基于 NSST 与 IHS 的红外与彩色可见光图像融合

杨晟炜¹,张志华²,孔玲君^{1,2},王茜²

(1.上海出版印刷高等专科学校,上海 200093;2.上海理工大学,上海 200093)

摘要:目的 鉴于传统的红外与彩色可见光图像融合算法得到的融合图像,无法很好兼顾清晰度、对比 度和色彩是否失真等,提出一种新的基于 NSST 和 IHS 颜色空间的彩色图像融合算法。方法 首先将源 彩色可见光的 RGB 图像变换到各通道相关性最小的 IHS 颜色空间,分离出亮度分量和色度分量。其次 对彩色可见光的亮度分量和红外图像分别进行 NSST 分解,对分解得到的低频系数采用基于自适应高斯 模糊逻辑函数的系数选择方案,对高频系数则采用基于像素点的绝对值取大的系数选择方案,然后对经 过选择的低、高频系数进行 NSST 逆变换,得到的融合图像作为新的亮度分量,结合已有的色度分量将 其进行 IHS 逆变换,得到最终的 RGB 融合图像。结果 通过 2 种场景的红外与彩色可见光图像进行仿 真实验,将提出的算法与 LPT, SWT 和 NSCT 等算法对比,通过主观评价和客观评价指标 IE,AG,SF 和 SD 等,可知新算法的融合结果图像场景细节最清晰,红外隐藏目标对比度最高,且色彩未出现明显失 真现象,图像融合质量最高。结论 提出的算法相较于传统的红外与彩色可见光图像的融合质量,全面 提升了效果,表明该算法具有优越性。

关键词:图像融合;红外与彩色可见光图像;非下采样剪切波变换;IHS 颜色空间 中图分类号:TS206 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2019)11-0194-09 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.030

Fusion of Infrared and Color Visible Images Based on NSST and IHS

YANG Sheng-wei¹, ZHANG Zhi-hua², KONG Ling-jun^{1,2}, WANG Qian²

(1.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China;2.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The paper aims to propose a new color image fusion algorithm based on NSST and IHS color space to solve the problem that the traditional fusion algorithm of infrared and color visible images cannot give good consideration to the fusion quality of image clarity, contrast and color distortion. Firstly, the RGB image of the source color visible image was transformed into the IHS color space of the least correlation among the channels, and the luminance and chroma components were separated. Secondly, the brightness components of color visible image and infrared image were decomposed by NSST. The low-frequency coefficients obtained by NSST decomposition were selected based on adaptive Gaussian fuzzy logic function, and the high-frequency coefficients were inversely transformed by NSST, and the fused image was taken as a new luminance component, and then inversely transformed back to RGB space by combining the existing chroma components to get the final fused image. The fusion of infrared and color visible images in two scenes was simulated. Compared with

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 国家新闻出版署"柔版印刷绿色制版与标准化实验室"

作者简介:杨晟炜(1984—),男,博士,上海出版印刷高等专科学校讲师,主要研究方向为印前处理与过程控制、数字 媒体技术。

LPT, SWT and NSCT, subjective evaluation and objective evaluation indexes such as IE, AG, SF and SD showed that the scene details were the clearest, the infrared hidden objects had the highest contrast, and the color was not distorted obviously. The image fusion quality was the highest. Compared with the traditional infrared and color visible image fusion, the proposed algorithm integrally improves the quality of the fused image, showing the superiority of the algorithm. **KEY WORDS:** image fusion; infrared and color visible images; NSST; IHS color space

图像融合[1]是数字图像处理中,将多通道传感器 采集的同一目标图像经过特殊的算法,综合互补信息 形成新的图像的过程。由于红外传感器成像与可见光 传感器成像具有极大的互补性,红外与可见光图像融 合一直是图像融合领域中的研究重点。 红外与可见光 图像融合,无非是以下2种现实场景下的融合问题: 一类是红外与微光图像(傍晚或黑夜等微弱亮度环境 下的可见光图像)的融合,微光图像由于光线少、亮 度低,可近似成灰度图像;另一类是红外与白天彩色 可见光图像的融合,该彩色可见光图像往往是雾霾、 沙尘暴和大雾等恶劣环境下的图像,该场景能见度 低,隐藏目标难以察觉。现今,多数研究工作者的图 像融合对象仍是红外与微光图像,即红外与灰度可见 光图像,忽视了人眼视觉对色彩信息的辨识度远高于 灰度图像,和现实经常存在的白天恶劣天气环境,红 外与彩色可见光图像融合的问题是亟待突破的现实 问题。

当前的图像融合算法主要集中在灰度图像融合 算法,灰度图像融合算法可分为2类:第1类是基于 空间域的融合方法,包括加权平均^[2]、ICA^[3]、PCA^[4] 和人工神经网络^[5]等算法,该类方法较容易实现,但 融合后往往细节不明显,目标不明确;第2类是基于 频率域的融合方法,包括拉普拉斯金字塔(LPT)^[6]、 小波变换 (DWT)^[7]、Curvelet 变换^[8]、平稳小波变 换(SWT)^[9]、Contourlet 变换^[10]、Shearlet 变换^[11]、 非下采样轮廓波变换(NSCT)^[12]以及非下采样剪切 波变换(NSST)^[13]。由于小波变换的小波基函数所 具有的各向同性和方向数局限性 ,对高度奇异性的边 缘不能给出最优解,小波变换不能完全提取出多边缘 的复杂图像的细节信息。NSCT 是红外与可见光图像 融合领域的一种主流算法, NSCT 具有多尺度分解各 向异性的能力,且具有平移不变性,可以克服 Contourlet 算法中出现的吉伯斯 (Gibbs) 效应^[14],但 是由于 NSCT 自身结构的问题,运算数据量过大,算 法运算非常耗时。NSST 是在 NSCT 的基础上发展起 来的,具有优越的图像多尺度几何分解性能,能很好 地表达图像的曲线和细节,目前 NSST 算法在图像融 合领域的应用仍处于起步阶段。

颜色传递技术^[15]是运用于彩色图像融合的方法, 李光鑫^[16]的基于亮度-对比度传递(LCT)技术的彩色 图像融合算法,和孔韦韦^[17]的基于 NSCT 和 IHS 变 换域的灰度可见光与红外图像融合方法等,都是使用的颜色传递技术,但该算法对象往往是红外和灰度可见光图像,过程需要选取相似场景的彩色参考图像, 将彩色参考图像的颜色信息传递到灰度融合图像中, 得到最终彩色融合图像,而彩色融合图像的色彩往往 忠实于彩色参考图像,该方法极易造成颜色失真。

鉴于此,针对红外与彩色可见光图像融合对象, 文中的思路是引入灰度图像融合中最前沿的NSST变 换利用NSST变换对图像细节信息优异的获取性能, 结合符合人眼视觉特征的 IHS 颜色空间可将彩色可 见光图像的亮度信息和色度信息分离的优势,提出一 种基于 NSST 和 IHS 的红外与彩色可见光的图像融 合算法,以及通过引入 LPT,SWT 和 NSCT 等传统 灰度图像融合算法应用于彩色图像融合,通过彩色图 像融合的评价机制,探讨算法的性能。

1 图像融合算法及融合策略选择

1.1 NSST 变换理论

剪切波(Shearlet)是通过仿射系统将几何和多尺 度结合起来构造得到的。当维数 n=2 时,具有合成膨 胀的放射系统 $M_{AR}(\psi)$ 如式(1)所示:

$$M_{AB}(\psi) = \left\{ \psi_{i,j,k}(x) = \left| \det \det A \right|^{j/2} \\ \psi\left(\boldsymbol{B}^{j} \boldsymbol{A}^{i} \boldsymbol{x} - \boldsymbol{k} \right) : i, j \in \mathbb{Z}, \boldsymbol{k} \in \mathbb{Z}^{2} \right\}$$
(1)

式中, $\psi \in L^2(R^2)$, *L* 表示可积空间,det 表示矩阵的行列式,*A* 和 *B* 均为 2×2 的可逆矩阵,*A* 为尺度变换矩阵,*B* 为剪切矩阵,且|det det *B*|=1,*i* 和 *j* 分别表示分解方向数和分解尺度。当 $M_{AB}(\psi)$ 具有紧框架(Parseval),则 $M_{AB}(\psi)$ 的元素称为合成小波^[18]。剪切波(Shearlet)即是合成小波的特例,此时 *A*=[4 0,0 2], *B*=[1 1,0 1]。

标准的剪切波滤波器(SF)是在伪极化网格中通 过平移操作完成的,该操作过程中需进行下采样,因 而不具备平移不变性。NSST 变换是通过把标准的 SF 从伪极化坐标系统(Pseudo-Polar)映射到笛卡尔坐标 系统^[19](Cartesian),再通过傅里叶逆变换(iFFT), 证明其操作可以通过二维卷积完成,避免了下采样操 作,从而具有了平移不变性。NSST 变换模型由非下 采样金字塔(NSP)和剪切波滤波器两部分(SF)组 成,前者将图像进行多尺度分解,后者将图像方向局 部化。NSST 图像分解过程是先采用 NSP 分解图像, 获得低频子带图像和高频子带图像。图像经 k 级 NSP 分解后,可得到1个低频子带图像和 k 个大小相同但 尺度不同的高频子带图像。NSST 的多尺度多分解过 程见图1,其中 NSP 分解级别为2,得到1个低频子 带和2个高频子带图像。





1.2 IHS 颜色空间

IHS 颜色空间^[20]是按色彩、深浅、明暗来描述颜 色的,即由亮度(1) 色相(H) 饱和度(S)3个独 立分量组成,IHS 颜色立体模型见图 2。IHS 空间的



图 2 IHS 颜色空间 Fig.2 IHS color space

I分量和色度分量是相互独立的,而H分量和S分量 与人感受彩色的方式是紧密相连的,IHS空间非常适 合于借助人的视觉系统来感知彩色特征的图像融合 算法。

文中提出的算法须将源彩色可见光的 RGB 图像 变换到 IHS 空间颜色空间进行图像融合,而由于 IHS 颜色空间不适合显示器系统,最后融合结果的 IHS 图 像需变换到 RGB 颜色空间,便于在显示器上显示观 察。RGB 颜色空间和 IHS 颜色空间的转换可通过线 性(柱状)变换。

从 RGB 坐标到 IHS 坐标的变换模式成为 IHS 变换:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{2}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$
(2)

其中: v₁和 v₂为中间变量, *I*表示亮度分量, 相 应地色相分量 *H*和饱和度分量 *S*可由 v₁和 v₂得到:

$$H = \arctan \frac{v_2}{v_1} \tag{3}$$

$$S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$
(4)

从 IHS 坐标到 RGB 坐标的变换模式为 IHS 逆变 换:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$
(5)

1.3 低通子带图像融合策略

红外与彩色可见光图像的低通子带图像融合的 主要目的,是将红外图像中的特征目标轮廓和可见光 图像中的背景信息同时表现出来。文中提出一种基于 自适应高斯模糊逻辑的加权平均融合策略,模糊逻辑 概念来自模糊数学^[21]领域,具有非此即彼的逻辑关 系,将模糊逻辑应用于低频图像融合,主要是因为不 同特征目标和相应像素之间及每个图像系统内部的 不确定性。首先,通过模糊逻辑函数决定红外低频子 带图像中的像素点是属于特征目标还是图像背景。这 时红外图像提取了特征目标信息,可见光图像则具有 更多的高频信息,则自适应加权融合准则为:

$$C_{\rm F}(i,j) = \eta_0(i,j)C_{\rm V}(i,j) + \eta_1(i,j)C_{\rm IR}(i,j)$$
(6)

这里的 C(i, j) 表示低频子带图像 (i, j) 位置 的像素点, η_0 和 η_1 分别表示红外低频子带图像中每 一个像素点属于背景和目标的加权系数。采用高斯隶 属函数来确定图像的融合系数。背景加权系数和目标 加权系数为:

$$\eta_0(i,j) = \exp\left[-\frac{\left(\left(C_{IR}(i,j) - \mu\right)^2\right)}{2k\sigma^2}\right]$$
(7)

$$\eta_1(i,j) = 1 - \eta_0(i,j)$$
(8)

式中: μ 和 σ 分别表示红外低频子带图像像素均 值和方差, k 为自适应调整系数, k 值一般在 1~3 之 间取值,文中算法取 k=1.5。取 $\mu=50$, $\sigma=20$, k=1.5时的高斯模糊逻辑函数见图 3。



Fig.3 Logic function of Gaussian blur

1.4 带通子带图像融合策略

红外与彩色可见光图像高频系数融合的目的,是 将红外图像中的特征目标边缘,和可见光图像中的边 缘、线条以及区域边界同时表现出来。高频系数信息 反映的是图像细节信息,细节信息间有很大的独立 性,因为文中将对高频系数采用像素点的绝对值取大 的融合策略,该算法能极大程度保留图像的边缘细 节,保证融合图像的清晰度,同时算法运行效率高。 其步骤如下所述。

1)融合图像在最高分解尺度 P 上的各高频系数
 见式(9):

$$C_{P,q}^{F}(i,j) = \begin{cases} C_{P,q}^{V}(i,j), \left| C_{P,q}^{V}(i,j) \right| \ge \left| C_{P,q}^{IR}(i,j) \right| \\ C_{P,q}^{IR}(i,j), \left| C_{P,q}^{V}(i,j) \right| < \left| C_{P,q}^{IR}(i,j) \right| \end{cases}$$
(9)

式中: V 和 *IR* 表示待融合的可见光和红外图像; *F* 表示融合图像; (*i*,*j*)表示图像的第*i*行第*j* 列。

2)对于分解尺度 P 以外的其他(P-1)层的高频
 系数,定义区域强度比 R^{V,IR}_{p,q}(i, j)(p=1,2···P-1)作为
 匹配测度,其表达式为:

$$R_{p,q}^{V,IR}(i,j) = \frac{I_{p,q}^{V}(i,j)}{I_{p,q}^{IR}(i,j)} (p = 1, 2 \cdots P - 1)$$
(10)

$$R_{p,q}^{V,IR}\left(i,j\right) = \sum_{m \in K, n \in L} w(m,n)$$
$$\left| C_{p,q}^{S}\left(i+m,j+n\right) \right| \left(S = V, IR\right)$$
(11)

其中: $I_{p,q}^{s}(i,j)$ 表示高频系数 $C_{p,q}^{s}(i,j)$ 以(*i*,*j*) 为中心位置的区域强度; *K* 和 *L* 是局域大小,文中取 K=3, L=3; m 和 n 的变换范围在 K 和 L 内;此外 $w = \frac{1}{8[010,141,010]}$ 为窗口掩模。

 $R_{p,q}^{V,R}$ 的值接近 1 表示,表示和系数 $C_{p,q}^{V}(i,j)$ 和 $C_{p,q}^{IR}(i,j)$ 具有相似性,否则认为有很大差异。

在此,定义待融合图像V的高频系数选择因子为 $W_{p,q}^{V}(i,j)$:

$$W_{p,q}^{V}(i,j) = \begin{cases} 1, R_{p,q}^{V,IR}(i,j) \ge \frac{1}{T} \\ 0.5, T \le R_{p,q}^{V,IR}(i,j) < \frac{1}{T} \\ 0, R_{p,q}^{V,IR}(i,j) < T \end{cases} \quad (p = 1, 2 \cdots P - 1)$$

(12) 式(12)中, T∈(0,1)为选择阈值(一般取值为

0.5~1),则合成后的高频系数为:

$$C_{p,q}^{F}(i,j) = W_{p,q}^{A}(i,j) + [1 - W_{p,q}^{A}(i,j)]C_{p,q}^{B}(i,j)$$

 $(p = 1, 2 \cdots P - 1)$ (13)

2 基于 NSST 与 IHS 的红外与彩 色可见光图像融合算法

红外图像提供了丰富的热辐射信息,隐藏目标的 轮廓特征容易被察觉,但对比度低、细节信息较弱, 即红外隐藏目标集中在高频区域;彩色可见光图像能 记录场景的更多清晰细节信息,适合人眼视觉观察, 即背景信息分布在低频区域,细节边缘分布在高频区 域。先对彩色可见光作 IHS 变换,分离出亮度分量和 色度分量,再通过 NSST 变换分别对红外和彩色可见 光图像的亮度分量进行分解,得到二者的低通子带图 像,代表了图像的主要成分,即源图像的背景信息, 而一系列带通图像代表了从不同尺度、不同方向下的 源图像的边缘信息,即源图像的细节分量。再对低通 子带图像采用自适应高斯模糊逻辑算法,对高通子带 图像采用像素点的绝对值取大的融合策略,实现该算 法过程,具体步骤见图 4。

1)选取 2 幅都为 *m×n* 分辨率的灰度红外图像 *IR* 和 RGB 彩色可见光图像 *V*。

2)将 RGB 彩色可见光图像 V 通过 HSI 变换得 到亮度分量 V_I 和色度分量 V_H, V_S, 然后对 IR 和 V_I 进行 NSST 多尺度多方向变换,分别得到低频子 带系数 $\{C_0^{IR}(m,n), C_{p,q}^{V-I}(m,n)\}$ 以及高频子带系数 $\{C_{p,q}^{IR}(m,n), C_{p,q}^{V-I}(m,n)\}$ 。其中 p 表示图像的分解尺度 数, q 表示在 p 分解尺度下的分解方向数。

3)通过自适应高斯模糊逻辑算法对低频子带系数 $\left\{C_0^{IR}(m,n), C_0^{V-I}(m,n)\right\}$ 进行融合,得到低频子带系数图像融合结果 $C_0^{F}(m,n)$;通过基于像素点的绝对值



Fig.4 Algorithm diagram

取大算法对高频子带系数 $\left\{C_{p,q}^{IR}(m,n), C_{p,q}^{V-I}(m,n)\right\}$ 进 行融合,得到高频子带系数融合结果 $C_{p,q}^{F}(m,n)$ 。

4) 对上一步得到的低频子带系数融合结果 $C_0^F(m,n)$ 和高频子带系数融合结果 $C_{p,q}^F(m,n)$ 进行 NSST 逆变换,得到融合图像 F。

5) 将融合图像 F^{*}作为新的亮度分量,结合原有 的色度分量 V_H, V_S, 通过 HSI 逆变换, 得到最终 融合图像 F。

3 仿真实验与结果分析

3.1 红外与彩色可见光图像融合实验准备

为了验证所述理论分析和算法,选取2组红外与 彩色可见光图像进行仿真融合实验。这2组图像均取 自 Octec 红外与彩色可见光序列图像,一组是有烟雾 覆盖的640×480像素的"Octec_22"红外与彩色可见光 序列图像,另一组是无烟雾影响的640×480像素的 "Octec_04"红外与彩色可见光序列图像。

为了进一步验证算法的有效性,选用了3种主流 算法与文中算法进行比较:算法1,基于 LPT 和 IHS 的红外与彩色可见光的图像融合算法;算法2,基于 SWT 和 IHS 的红外与彩色可见光的图像融合算法; 算法3,基于 NSCT 和 IHS 的红外与彩色可见光的图 像融合算法。各算法均使用文中算法的第2步,通过 IHS 变换将彩色可见光图像的亮度信息和色度信息 分离,且运行中的低频子带图像和高频子带图像的融 合策略均采用自适应高斯模糊逻辑算法和像素点的 绝对值取大的融合方案。

所有算法参数作如下选择:LPT 算法采用 3 级拉 普拉斯金字塔分解,滤波器选择"burt";SWT 算法采 用 3 级小波分解,小波基选择"bior4.4";NSCT 算法 的非下采样金字塔级数为 3,非下采样金字塔滤波器 选择"maxflat",方向分解滤波器选择"dmaxflat7",方 向分解级数依次为 4, 3, 2;NSST 算法的尺度滤波器 NSP 分解级数是 3,NSP 选用 "maxflat",方向滤波 器 SF 的方向数值设置为(4,8,8)。

由于彩色图像融合质量评价与灰度图像融合质 量评价有着较大差异,彩色图像融合质量评价采用以 主观评价为主,客观指标评价为辅的融合图像质量评 价机制。主观评价通过直观视觉对彩色融合图像的细 节清晰度,红外隐藏目标对比度和色彩失真情况等因 素进行评价。 同时引入定量分析的客观评价方法,采 用的是信息熵(IE),平均梯度(AG),空间频率(SF), 标准差(SD)等4个指标,由于彩色融合图像为RGB 图像,因此计算客观评价指标时取 RGB 三通道的平 均值。其中, IE 表示图像所携带信息量的大小; AG 敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力,值越 大,表示对比度越高,图像越清晰;SF反映图像在空 间域的总体活跃程度,值越大图像质量越高;SD表 示像素点与图像平均值的离散程度,值越大图像的反 差越大,可看到图像信息越多,融合质量越好。此外, 计入各算法的运行时间 t(s), 取的是 10 次算法运 算时间的平均值。

需要说明的是,所有算法的运行都是在处理器品 牌为 Intel 酷睿 i5-8300H, 主频 2.3 GHz, 内存 8 GB, MATLAB R2018a 的实验平台上完成的。

3.2 "Octec_22"的红外与彩色可见光图像 融合实验

经过仿真实验,融合结果见图 5,对应的 IE 和 SD 等 4 种客观评价指标数据见表 1。

从图 5 可知, 文中算法与其他 3 种算法均可以 将红外与彩色可见光图像的有效信息提取出来,并 融入到融合图像中,但效果差异明显。4 幅彩色融合 图像中的红外隐藏目标均能从直观视觉中察觉,但 明显算法 1 和算法 2 的对比度低于算法 3 和文中算 法,而算法 3 对比算法 1、算法 2 和文中算法,红外 隐藏目标变小了,文中算法的红外隐藏目标的对比 度最高,直观视觉效果最明显。4 幅彩色融合图像中 的树木、房瓦纹理等细节都保存较为完好,但算法 1 和算法 2 的烟雾和天空云彩多出了源图像都没有的 许多絮状细节,算法 3 和文中算法更忠实还原了源



a 红外图像

b 彩色可见光图像

COCTEC COCTEC COCTEC

d 算法 2

e 算法 3

f 文中算法

图 5 "Octec 22"图和各方法的融合结果 Fig.5 Image of "Octec 22" and fusion result of each algorithm

	表 1	"Octec	_22"融合结	i果的客观l	贡量评价	
Tab.1	Objective	quality	evaluation	of "Octec	22" fusion	result

算法	IE	AG	SF	SD	t/s
算法1	7.1299	4.686	15.7839	57.9925	2.7959
算法2	7.1072	4.5094	15.7160	57.8512	2.2729
算法3	7.1264	4.2992	14.1455	46.7218	120.1707
文中算法	7.1544	4.4076	14.2555	47.0909	5.0595

图像的细节信息。而在烟雾减淡的视觉效果上,文中 算法是最好的,相比其他3种算法能看到更多烟雾 后被遮挡的房屋轮廓和细节等信息。在融合结果的 色彩还原上,算法1和算法2的天空正中央呈现出 源图像都没有的棕色,存在色彩失真现象,算法3和 文中算法的融合结果亮度高于算法 1 和算法 2, 且 算法3和文中算法更加忠实地还原了源图像的色彩。

从表1的指标数据上看,文中算法的 IE 值是4 种算法中最高的, 直观效果就是较其他 3 种算法彩 色融合图像整体细节过渡更加自然,图像更加清晰。 文中算法在 AG, SF和 SD 值上高于算法 3, 但都低 于算法 1 和算法 2,表明算法 1 和算法 2 的彩色融 合图像的像素活跃度更高,像素灰度值反差更大,体 现在直观视觉上算法 1 和算法 2 的彩色融合图像相 比于算法 3 和文中算法,图像整体亮暗对比度更高, 图像细节反差大。究其原因,笔者认为算法1和算 法 2 的彩色融合图像中烟雾和天空云彩呈现了源图 像没有的絮状物,"产生"出图像纹理细节信息,以及 天空中央都存在的色彩失真是呈现出图像细节反差 大的"幕后"因素,而算法1和算法2对于源图白色 烟雾的减淡"能力"最弱,从而整体对比度最高,而事 实上在红外隐藏目标对比度上,无疑文中算法是最 高的。对于算法运行效率,算法1和算法2最佳, 文中算法其次,而算法3耗时2min左右,运行效 率较低。

"Octec 04"红外与彩色可见光图像融 3.3 合实验

无烟雾遮挡的"Octec 04"红外与彩色可见光图 像及 4 种融合算法的融合结果见图 6, 对应的 IE 和 SD 等 4 种客观评价指标数据见表 2。

同图 5 彩色图像融合结果的对比实验相似,从主 观角度评价无烟雾遮挡的图 6 的 4 组实验,红外隐藏 目标与彩色可见光的细节信息都得到了综合,效果还 是有差距。红外隐藏目标对比度文中算法对比其他3 种算法显然是最高的,且算法3的对比度最低。4种



a 红外图像

b 彩色可见光图像

COCTEC **OCTEC** COCTEC

d 算法 2

e 算法 3

f 文中算法

图 6 "Octec 04"图和各方法的融合结果 Fig.6 Image of "Octec 04" and fusion result of each algorithm

表 2	"Octec_04	"融合结果	艮的客观 /	贡量 评'	价
Fab.2 Obje	ctive qualit	v e of "O	ctec 04"	fusion	results

算法	IE	AG	SF	SD	t/s
算法1	6.9806	6.0254	19.1502	59.4964	1.5367
算法2	6.9663	5.8984	19.0915	59.2731	3.1793
算法3	7.0929	5.7514	17.9534	51.5122	120.1428
文中算法	7.1117	5.8342	18.1275	51.6003	5.0075

算法从直观视觉上均能较好保留源图像的房屋、树木 等细节信息。算法1和算法2的彩色融合图像的天空 中央均出现了非常明显的色差现象,算法3和文中算 法的彩色融合图像亮度高于算法1和算法2,且算法 3 和文中算法能更加忠实还原源图像的色彩。

由表 2 可以看出,算法 1 的 IE 值远低于其他 3 种算法,文中算法的 IE 值最高,其对应的直观视觉 感受是较其他 3 种算法彩色融合图像细节过渡更加 自然,图像更加清晰。这组实验中,文中算法同样在 AG, SF和 SD 值上高于算法 3, 但都低于算法 1和 算法 2,表明图像整体对比度和细节反差上算法 1和 算法 3 的效果最好,然而算法 1 和算法 2 的天空云彩 中同样出现了更为严重的色彩失真现象。在算法运行 效率上,与第一组实验结果相似,算法 1>算法 2>文 中算法>>算法3。

3.4 实验讨论

基于 NSST 与 IHS 的红外与彩色可见光图像融 合算法对比 LPT, SWT 和 NSCT 等 3 种算法, 更忠

实还原了源图像细节信息,红外隐藏目标对比度最 高,未出现明显色彩失真现象。在灰度图像融合中, 客观评价指标的高低可直观体现出融合图像质量的 优劣,但灰度图像融合质量评价机制并不完全适用于 彩色图像融合,彩色图像融合结果的客观评价指标的 数据更优并不一定能给人更好的直观融合效果。李光 鑫[16]、邢雅琼[18]、李郁峰[9]、孔韦韦[17]等算法的彩色 图像融合,一味地以灰度图像融合客观评价机制为引 导,增强了彩色融合图像的整体对比度、细节清晰度, 结果都出现了彩色融合图像不同程度的色彩失真,红 外隐藏目标对比度效果不佳,而且增添了源图像并没 有的一些多余纹理信息等。

结语 4

充分利用了 NSST 变换对图像细节信息提取的 优异性能,借助于符合人眼视觉感知的 IHS 颜色空 间,提出了一种基于 NSST 和 IHS 的红外与彩色可见 光图像融合算法,采用模糊数学领域的自适应高斯模 糊逻辑算法作为低通子带图像的融合策略,像素点的 绝对值取大的带通子带图像的融合策略,并通过主观 评价与客观评价相结合开展算法性能分析,实验结果 表明,算法得到的彩色融合图像红外目标突出,源图 像细节信息真实还原,且色彩未出现明显失真现象。 本算法彩色图像融合效果全方面兼顾,且平均算法运 算时间为 5.0335 s,算法运行效率较高,符合实时性。 该算法是一套有效的针对红外与彩色可见光图像融 合的方案,可广泛运用于实时监控、智能机器人、勘 探等领域。

参考文献:

- 刘健雷, 雷英杰, 邢雅琼, 等. 基于 NSST 域隐马尔 可夫树模型的 SAR 和灰度可见光图像融合[J]. 控制 与决策, 2016(3): 453—457.
 LIU Jian-lei, LEI Ying-jie, XING Ya-qiong, etal. SAR and Gray-scale Visible Image Fusion Based on NSST Domain Hidden Markov Tree Model[J]. Control and Decision, 2016(3): 453—457.
- [2] 彭开. 基于遗传算法的遥感图像融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
 PENG Kai. Research on Remote Sensing Image Fusion Method Based on Genetic Algorithm[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2010.
- [3] 邢雅琼, 王晓丹, 毕凯, 等. 基于 NSCT 和 ICA 的红 外和可见光图像融合方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2251—2257.
 XING Ya-qiong, WANG Xiao-dan, BI Kai, et al. Infrared and Visible Image Fusion Method Based on NSCT and ICA[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2251—2257.
- [4] 潘瑜,郑钰辉,孙权森,等.基于 PCA 和总变差模型的图像融合框架[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011,23(7):1200—1210.

PAN Yu, ZHENG Yu-hui, SUN Quan-sen, et al. Image Fusion Framework Based on PCA and Total Variation Model[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2011, 23(7): 1200—1210.

- [5] 王朝晖, 王佳琪, 赵德功, 等. 基于 Shearlet 与改进 PCNN 的图像融合[J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 213—216.
 WANG Zhao-hui, WANG Jia-qi, ZHAO De-gong, et al. Image Fusion Based on Shearlet and Improved PCNN[J]. Laser and Infrared, 2012, 42(2): 213—216.
- [6] 包观笑,孙刘杰,于海娇. 基于拉普拉斯金字塔的数字 水印防伪技术[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 130—133.
 BAO Guan-xiao, SUN Liu-jie, YU Hai-jiao. Digital Watermark Anti-Counterfeiting Technology Based on Laplace Pyramid[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 130—133.

- [7] 梁立哲.小波变换在人脸图像融合中的应用[J]. 软件工程, 2016, 19(10): 34—36.
 LIANG Li-zhe. Application of Wavelet Transform in Face Image Fusion[J]. Software Engineering, 2016, 19(10): 34—36.
- [8] 邹佳彬,孙伟.基于提升静态小波变换与联合结构 组稀疏表示的多聚焦图像融合[J].计算机应用, 2018, 38(3): 859—865.
 ZOU Jia-bin, SUN Wei. Multi-focus Image Fusion Based on Lifting Static Wavelet Transform and Sparse Representation of Joint Structure Group[J]. Computer Application, 2018, 38(3): 859—865.
- [9] 李郁峰,范勇,李绘卓,等.基于 Curvelet 变换的红 外与彩色可见光图像融合算法[J]. 计算机工程与应 用, 2010, 46(11): 186—189.
 LI Yu-feng, FAN Yong, LI Hui-zhuo, et al. Fusion Algorithm for Infrared and Color Visible Light Diagram Based on Curvelet Transformation[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(11): 186—189.
- [10] SADREAZAMI H, AHMAD M O, SWAMY M N S. Multiplicative Watermark Decoder in Contourlet Domain Using the Normal Inverse Gaussian Distribution[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(2): 196—207.
- [11] LIU X, ZHOU Y, WANG J. Image Fusion Based on Shearlet Transform and Regional Features[J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(6): 471—477.
- [12] LIT, WANGY. Biological Image Fusion Using A NSCT Based Variable-weight Method[J]. Information Fusion, 2011, 12(2): 85—92.
- [13] KONGW. Technique for Image Fusion Based on NSST Domain INMF[J]. Optic-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(11): 2716–2722.
- [14] JORDAN T, SAHLSTEN T. Fourier Transforms of Gibbs Measures for the Gauss Map[J]. Mathematische Annalen, 2016, 364(3/4): 983—1023.
- [15] 李光鑫, 徐抒岩, 赵运隆, 等. 颜色传递技术的快速 彩色图像融合[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1637—1647.
 LI Guang-xin, XU Shu-yan, ZHAO Yun-long, et al. Fast Color Image Fusion Using Color Transfer Technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1637—1647.
 1161 本米金, 吕住亚, 却君, 红幼和恋色可见来图像真度
- [16] 李光鑫,吴伟平,胡君. 红外和彩色可见光图像亮度-对比度传递融合算法[J]. 中国光学,2011,4(2): 161—168.

LI Guang-xin, WU Wei-ping, HU Jun. Luminance-Contrast Transfer Fusion Algorithm For Infrared and Color Visible Images[J]. Chinese Optics, 2011, 4(2): 161— 168.

[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, 32(7): 1389—1393.

KONG Wei-wei, LEI Ying-jie, LEI Yang, et al. Fusion Method for Grayscale Visible Light and Infrared Light Based on NSCT and HIS Transformation Domain[J]. System Engineering and Electronics Technology, 2010, 32(7): 1389–1393.

[18] 邢雅琼, 王晓丹, 刘健, 等. 基于 NSST 域的红外和 彩色可见光图像融合[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 536—544.

> XING Ya-qiong, WANG Xiao-dan, LIU Jian, et al. Infrared and Color Visible Image Fusion Based on NSST Domain[J]. Systems Engineering Theory and Practice,

2016, 36(2): 536-544.

- [19] 邓立暖, 尧新峰. 基于 NSST 的红外与可见光图像融合算法[J]. 电子学报, 2017, 45(12): 2965—2970.
 DENG Li-nuan, YAO Xin-feng. Infrared and Visible Image Fusion Algorithm Based on NSST[J]. Acta Electronica Sinca, 2017, 45(12): 2965—2970.
- [20] YANG Y, WAN W, HUANG S, etal. Remote Sensing Image Fusion Based on Adaptive IHS and Multiscale Guided Filter[J]. IEEE Access, 2017, 4: 4573—4582.
- [21] DAMMAVALAM S R, MADDALA S, PRASAD M. Quality Assessment of Pixel-Level Image Fusion Using Fuzzy Logic[J]. International Journal on Soft Computing, 2012, 3(1).