和DWT法的融合图像更加清晰, 保留的细节信息比其他方法也更为完整.

从主观评价方面看, 单独使用DWT法、CT法和ICA法均保留了源图像的重要信息, 在融合图像中, 既能看到可见光图像中的背景信息, 又可以看到红外图像中的目标信息. 但LPT法对该序列图像的融合结果较差, 灰度分布极为不均. 从对比度的角度看, ICA法的图像对比度最好, 其目标信息和背景信息反差最大, CT法的对比度较差, 目标特征不十分明显.

从图像清晰度角度看, DWT法和CT法的图像清晰度较差, 背景图像看起来较为模糊. 以参考图像为参照的ICA法彩色融合图像(图4(h)), 其对比度明显优于灰度图像, 道路两旁的树木也被描绘为更符合自然色彩的深绿色, 道路的颜色被描绘为浅绿色, 色彩层次更加鲜明, 目标特征更为明显, 有利于人类对图像的理解感知.

实验3 实验3选取“Dunes”可见光和红外序列图, 大小为 360×270 , 如图4(a)和图4(b)所示. 图4(c)为场景与灰度可见光图像相似的彩色参考图像. LPT法、DWT法、CT法和ICA法分别对应的融合图像如图5(d)~图5(g)所示. 图5(h)为以图5(c)作为参照对ICA法灰度融合图像进行IHS逆变换后的彩色融合图像. 4种方法应用于“Dune”图像的灰度图像融合性能比较结果如表3所示.

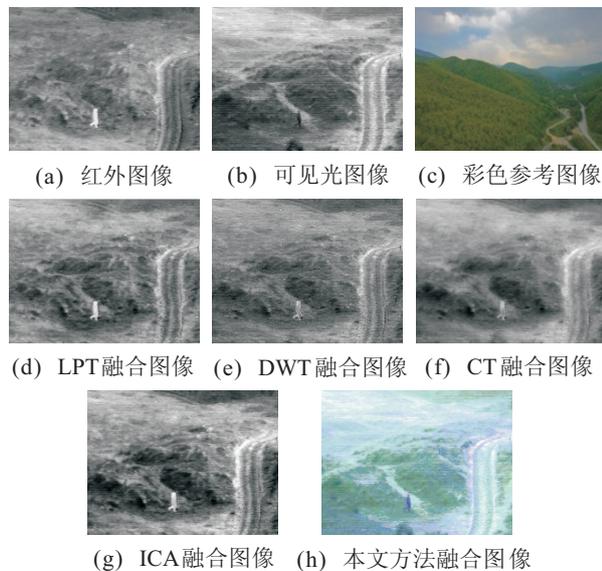


图5 “Dunes”红外和可见光图像实验结果

表3 “Dunes”图像融合方法的比较结果

方法	标准差	信息熵	平均梯度	相关系数
LPT法	34.6390	6.2024	6.7133	0.5967
DWT法	14.1375	5.8540	3.2174	0.6754
CT法	38.5447	6.9520	4.0288	0.6927
ICA法	46.2374	7.0047	7.1960	0.8741

根据客观评价标准, 由表3可见, ICA法依然优于其他3种方法. 针对灰度融合图像的客观指标, DWT法的标准差指标最低, 且远低于其他3种方法, LPT法和CT融合图像的标准差相近, 前者略低于后者, ICA法的标准差远高于其他3种方法. 此外, ICA法融合图像的信息熵和平均梯度两项指标也均高于其他3种方法, 在平均梯度指标中, ICA法融合图像高于该指标仅次于它的LPT法融合图像约7.1%. 相关系数可以体现融合图像相对于原图像的失真程度, ICA法的相关系数达到0.8以上, 明显高于其他3种

方法, 表明该方法失真程度较小. 根据以上分析, 按照客观评价指标的意义, 基于ICA法的融合图像比其他方法具有更高的图像对比度和清晰度, 并包含了源图像中更多的信息.

在主观评价方面, DWT法、CT法和ICA法依然可以保留源图像中的重要信息, 在融合图像中, 既能看到可见光图像中的背景信息, 又可以看到红外图像中的目标信息. 从对比度的角度看, DWT法对该序列图像的融合结果对比度较低, 目标信息和背景信息中的部分景观显示不明显; CT法融合图像(图5(f))的对比度虽然优于图5(e), 但目标特征表现得不够明显; ICA法融合图像(图5(g))的目标信息和背景信息反差最大, 对比度较高. 从图像清晰度角度看, ICA法融合图像的清晰度较高, 更加符合目标识别的要求. 以参考图像为参照的ICA法彩色融合图像(图5(h)), 其对比度明显优于灰度图像, 图像右侧的浅色的道路和其左侧深绿色山丘之间的层次感更加明显, 且山丘经过色彩传递和融合后, 纹理和轮廓变得更加清晰, 例如, 山丘之间的道路在灰度融合图像中显示极为模糊, 而在图5(h)中以浅绿色明显地出现在图像中间靠左侧位置. 此外, 图5(h)中深灰色的目标特征也十分突出, 使人眼容易识别到目标所在的位置, 更加有利于图像理解.

4 结论

本文根据ICA变换和IHS空间各自的优势和存在的不足, 提出了基于ICA和IHS变换域的灰度可见光和红外图像融合算法. 与传统的融合方法不同, 首先对灰度可见光图像进行彩色传递, 完成IHS变换; 然后利用IHS变换后相互独立的亮度分量值I含有图像灰度值的特点, 与红外图像进行ICA变换, 并在ICA域采用了基于区域划分的融合规则得到新的亮度分量; 最后结合彩色传递后的可见光图像的H分量和S分量, 共同完成IHS逆变换得到最终的彩色融合图像. 通过理论分析和仿真实验, 表明了所提出方法不仅可以反映可见光图像的细节信息和背景信息, 而且能突出红外图像中的目标特征, 使最终融合图像具备自然彩色信息, 产生了良好的视觉效果, 加强了图像的信息表达能力. 将ICA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具有较好的应用前景.

参考文献(References)

- [1] Qing Guo, Shutian Liu. Performance analysis of multi-spectral and panchromatic image fusion techniques based on two wavelet discrete approaches[J]. Optik, 2011, 122(9): 811-819.

- [2] 罗晓清. 多传感器图像融合理论及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学生物工程学院, 2010.
(Luo X Q. Study on the theory of multi-sensor image fusion and its applications[D]. Wuxi: Faculty of Bioscience Engineering, Jiangnan University, 2010.)
- [3] Chaia Y, Li H F, Guo M Y. Multifocus image fusion scheme based on features of multiscale products and PCNN in lifting stationary wavelet domain[J]. Optics Communications, 2011, 284(5): 1146-1158.
- [4] Nikolov S, Bull D, Canagarajah N. Wavelets for image fusion[M]. Wavelets in Signal and Image Analysis, Norwell: Kluwer, 2001: 19-30.
- [5] Zhao Jing, Li Hai-yun. An image fusion algorithm based on multi-resolution decomposition for functional magnetic resonance images[J]. Neuroscience Letters, 2011, 48(7): 73-77.
- [6] 孙凤梅. 多传感器图像彩色融合方法研究[D]. 长沙: 湖南大学电气与信息工程学院, 2009.
(Sun F M. Research on color fusion methods for multi-sensor images[D]. Changsha: Institute of Electrical and Information Engineering, Hunan University, 2009.)
- [7] 孙俊平, 刘扬. 基于快速独立分量分析的多分辨率遥感图像融合算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(3): 230-231.
(Sun J P, Liu Y. The fusion arithmetic of multi-resolution remote sense image based on M-fastICA[J]. J of China Academy of Electronics and Information Technology, 2007, 2(3): 230-231.)
- [8] 陈蜜, 佘剑辉, 李德仁, 等. 独立分量分析的图像融合算法[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 82-84.
(Chen M, Xuan J H, Li D R, et al. Image fusion algorithm based on independent component analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 82-84.)
- [9] Liu K, Guo L, Li H H, et al. Fusion of infrared and visible light images based on region segmentation[J]. Chinese J of Aeronautics, 2009, 22(1): 75-80.
- [10] Yang S Y, Wang M, Jiao L C, et al. Image fusion based on a new contourlet packet[J]. Information Fusion, 2010, 11(2): 78-84.
- [11] McDaniel R V, Scribner D A, Krebs W K, et al. Image fusion for tactical applications[C]. Proc of the SPIE. San Diego, 1998, 3436: 685-695.
- [12] Waxman A M, Fay D A, Gove A N, et al. Color night vision: Fusion of intensified visible and thermal IR imagery[C]. Proc of the SPIE. Orlando, 1995, 2463: 58-68.
- [13] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion[J]. Optical Engineering, 1996, 35(3): 650-658.
- [14] 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]. 中国图像图形学报, 2008, 13(12): 2376-2382.
(Jiang N D, Wang Y N, Mao J X. Using the second generation curvelet to improve IHS transform merge[J]. Remote Sensing Images, 2008, 13(12): 2376-2382.)
- [15] Nedeljko Cvejic, David Bull, Nishan Canagarajah. Region-based multimodal image fusion using ICA bases[J]. IEEE Sensors J, 2007, 7(5): 744-747.
- [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.
(Wang J, Jiang X Y, Ji B G. An algorithm to fuse gray-scale infrared and visible light image based on perceptual color space[J]. J of Optoelectronics Laser, 2008, 19(9): 1261-1264.)
- [17] 孔韦韦, 雷英杰, 雷阳, 等. 基于NSCT和IHS变换域的灰度可见光与红外图像融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 7(32): 1390-1393.
(Kong W W, Lei Y J, Lei Y, et al. Fusion technique for gray-scale visible light and infrared images based on NSCT and IHS transform[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 7(32): 1390-1393.)
- [18] Mitianoudis N, Stathaki T. Pixel-based and region-based image fusion using ICA bases[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 131-142.
- [19] 岳晋, 宦若虹, 上官晋太, 等. 一种新的ICA域图像融合算法[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 130-132.
(Yue J, Huan R H, Shangguan J T, et al. Novel ICA domain multimodal image fusion algorithm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 130-132.)

(责任编辑: 郑晓蕾)