

基于MSSTO与NSCT变换的可见光与红外图像增强融合

王峰[†], 程咏梅

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘要: 针对红外与可见光图像融合结果中边缘区域失真严重、对比度差的问题, 提出一种基于多尺度顺序翻转算子(MSSTO)和非下采样轮廓波变换(NSCT)的图像增强融合算法. 首先, 采用NSCT将图像分解成高低频系数; 其次, 利用MSSTO从低频系数中提取出有效的亮、暗信息, 并将其注入到融合低频系数中以合成最终低频系数; 再次, 高频系数采用局部空间频率加权(LFSW)与区域能量取大的融合方案; 最后, 对合成的高低频系数进行反NSCT得到融合图像. 实验结果验证了所提出算法的有效性.

关键词: 图像融合; 非下采样轮廓波变换; 多尺度顺序翻转算子; 数学形态; 局部空间频率

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Visible and infrared image enhanced fusion based on MSSTO and NSCT transform

WANG Feng[†], CHENG Yong-mei

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: To overcome the disadvantages of low contrast and distortion of the edge region for the existing visible and infrared image fusion methods, an image enhanced fusion algorithm based on the multi-scale sequential toggle operator(MSSTO) and non-subsampled contourlet transform(NSCT) is proposed. Firstly, the source images are decomposed into low frequency and high frequency coefficients by using NSCT transform. Then, the effective bright and dark image informations are extracted from the low frequency coefficients of source images by MSSTO transform, which are injected into the fusing low frequency coefficient to obtain the final low frequency synthetic coefficient. The high frequency sub-band coefficients are fused by using the local spatial frequency weighting and region energy. Finally, the fused image can be obtained by the NSCT inverse transformation of the high and low fused coefficient. The experiment results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: image fusion; non-subsampled contourlet transform; multi-scale sequential toggle operator; mathematical morphology; local spatial frequency

0 引言

在光学信号处理和机器视觉领域中, 图像融合已成为一个非常重要的研究课题, 它是把从多个传感器或不同情况下的单一传感器捕获的两幅或多幅图像合成有用的信息. 其中, 常用的是红外与可见光传感器^[1-2].

红外(Ir)图像记录的是一个场景内目标的热辐射信息, 目标和轮廓特征容易被观察到. 然而, Ir图像具有对比度低、细节信息较弱的缺点. 另一方面, 可见光(Vis)图像能够描述高清晰场景更多的细节信息^[3], 但目标轮廓特征显示得并不是特别清楚. 因此, 将具

有互补性的Ir与Vis图像进行融合, 能够获得更全面、更准确和更可靠的信息. 在军事侦察、公共安全和遥感^[4]等领域已得到了广泛的应用.

近年来, 出现了许多Ir与Vis图像的融合方法, 这些方法大致可划分为3类: 像素级融合、特征级融合和决策级融合. 与特征级和决策级融合相比, 像素级融合提供了更多的原始信息. 在已有的融合方法中, 基于多尺度变换的融合方法在像素级融合域中被认为是一种有效的方法, 其中包括: 金字塔变换^[5-7]、离散小波变换(DWT)^[8-9]、平移不变离散小波变换(SIDWT)^[10]、脊波变换(RT)^[11]、曲线波变换

收稿日期: 2015-11-15; 修回日期: 2016-01-29.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61135001); 西安市科技计划项目(CXY1436(9), CXY1350(2)).

作者简介: 王峰(1981—), 男, 博士生, 从事智能信息处理、机器学习的研究; 程咏梅(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理、目标跟踪与识别、信息融合等研究.

[†]通讯作者. E-mail: wangfeng81113@163.com

(CVT)^[12]、轮廓波变换(CT)^[13]和NSCT^[14]等.虽然这些多尺度变换具有其独自的特点,但所有的多尺度变换方法具有一个通用的规则,即:首先将原始图像划分成高低频成分,融合这两种类型图像;然后反变换融合结果形成最终图像.研究表明,NSCT变换在Ir与Vis图像融合中虽能取得一定的融合效果,但由于这两种图像的灰度特征相差较大,融合后图像中仍存在细节信息表现不清楚、对比度差的缺点.文献[15]采用新的多尺度形态学翻转算子(MSSTO)从原图像中提取亮、暗图像特征,然后与原图像融合,它能有效地提高融合图像的对比度.但是融合图像在边缘区域出现了严重的失真现象.

本文提出一种新的方法来解决以上问题.首先,采用NSCT把Ir与Vis图像分解成低频和高频子带系数;其次,运用MSSTO分解方法从低频系数中分别提取亮信息(BI)和暗信息(DI),并对提取的BI和DI先进行加权融合,再采用像素值取大策略获得最终的BI和DI;再次,将提取的亮、暗信息与两个低频系数进行合成;最后,对融合低频系数和采用LFSW与区域能量取大融合的高频系数进行逆NSCT获得最终图像.仿真实验结果表明,所提出的新方法能获得具有对比度高和边缘保持最好的融合图像.

1 融合方法

1.1 融合框架

本文所提出的Ir与Vis图像融合的原理框图见图1,具体实现过程如下.

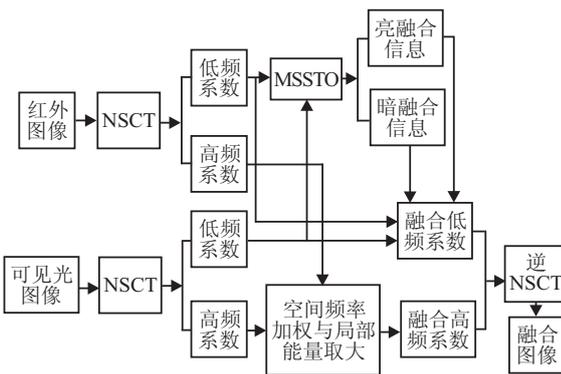


图1 融合方法的原理框图

1) 采用NSCT将两幅已经过初始配准的Ir和Vis图像分解成低频子带系数 $\{P_{l_0}^{\text{Ir}}, P_{l_0}^{\text{Vis}}\}$ 和高频子带系数 $\{P_{l,k}^{\text{Ir}}, P_{l,k}^{\text{Vis}}\}$,其中 $P_{l,k}^{\text{Ir}}$ 和 $P_{l,k}^{\text{Vis}}$ 分别表示图像在 l 尺度 k 方向上的高频子带系数;

2) 在NSCT变换域,采用MSSTO变换分别提取低频系数的BI和DI图像细节信息;

3) 将BI和DI图像信息并入融合后的低频系数

中,得到低频融合系数 $P_{l_0}^F$;

4) 采用LFSW与局部区域能量取大的融合策略融合高频子带系数,并得到融合后的高频系数为 $P_{l,k}^F$;

5) 利用NSCT逆变换,从融合的低频 $P_{l_0}^F$ 和高频子带系数 $P_{l,k}^F$ 中重构出融合图像 F .

1.2 基本算法

NSCT和MSSTO算法的实现过程可参见文献[14-15].

1.2.1 多尺度顺序翻转算子

基于数学形态学,采用开、闭运算作为基元类型得到的一次翻转算子(TO)可以定义为^[15]

$$\text{TO}(P_{l_0}^X)(x, y) = \begin{cases} P_{l_0}^X \circ B(x, y), & \text{if } P_{l_0}^X \bullet B(x, y) - P_{l_0}^X < P_{l_0}^X - P_{l_0}^X \circ B(x, y); \\ P_{l_0}^X \bullet B(x, y), & \text{if } P_{l_0}^X \bullet B(x, y) - P_{l_0}^X > P_{l_0}^X - P_{l_0}^X \circ B(x, y); \\ P_{l_0}^X, & \text{else.} \end{cases} \quad (1)$$

其中: \circ 为开运算, \bullet 为闭运算, (x, y) 为像素的位置, $B(x, y)$ 为结构元素, $P_{l_0}^X$ ($X = \text{Ir}, \text{Vis}$)为图像的低频系数.

采用多尺度结构元素定义的多尺度连续翻转算子(MSSTO)可以表示为

$$\text{STO}_{B_i}(P_{l_0}^X) = \text{TO}_{B_i}(\text{STO}_{B_{i-1}}(P_{l_0}^X)), \quad (2)$$

$$\text{STO}_{B_1}(P_{l_0}^X) = \text{TO}_{B_1}(P_{l_0}^X), \quad (3)$$

$$\text{STO}_{B_0}(P_{l_0}^X) = P_{l_0}^X, \quad (4)$$

其中 B_i 为在尺度 i 上的结构元素.

1.2.2 亮和暗细节信息的提取

1) 亮细节信息提取.

通过计算 $\text{STO}_{B_{i-1}}$ 和 STO_{B_i} 的差异提取低频系数 $P_{l_0}^X$ ($X = \text{Ir}, \text{Vis}$)在尺度 i 的亮细节信息分别为

$$\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})(x, y) = \max(\text{STO}_{B_{i-1}}(P_{l_0}^{\text{Ir}})(x, y) - \text{STO}_{B_i}P_{l_0}^{\text{Ir}}(x, y), 0), \quad (5)$$

$$\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})(x, y) = \max(\text{STO}_{B_{i-1}}(P_{l_0}^{\text{Vis}})(x, y) - \text{STO}_{B_i}P_{l_0}^{\text{Vis}}(x, y), 0). \quad (6)$$

其中: STO_{B_i} 为尺度1到 i 的平滑图像特征, $\text{STO}_{B_{i-1}}$ 为尺度1到 $i-1$ 的平滑图像特征.为了得到有效的融合特征,采用权值策略对 $\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})$ 和 $\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})$ 进行融合,得到亮信息的表达式为

$$\begin{aligned} \text{BIF}_{B_i}(x, y) &= \text{wbf}_{B_i} \times \text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})(x, y) + \\ &\quad \text{wbg}_{B_i} \times \text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})(x, y), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{wbf}_{B_i} &= \text{mean}(\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})) / (\text{mean}(\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})) + \\ &\quad \text{mean}(\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}}))), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{wbg}_{B_i} &= \text{mean}(\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})) / (\text{mean}(\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})) + \\ &\quad \text{mean}(\text{BIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}}))). \end{aligned} \quad (9)$$

2) 暗细节信息提取.

同理, 低频系数 $P_{l_0}^X$ ($X = \text{Ir}, \text{Vis}$) 在尺度 i 的暗细节信息分别表示如下:

$$\begin{aligned} \text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})(x, y) &= \\ \max(\text{STO}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})(x, y) - \text{STO}_{B_{i-1}}P_{l_0}^{\text{Ir}}(x, y), 0), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})(x, y) &= \\ \max(\text{STO}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})(x, y) - \text{STO}_{B_{i-1}}P_{l_0}^{\text{Vis}}(x, y), 0). \end{aligned} \quad (11)$$

与 $\text{BIF}_{B_i}(x, y)$ 的计算相似, 在每个尺度 i 的暗细节信息 $\text{DIFF}_{B_i}(x, y)$ 的计算式为

$$\begin{aligned} \text{DIFF}_{B_i}(x, y) &= \text{wdf}_{B_i} \times \text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})(x, y) + \\ &\quad \text{wdg}_{B_i} \times \text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})(x, y), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{wdf}_{B_i} &= \text{mean}(\text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})) / (\text{mean}(\text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})) + \\ &\quad \text{mean}(\text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}}))), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{wdg}_{B_i} &= \text{mean}(\text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}})) / (\text{mean}(\text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Ir}})) + \\ &\quad \text{mean}(\text{DIF}_{B_i}(P_{l_0}^{\text{Vis}}))). \end{aligned} \quad (14)$$

1.2.3 多尺度亮和暗融合信息

采用 $\text{BIF}_{B_i}(x, y)$ 像素值取大法提取亮融合信息, 其表达式为

$$\text{MBIF}(x, y) = \max_i(\text{BIF}_{B_i}(x, y)). \quad (15)$$

同理, $\text{DIFF}_{B_i}(x, y)$ 暗细节特征可以表示为

$$\text{MDIF}(x, y) = \max_i(\text{DIFF}_{B_i}(x, y)). \quad (16)$$

1.3 融合策略

1.3.1 低频系数融合

原图像经过 NSCT 分解后, 将分别得到 Ir 和 Vis 图像的低频系数. 与文献 [15] 的特征提取方法有所不同, 本文直接对 Ir 和 Vis 图像的低频子带系数进行 MSSTO 变换, 并从中提取出亮、暗图像的细节特征. 这样提取的图像特征非常平滑, 没有毛刺现象. 将这些信息注入到融合后的低频系数中, 能够进一步提高融合图像的对比度, 增强融合图像的边缘细节信息. 因此, 低频系数的融合规则可以设计为

$$\begin{aligned} P_{l_0}^F(i, j) &= [P_{l_0}^{\text{Ir}}(i, j) + P_{l_0}^{\text{Vis}}(i, j)] / 2 - \\ &\quad \alpha \times \text{MBIF}(i, j) + \beta \times \text{MDIF}(i, j). \end{aligned} \quad (17)$$

其中: α 和 β 分别表示以 $[0, 4]$ 为数据范围的融合权重系数, 主要用来增强融合图像的对比度; $P_{l_0}^F(i, j)$ 表示在位置 (i, j) 处的低频融合系数.

1.3.2 高频系数融合

高频系数代表原图像的细节成分, 局部区域空间频率 (LAF)^[16] 起源于人类视觉系统, 反映了一幅图像的整体活跃程度. 本文采用 LAF 加权与局部区域能量取大的策略获得融合高频系数.

1) 计算高频系数的 LAF. 设 $P_{l,k}^{\text{Ir}}$ 和 $P_{l,k}^{\text{Vis}}$ 分别表示 Ir 和 Vis 图像的高频系数, 其对应的 LAF 分别为 $\text{LAF}_{l,k}^{\text{Ir}}$ 和 $\text{LAF}_{l,k}^{\text{Vis}}$, 即

$$\text{LAF}_{l,k}^X(i, j) = \sqrt{\text{LRF}^2(i, j) + \text{LCF}^2(i, j)}. \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{LRF}(i, j) &= \frac{1}{\sqrt{(2M+1)(2N+1)}} \times \\ &\quad \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N |P_{l,k}^X(i+m, j+n) - \\ &\quad P_{l,k}^X(i+m, j+n-1)|, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{LCF}(i, j) &= \frac{1}{\sqrt{(2M+1)(2N+1)}} \times \\ &\quad \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N |P_{l,k}^X(i+m-1, j+n) - \\ &\quad P_{l,k}^X(i+m, j+n)|. \end{aligned} \quad (20)$$

这里: $(2M+1) \times (2N+1)$ 是局部区域的大小, X 分别表示 Ir 和 Vis 图像.

2) 计算局部区域 LAF 的权重系数 w_{Ir} 和 w_{Vis} , 即

$$\begin{cases} w_{\text{Ir}}(i, j) = \frac{\text{LAF}_{l,k}^{\text{Ir}}(i, j)}{\text{LAF}_{l,k}^{\text{Ir}}(i, j) + \text{LAF}_{l,k}^{\text{Vis}}(i, j)}, \\ w_{\text{Vis}}(i, j) = \frac{\text{LAF}_{l,k}^{\text{Vis}}(i, j)}{\text{LAF}_{l,k}^{\text{Ir}}(i, j) + \text{LAF}_{l,k}^{\text{Vis}}(i, j)}. \end{cases} \quad (21)$$

3) 计算局部加权区域能量 $E_{l,k}^{\text{Ir}}$ 和 $E_{l,k}^{\text{Vis}}$, 即

$$E_{l,k}^X(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w(m, n) \times [P_{l,k}^X(i+m, j+n)]^2. \quad (22)$$

其中: $P_{l,k}^X$ ($X = \text{Ir}, \text{Vis}$) 表示在 l 尺度 k 方向上位置 (i, j) 处的高频系数; $w(m, n) = [1, 2, 1; 2, 4, 2; 1, 2, 1] / 16$ 表示窗口大小为 3×3 的权重矩阵.

4) 计算融合后的高频系数, 有

$$P_{l,k}^F(i, j) =$$

$$\begin{cases} P_{l,k}^{Ir}(i,j), & \text{if } LAF_{l,k}^{Ir}(i,j) > LAF_{l,k}^{Vis}(i,j) \\ & \text{and } E_{l,k}^{Ir}(i,j) > E_{l,k}^{Vis}(i,j); \\ P_{l,k}^{Vis}(i,j), & \text{if } LAF_{l,k}^{Ir}(i,j) < LAF_{l,k}^{Vis}(i,j) \\ & \text{and } E_{l,k}^{Ir}(i,j) < E_{l,k}^{Vis}(i,j); \\ w_{Ir}(i,j)P_{l,k}^{Ir}(i,j) + w_{Vis}(i,j)P_{l,k}^{Vis}(i,j), \\ & \text{else.} \end{cases} \quad (23)$$

2 亮、暗信息源与相关参数的选择

本文主要采用NSCT和MSSTO两种基本变换,其中经NSCT分解后低频系数亮、暗信息的提取,以及融合低频系数时都需要选择一些参数,并且这些参数对融合效果有很大的影响.本节选取“Uncamp”数据(如图2(a)和图2(b)所示)为例进行分析.

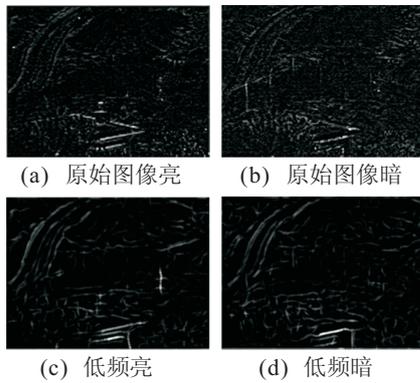


图2 从不同图像中提取的亮、暗信息

2.1 亮、暗信息源的选择

采用MSSTO算子从原图像中提取的亮、暗信息包含有图像的边缘和纹理特征,将其合成到原图像中,会导致融合后图像的边缘细节不清楚,并且融合图像中含有大量的噪声.而经NSCT分解的低频成分和高频成分分别反映了图像的纹理和目标的边缘信息.从低频图像中利用MSSTO算子提取的亮和暗信息不包含原始图像的边缘特征,将提取的亮、暗信息融合到低频系数中,将不会影响到原来的边缘,反而能够减少边缘区域的失真,提高融合图像的对比度.图2(a)~图2(d)显示了从原始图像和低频系数中提取并经过融合后的亮、暗信息.从图2(a)和图2(b)中可以看出,目标区域显示的并不是特别清楚,边缘区域周围出现毛刺现象且噪声较多.而图2(c)和图2(d)中,目标和边缘区域清晰,噪声较少.

2.2 主要参数设置

MSSTO的尺度数*i*、系数 α 和 β 、NSCT的分解级数将影响融合图像的效果.为了简单起见,MSSTO变换中尺度数*i*的范围为[3,5],系数 α 和 β 的取值范围参考文献[15].按照文献[15]的参数设置,当 $\alpha = \beta = 3$ 时,本文获得的图像融合效果最好.

3 实验结果与讨论

3.1 实验设置

实验选用“Quad”和“Uncamp”两对图像集来评估所提出的融合算法的性能;并与拉普拉斯金字塔(LP)算法^[17]、DWT算法^[18]、SIDWT算法^[10]、形态学顶帽变换(TH)算法^[19]、NSCT算法^[18]、MSSTO算法^[15]进行对比,实验结果见图3和图4.其中:DWT和NSCT算法为文献[18]提供的源代码,DWT法的分解级数为2,NSCT法的方向滤波器选为“vk”,多尺度滤波器选择为“pyrexc”,分解级数设置为:1、3、3. DWT法和NSCT法的低频系数融合采用加权平均法,高频系数采用系数绝对值取大的方法,TH变换法和MSSTO法的参数设置分别与文献[19]和[15]相同.

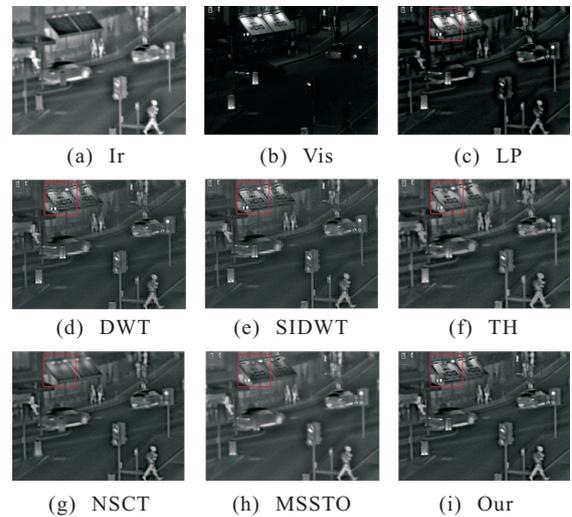


图3 第1组数据集的实验对比结果

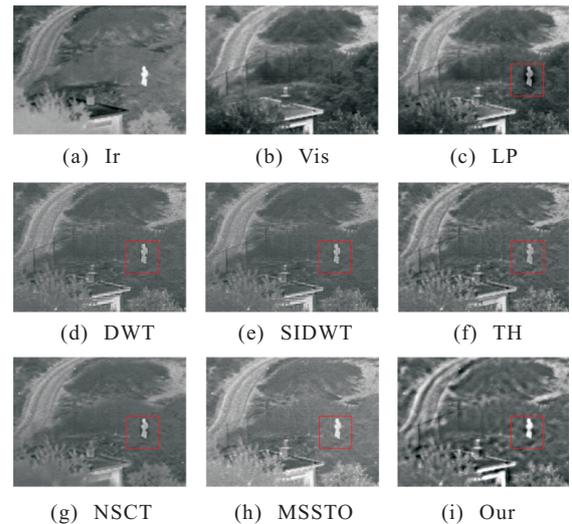


图4 第2组数据集的实验对比结果

3.2 主观性能评价

图3和图4给出了两组图像融合的对比如实验结果,在这些图像中,图(a)和图(b)分别为原始Ir和Vis图像,图(c)~图(i)为以上提到的基于7种不同融合算

法得到的结果,其中包括本文推荐的算法。

图3是“Quad”图像集对比实验结果,很明显,Vis图像能够很好地描述环境信息,而Ir图像能够突出目标信息.正如所看到的,所有方法保留了主要信息和原图像的特性,但是重要的信息仍存在于细节当中.例如:图3(c)~图3(e)在目标区域的周围存在块振铃效应,且目标区域对比度较低;图3(f)目标区域的对比度有所提高,与图3(c)~图3(e)相比,目标区域的周围相对平滑;图3(g)相比于图3(f)融合图像的对比度有所提高,但是目标信息有所丢失;图3(h)与图3(g)相比,融合图像的对比度边缘保持性都有所提高,但是融合图像边缘出现失真现象;从图3(i)可以看出,采用所推荐的方法获得的融合图像在目标区域的区分、图像的对比度和图像的边缘细节保持等方面都优于对比算法.图4的实验结果同样表明了本文算法的优越性.

为了进一步证明融合效果的有效性,以图3中方框标记的区域为例,并对标记的显著性区域进行了局部放大,如图5所示.通过对比可以看出:图5(a)~图5(c)的块振铃效应很明显;而图5(d)的目标区域相对平滑;图5(e)的标记区域变得模糊,丢失了有用信息;图5(f)的区域存在失真现象;而本文方法图5(g)的图像清晰,对比度高,从而验证了本文算法的优越性.

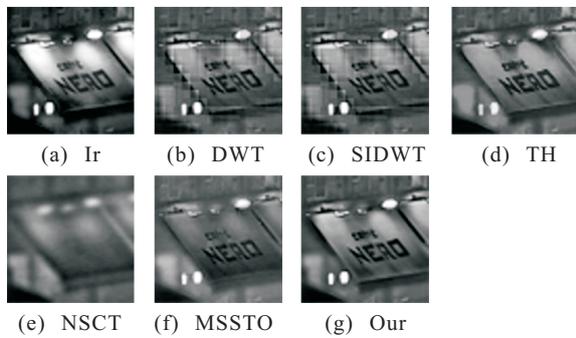


图5 局部放大效果

3.3 客观性能评价

为了客观地评价融合性能,本文采用信息熵(IE)^[20]、平均梯度(AG)^[19]、 Q_0 ^[21]和 $Q^{AB/F}$ ^[22]这4种客观评估标准来评价融合的有效性,这4种评估标准的定义式给出如下.

1) IE指标^[20].

IE能够有效地测量图像中包含信息量的多少,其定义式为

$$E = - \sum_{l=0}^{L-1} p_l \log_2 p_l. \quad (24)$$

其中: p_l 表示图像 I 中灰度级为 l 对应的概率,可将其定义为 $p_l = b_l/b$, b_l 表示灰度级为 l 的像素个数, b 表

示图像 I 中的像素总数; L 为图像 I 中最大的灰度值,其值越大,表明融合图像中包含的信息量越丰富.

2) AG指标^[19].

AG常用来测量融合图像的清晰程度,其定义式为

$$AG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \sqrt{((C)^2 + (D)^2)/2}, \quad (25)$$

$$C = I(x, y) - I(x-1, y), \quad (26)$$

$$D = I(x, y) - I(x, y-1). \quad (27)$$

图像AG的值越大,表明融合图像区域越清晰.

3) Q_0 指标^[21].

$Q_0(A, F)$ 是测量图像 A 与融合图像 F 之间的结构相似度程度,其表达式为

$$Q_0(A, F) = \frac{\delta_{af}}{\delta_a \delta_f} \times \frac{2\bar{a}\bar{f}}{\bar{a}^2 + \bar{f}^2} \times \frac{2\delta_a \delta_f}{\delta_a^2 + \delta_f^2}. \quad (28)$$

其中: δ_{af} 表示图像 A 与图像 F 之间的协方差; δ_a 和 δ_f 为标准偏差; \bar{a} 、 \bar{f} 表示均值; $Q_0(A, F)$ 的值在 $[0, 1]$ 之间,同理可得 $Q_0(B, F)$.由 $Q_0(A, F)$ 和 $Q_0(B, F)$ 可以求出

$$Q_0(A, B, F) = (Q_0(A, F) + Q_0(B, F))/2. \quad (29)$$

融合图像的 Q_0 值越接近1,融合图像的失真度越小.

4) $Q^{AB/F}$ 指标^[22].

$Q^{AB/F}$ 用来测量从原图像转移到融合图像边缘信息保留量的多少,其定义的数学表达式为

$$Q^{AB/F} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (Q^{AF}(n, m)w^A(n, m) + Q^{BF}(n, m)w^B(n, m))}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (w^A(i, j) + w^B(i, j))}. \quad (30)$$

其中: $Q^{AF}(n, m)$ 和 $Q^{BF}(n, m)$ 分别表示融合图像 F 与原图像 A 和 B 的边缘保留值; $w^A(i, j)$ 和 $w^B(i, j)$ 为边缘强度函数; $Q^{AB/F} \in [0, 1]$,其值越接近于1,表明融合图像的边缘保持能力越好.

表1和表2列出了各种算法的客观评价结果.可以看出:本文算法能够得到较高的IE值,说明融合图像从原图像中获取了更多的信息量;本文方法在AG和 $Q^{AB/F}$ 两种指标方面均优于其他方法,表明本文融合图像的对比度和边缘保持能力较好;本文方法的 Q_0 值高于LP、DWT、SIDWT、NSCT和MSSTO算法,略低于TH算法,但其他指标的值都高于对比算

法,这足以证明所提出的融合算法的综合性能是最好的.与上节主观评价结果所给出的结论相一致.

表1 融合结果的客观评价(第1组)

Method	Metrics			
	IE	AG	Q_0	$Q^{AB/F}$
LP	5.813 2	5.686 0	0.258 0	0.529 1
DWT	6.087 1	4.330 2	0.369 4	0.449 1
SIDWT	6.186 5	4.330 2	0.369 4	0.449 1
TH	6.096 5	4.395 6	0.436 5	0.513 2
NSCT	6.144 1	4.524 6	0.378 5	0.505 7
MSSTO	6.201 8	5.675 1	0.403 3	0.577 0
Our	6.234 2	5.785 0	0.413 6	0.600 1

表2 融合结果的客观评价(第2组)

Method	Metrics			
	IE	AG	Q_0	$Q^{AB/F}$
LP	6.559 6	5.896 3	0.494 0	0.500 5
DWT	6.356 2	4.202 8	0.461 1	0.408 3
SIDWT	6.356 2	6.202 8	0.464 1	0.432 8
TH	6.346 8	4.808 4	0.567 9	0.419 4
NSCT	6.323 5	4.978 3	0.475 3	0.425 0
MSSTO	6.657 0	6.336 4	0.501 6	0.438 4
Our	6.758 3	6.355 8	0.502 2	0.465 1

4 结 论

本文提出了一种基于MSSTO和NSCT的Ir与Vis图像增强融合算法.一方面,在设计低频系数的融合方案时,采用MSSTO变换,通过像素值取大的方法从低频子带系数中提取出明、暗的显著细节特征,它能有效地改善融合算法的对比度.另一方面,在选取高频系数时,采用LFSW与局部能量取大策略来选取高频融合系数,使得融合图像能够包含更丰富的细节信息.为了验证所提出方法的有效性,采用两组不同场景的Ir与Vis图像进行实验;并利用4种图像融合标准进行融合图像的客观评价.实验结果表明,所提出的方法在边缘保留和提高图像对比度方面均优于其他方法,且与主观检测得出的结论相一致.

参考文献(References)

[1] Adu J, Gan J, Wang Y, et al. Image fusion based on nonsubsampling contourlet transform for infrared and visible light image[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 61(11): 94-100.

[2] Kong W, Zhang L, Lei Y. Novel fusion method for visible light and infrared images based on NSST-SF-PCNN[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 65(7): 103-112.

[3] Zhao J, Zhou Q, Chen Y, et al. Fusion of visible and infrared images using saliency analysis and detail preserving based image decomposition[J]. *Infrared physics & Technology*, 2013, 56(1): 93-99.

[4] Bai X, Zhou F, Xue B. Fusion of infrared and visual images through region extraction by using multi scale center-surround top-hat transform[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8444-8457.

[5] Toet A. Image fusion by a ratio of low-pass pyramid[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1989, 9(4): 245-253.

[6] Toet A, Van Ruyven L J, Valetton J M. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(7): 289-292.

[7] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Trans on Communications*, 1983, 31(4): 532-540.

[8] Li S, Kwok J T, Wang Y. Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images[J]. *Information Fusion*, 2002, 3(1): 17-23.

[9] Pu T, Ni G. Contrast-based image fusion using the discrete wavelet transform[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(8): 2075-2082.

[10] Ioannidou S, Karathanassi V. Investigation of the dual-tree complex and shift-invariant discrete wavelet transforms on Quickbird image fusion[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 166-170.

[11] Do M N, Vetterli M. The finite ridgelet transform for image representation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2003, 12(1): 16-28.

[12] Li H, Guo L, Liu K. Remote sensing image fusion based on curvelet transform[J]. *J of Optoelectronics Laser*, 2008, 19(3): 400-411.

[13] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.

[14] Da Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design, and applications[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.

[15] Bai X. Infrared and visual image fusion through feature extraction by morphological sequential toggle operator[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 71(7): 77-86.

[16] Chen Y, Sang N. Attention-based hierarchical fusion of visible and infrared images[J]. *Int J for Light and Electron Optics*, 2015, 126(23): 4243-4248.

[22] Bulanon D M, Burks T F, Alchanatis V. Image fusion of visible and thermal images for fruit detection[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 12-22.

[22] Liu Y, Liu S, Wang Z. A general framework for image fusion based on multi-scale transform and sparse representation[J]. *Information Fusion*, 2015, 24(7): 147-164.

[22] Bai X, Chen X, Zhou F, et al. Multiscale top-hat selection transform based infrared and visual image fusion with emphasis on extracting regions of interest[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60(9): 81-93.

[22] Chen Y, Xue Z, Blum R S. Theoretical analysis of an information-based quality measure for image fusion[J]. *Information Fusion*, 2008, 9(2): 161-175.

[22] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index[J]. *Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81-84.

[22] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 308-309.