

基于 NSST 和 SWT 的红外与可见光图像融合算法研究

孔玲君^{1,2}, 张志华¹, 曾茜¹, 王茜¹

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

摘要: **目的** 鉴于非下采样剪切波变换 NSST 的红外与可见光图像融合的结果存在细微特征缺失问题, 提出一种基于 NSST 和 SWT 的红外与可见光图像融合算法, 以提升融合图像的质量。 **方法** 首先分别对红外与可见光图像进行 NSST 分解, 各得到一个低频系数和多个不同方向、尺度的高频系数。然后低频系数分别通过 SWT 分解得到新的低频系数和高频系数, 通过 SWT 分解得到的新的低频系数和高频系数分别采用线性加权平均法和区域平均能量取大的融合策略, 融合结果再进行 SWT 逆变换得到低频系数融合结果。高频系数采用区域平均能量取大的融合策略进行融合。最后通过 NSST 逆变换得到最终的融合图像。 **结果** 通过仿真实验结果表明, 文中算法与 NSST, SWT 和 NSCT 等算法相比, 融合图像在主观视觉上的红外目标更突出, 图像细节更清晰, 且在 IE, AG, $Q^{AB/F}$, SF 和 SD 等评价指标上也最优。 **结论** 文中算法的融合结果能更好地表现源图像的目标信息和细节纹理信息, 表明该算法具有优越性。

关键词: 图像融合; 红外图像; 可见光图像; 平稳小波变换; 非下采样剪切波变换

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0216-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.037

Infrared and Visible Image Fusion Algorithm Based on NSST and SWT

KONG Ling-jun^{1,2}, ZHANG Zhi-hua¹, ZENG Xi¹, WANG Qian¹

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a method of infrared and visible image fusion based on NSST and SWT for the missing of fine features in the fusion results of infrared and visible images based on NSST, so as to improve the quality of fused image. Firstly, the infrared and visible images were decomposed by NSST to obtain a low frequency coefficient and multiple high frequency coefficients in different directions and scales, respectively. Then the two low frequency coefficients were decomposed by SWT to obtain the new low frequency coefficients and the high frequency coefficients respectively. The new low frequency coefficient and high frequency coefficient obtained by SWT decomposition separately adopted the linear weighted average method and the region average energy to increase the fusion strategy. The fusion result of low frequency coefficient was obtained by SWT inverse transform, and the high frequency coefficient was fused by the fusion strategy with large region average energy. Finally, the final fusion image was obtained by NSST inverse transform. The simulation fusion results showed that the proposed algorithm was more obvious in visual infrared target and clearer in detail and was also the best in evaluation index such as IE, AG, $Q^{AB/F}$, SF and SD, when compared with NSST, SWT, NSCT, et al. The fusion result of this algorithm can better express the target information and the detailed texture information of the source images, so this algorithm has the superiority.

KEY WORDS: image fusion; infrared image; visible image; stationary wavelet transform; NSST

收稿日期: 2018-04-24

基金项目: 柔版印刷绿色制版与标准化实验室资助项目 (ZBKT201706)

作者简介: 孔玲君 (1972—), 女, 博士, 上海出版印刷高等专科学校教授, 主要研究方向为图文信息处理与色彩再现、数字印刷及质量评价等。

在数字图像处理和机器视觉领域,图像融合^[1]就是将多个单一传感器所获取的同一场景或目标的图像,先进行图像配准,再通过图像融合算法,冗余信息去除,互补信息加以综合起来形成一幅融合图像,以便让后续的机器识别更加精准。其中,红外与可见光图像融合^[2]是图像融合领域中的研究重点。红外传感器获取的图像场景提供丰富的热辐射信息,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;可见光传感器能记录场景的更多清晰细节信息,适合人眼视觉观察,但成像质量常受环境条件限制,因此,兼顾融合图像的细节场景清晰度和红外隐藏目标对比度是红外与可见光图像融合中的关键。

现行主流的图像融合算法分为 2 类:第 1 类是基于空间域^[3]的图像融合算法,包括加权平均、主成分分析 (PCA) 和 IHS 等算法,主要是对源图像对应像素点进行线性变换等操作,常用于图像拼接^[4]后的图像融合;第 2 类是基于频率域的图像融合算法,也称多尺度几何分析法^[5],包括金字塔变换 (PT)^[6]、小波变换 (WT)^[7]、小波变换基础上改进的平稳小波变换 (SWT)^[8]、轮廓波变换 (CT)^[9]、剪切波变换 (ST)^[10]和非下采样轮廓波变换 (NSCT)^[11]等算法。目前,红外与可见光图像融合领域一般广泛采用多尺度几何分析法。SWT 作为小波变换的改进型,具备平移不变性,且该算法能够有效地保留图像角点、纹理等信息。SWT 算法只能表达图像的水平、垂直和对角线 3 个方向的细节信息,对图像的连续边缘表达能力较弱,因此当图像具有较复杂的连续曲线和细节信息,SWT 算法表现较差。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 CT 算法中出现的吉布斯 (Gibbs) 效应^[12],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。ST 算法相比 NSCT 具有更多的灵活性和方向数且运行效率更高,但不具备平移不变性。非下采样剪切波变换 (NSST) 是 ST 的改进模型,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边缘,但是对图像细微特征的表达能力尚有欠缺,目前 NSST 算法在图像融合领域的应用仍处于探索起步阶段。

在红外与可见光图像融合中,将 NSST 与 SWT 相结合,利用 NSST 算法表达图像连续曲线和边缘的优越性去弥补 SWT 表达图像连续曲线和边缘的不足,利用 SWT 算法表达图像角点、纹理信息的优势来弥补 NSST 表达图像细微特征缺失的缺点,理论上存在探讨更优算法的可行性。

1 图像融合变换算法

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 $M_{AB}(\psi)$ 见式 (1)。

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

式中: $\psi \in L^2(R^2)$, L 为可积空间; $\det$ 为矩阵的行列式; 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 $\det B=1$; i 和 j 分别为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^[13]。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 (Pseudo-Polar) 映射到笛卡尔坐标系^[14] (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 2 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 个大小相同但是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。图像“Zoneplate”的 NSST 分解实例见图 2, 且仅列出部分高频子带图像和 SF 图像,实例表明 NSST 算法具有图像连续曲线和边缘的优越性能。

1.2 SWT 变换理论

SWT 算法是在小波变换算法的基础上改进得到的, SWT 是去掉了下采样算子的小波变换。在 SWT 多尺度几何分解过程中,图像通过每一层滤波器以后并不进行下采样,而是在进行低通和高通滤波的基础上,对滤波器进行上采样,从而减小低通滤波器频带宽度,降低高通滤波器所对应的频带范围^[15]。SWT 具有平移不变性,结果是图像的 SWT 分解后的低通子带图像和带通子带图像具有和源图像相同的尺寸。图像 F 的 SWT 多尺度几何分解过程见图 3, 其中分解等级为 2, L_i 和 H_i 是 SWT 第 i 级分解时分别用到的低通和高通滤波器, $L_i H_i$, $H_i H_i$ 和 $H_i L_i$ 则表示 SWT 第 i 级分解后得到的 3 个方向的图像子带。

1.3 基于 NSST 和 SWT 相结合的变换理论

结合 NSST 和 SWT 算法各自的优点和不足,通过 NSST 算法多方向性的特点弥补 SWT 只能在 3 个方向上分解的局限, SWT 算法的小波基可以充分表

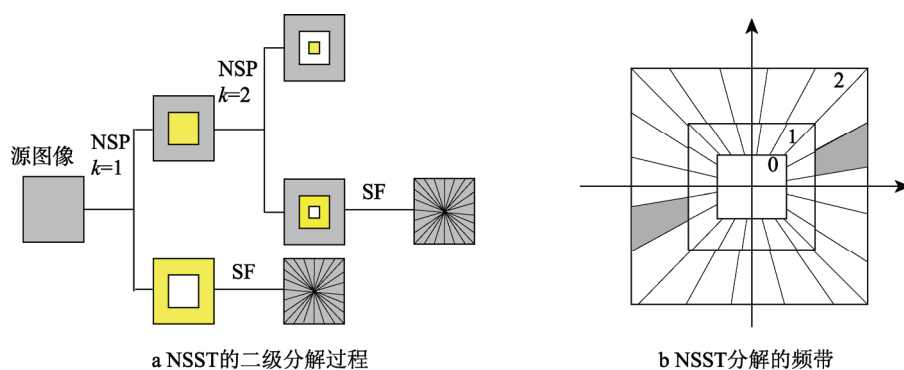


图 1 NSST 多尺度多方向分解过程

Fig.1 Multi-scale and multidirectional decomposition process of NSST

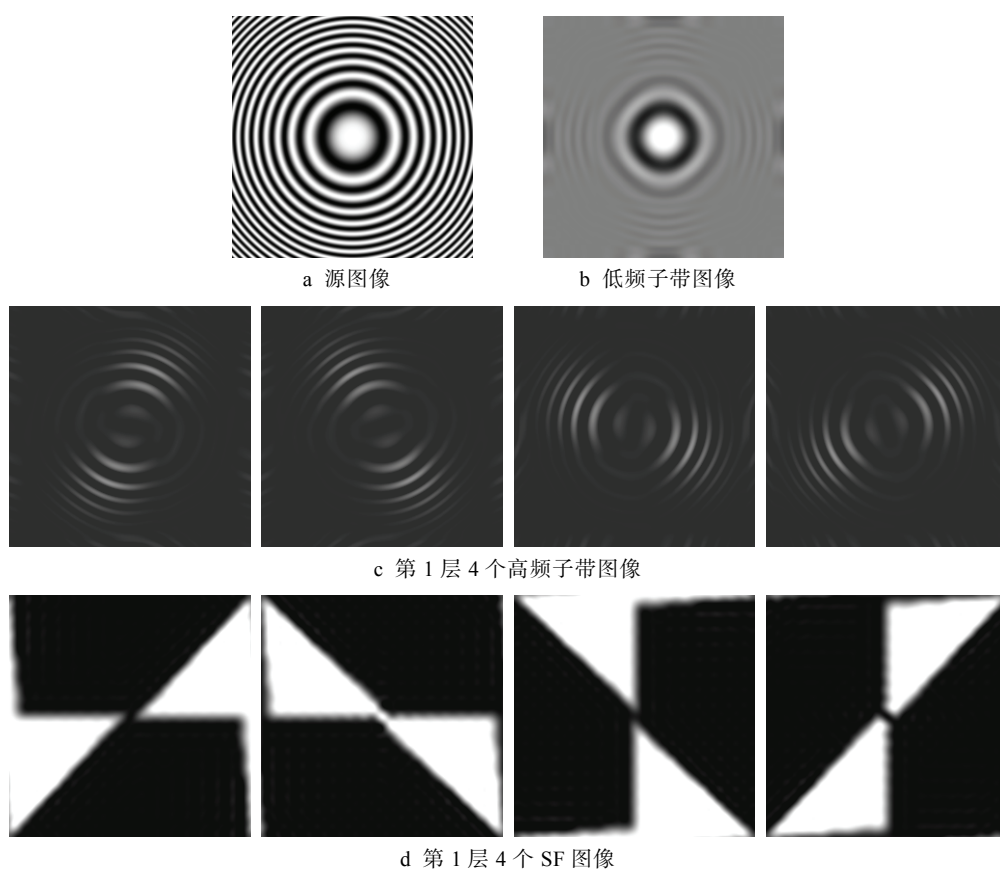


图 2 “Zoneplate”图像的 NSST 多尺度多方向分解

Fig.2 Multi-scale and multidirectional decomposition of "Zoneplate" image by NSST

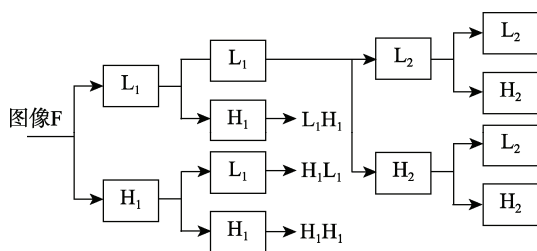


图 3 SWT 多尺度几何分解过程

Fig.3 Multiscale geometric decomposition process by SWT

现图像的纹理细节的特质，再去完善 NSST 算法的图像分解效果，设计了混合 NSST 和 SWT 的图像融合

嵌入算法。基于 NSST 和 SWT 的红外与可见光图像融合框架见图 4。

步骤如下所述。

1) 选取 2 幅相同分辨率的红外图像 I 和可见光图像 V。

2) 对图像 I 和 V 进行 NSST 多尺度多方向分解，得到低频系数 $\{IL, VL\}$ 以及高频系数 $\{IH^{p,q}, VH^{p,q}\}$ 。其中 p 为图像的分解尺度数， q 为在 p 分解尺度下的分解方向数。

3) 通过高频系数融合策略对高频系数 $\{IH^{p,q}, VH^{p,q}\}$ 对进行融合，得到融合结果 $\{FH^{p,q}\}$ 。

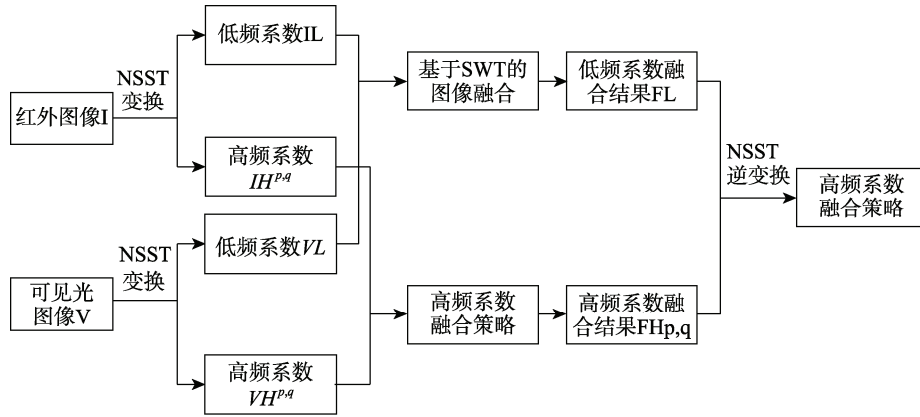


图 4 基于 NSST 和 SWT 红外与图像融合算法框架

Fig.4 Framework of infrared and image fusion algorithm based on NSST and SWT

4) 对步骤 2) 中 NSST 分解得到的低频系数 $\{IL, VL\}$ 再进行 SWT 分解, 得到新的低频系数和高频系数。其中 SWT 变换过程中需选定小波基和分解层数。

5) 再选取低频融合策略和高频融合策略对 SWT 分解得到的低频系数和高频系数进行融合, 然后利用 SWT 逆变换, 得到融合结果 $\{FL\}$ 。

6) 将步骤 3) 得到的高频融合系数 $\{FH^{p,q}\}$ 和步骤 5) 得到的低频融合系数 $\{FL\}$ 进行 NSST 逆变换, 得到融合图像 F 。

2 融合图像质量评价方案

融合图像质量评价包括定性分析的主观评价法^[16]和定量计算的客观评价法^[17]。主观评价没有统一的标准, 但结合待融合红外与可见光图像对象, 红外图像的隐藏目标和轮廓特征提取和可见光清晰细节场景的再现是关键, 依赖人眼的细心观察。主观观察易受图像复杂度等因素影响, 存在局限性, 利用融合图像的客观评价计算指标更具有说服力。针对红外与可见光图像融合特性, 文中选用体现融合图像自身特性的 IE, AG, SF, SD 和体现源图像与融合图像关系的 $Q^{AB/F}$ 等 5 个指标对融合图像进行质量评价。式 (2—6) 中, I, V 表示待融合的红外与可见光图像, F 表示融合图像, i, j 分别为 $m \times n$ 的图像二维矩阵的第 i 行, 第 j 列。

1) 信息熵 (IE), 是从信息论的角度反映影像信息丰富程度的一种方法, 表示图像所携带信息量的大小。计算见式 (2), 其中 L 为图像总的灰度级数, P_k 为灰度值为 k 的像素数与图像总像素数的比值^[15]。

$$A_{IE} = - \sum_{k=0}^{L-1} P_k \log P_k \quad (2)$$

(2) 平均梯度 (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。计算见式 (2)。

$$B_{AG} = \frac{\left[\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-2} |F(i+1, j) - F(i, j)| \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=0}^{n-1} |F(i, j+1) - F(i, j)| \right]^2 }{(m-1) \times n} \quad (3)$$

3) 边缘信息保留量 ($Q^{AB/F}$), 评价从源图像传递到融合图像的边缘信息量指标。计算公式见式 (4)。其中 ψ^I 和 ψ^V 是与局部感知因子相关的权值。

$$Q^{IV/F} = \frac{\sum_{i,j} Q_{i,j}^{IF} \psi_{i,j}^I + Q_{i,j}^{VF} \psi_{i,j}^V}{\sum_{i,j} \psi_{i,j}^I + \psi_{i,j}^V} \quad (4)$$

4) 空间频率 (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。计算见式 (5)。

$$C_{SF} = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |F(i, j) - F(i, j-1)| \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n |F(i, j) - F(i-1, j)| \right]^2 }{m \times n} \quad (5)$$

5) 标准差 (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。计算见式 (6)。

$$D_{SD} = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (F(i, j) - \bar{F}(i, j))^2} \quad (6)$$

3 仿真实验与结果分析

3.1 图像融合实验准备

文中从红外与可见光图像融合经典图像库选取实验素材, 由于 SWT 本身算法特性对源图像尺寸的限制, $m \times n$ 个像素的源图像的二维矩阵, m 和 n 都必须为 4 的整数。选取 2 组分别是 360×272 像素的“UN

Camp”和 632×496 像素的“Bristol Queen's Road”红外与可见光图像。

为了探究混合 NSST 与 SWT 的算法能否优于仅基于 NSST 的红外与可见光图像融合算法和仅基于 SWT 的红外与可见光图像融合算法,文中将对混合 NSST 和 SWT 的算法(以下简称 NSST+SWT 算法)与 NSST 算法、SWT 算法进行对比,同时加入一种主流算法 NSCT 进行对比。为了保证算法对比的有效性,所有算法在图像融合过程中均采用相同的低频系数融合策略以及同样的高频系数融合策略。低频系数代表图像的背景信号强度,高频系数反映了图像边缘和轮廓。在所有算法融合策略选择上,所有的低频系数融合采用广泛使用的线性加权平均法,所有的高频系数融合采用广泛使用的区域平均能量取大法。

区域平均能量见式(7), $E_A(x,y)$ 表示图像 A 以 (x,y) 像素为中心领域窗口 $(2s+1) \times (2s+1)$ 区域内的平均能量,文中选取 3×3 的邻域大小。

$$E_A(x,y) = \frac{1}{(2s+1)^2} \sum_{i=-s}^s \sum_{j=-s}^s A(x+i,y+j)^2 \quad (7)$$

所有算法参数作如下选择: SWT 算法采用 3 级小波分解,小波基选择“haar”。NSST 算法的 NSP 分解级数是 3, NSP 选用“maxflat”, SF 方向数值设置为(4, 8, 8)。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。

文中所有算法运行均在处理器品牌为 Intel 酷睿 i5 二代、主频 2.5 GHz、内存 8 GB、Matlab R2016b 的实验平台上完成。

3.2 实验结果与分析

经过仿真实验,“UN Camp”红外与可见光图像及 4 种融合算法的融合结果见图 5, IE, AG 等 5 种客观评价指标数据近表 1。“Bristol Queen's Road”红外与可见光图像及 4 种融合算法的融合结果见图 6, IE,

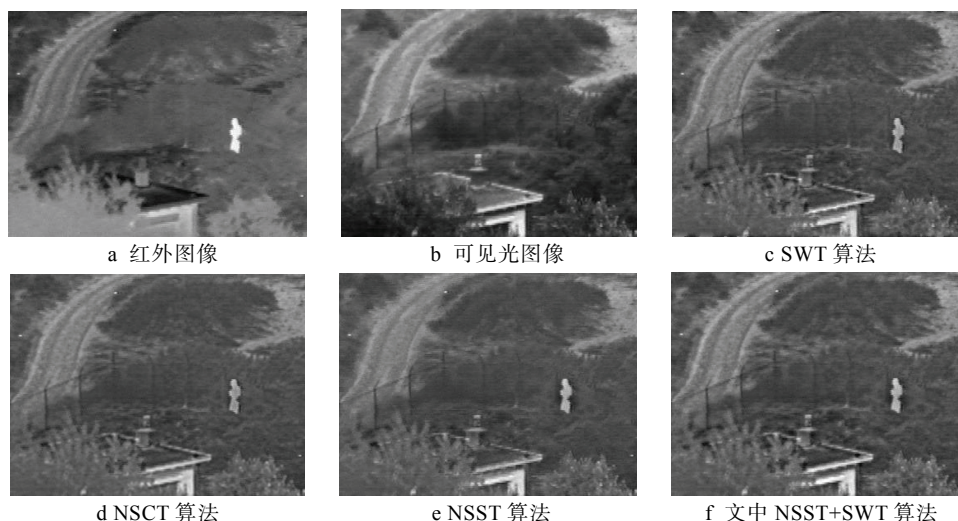


图 5 “UN Camp” 图和各算法的融合结果

Fig.5 Image “UN Camp” and fusion result of each algorithm

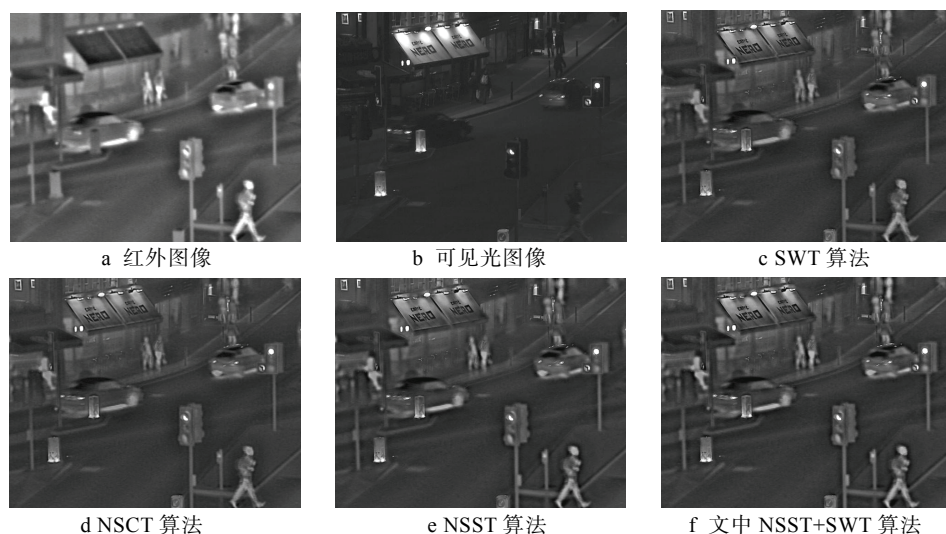


图 6 “Bristol Queen's Road” 图和各算法的融合结果

Fig.6 Image “Bristol Queen's Road” and fusion result of each algorithm

AG 等 5 种客观评价指标数据见表 2。 t 为各算法在实验平台上的运行时间。

从图 5“UN Camp”和图 6 中“Bristol Queen’s Road”的图像融合结果的直观视觉效果看，4 种算法均能实现红外与可见光图像的有效融合，红外图像的隐藏目标信息和可见光图像的细节信息都得到了综合，但效果差异明显。图 5c 和图 5d 融合图像中灌木丛与人之间灰度对比度明显低于图 5e 和图 5f，而图 5d 和图 5e 融合图像中营地周围树木轮廓过于平滑，清晰度明显低于图 5f。图 6c 和图 6d 融合图像中右上角的 3 个人物与街道的灰度对比度较图 6e 和图 6f 低，所有融合图像中商店广告牌上的英文字母，图 6f 比图 6c, d, e 得到更高对比度且更清晰。综合得知，图 6f 融合图像最大保留红外的隐藏目标信息和可见光图像细节信息，不但红外目标信息对比度最高，而且细节清晰度最高。直观视觉效果评价得出 NSST+SWT 算法的融合结果给人最好的直观视觉感受。

结合表 1 和表 2 的融合效果客观评价数据，表明图像融合质量优劣：NSST+SWT>NSST>SWT>

NSCT；各算法运行效率快慢：SWT>NSST> NSST+SWT>NSCT。从表 1 的客观评价数据可以得出，基于 NSST+SWT 的算法相比于 NSST 算法，在 IE, AG, $Q^{AB/F}$, SF 和 SD 上分别提升 2.57%, 6.67%, 11.58%, 6.87%和 2.20%，且基于 NSST+SWT 的算法相比于罗杰等^[18]提出的 NSST 与联合稀疏表示的融合算法的融合结果在 IE, AG 和 SD 上分别提升 3.62%, 47.5%和 8.19%。表 2 的客观评价数据得出基于 NSST 和 SWT 的红外与可见光图像融合算法比仅 NSST 在 IE, AG, $Q^{AB/F}$, SF 和 SD 上分别提升 2.46%, 6.36%, 4.68%, 6.63%和 4.17%，因此无论是表 1 还是表 2 的客观评价数据都能得出，文中 NSST+SWT 的红外与可见光图像融合算法同其他几种方法的融合图像对比，融合结果拥有更丰富的信息量、更明显的图像细节反差、最大化的源图像边缘信息保留量、更高的图像清晰度和图像融合质量。尽管 NSST+SWT 的融合算法在 5 项评价指标的提升都不多，但综合起来，最终融合结果还是有质的提升。由于 NSST+SWT 算法结构复杂度的因素，算法运行时间较长，在 4 种算法中运行效率排第 3，算法运行效率偏低。

表 1 “UN Camp” 融合结果客观质量评价
Tab.1 Objective quality evaluation of "UN Camp" fusion results

算法	IE	AG	$Q^{AB/F}$	SF	SD	t/s
SWT	6.4816	5.4439	0.4701	10.6618	25.9519	17.9157
NSCT	6.3788	4.7055	0.4281	9.1817	24.4633	102.8377
NSST	6.5140	5.3269	0.4274	10.8015	26.5989	47.3857
NSST+SWT	6.6814	5.6820	0.4769	11.5476	27.1828	58.1743
文献[15]	6.4462	3.8520			25.1232	

表 2 “Bristol Queen's Road” 融合结果客观质量评价
Tab.2 Objective quality evaluation of "Bristol Queen's Road" fusion results

算法	IE	AG	$Q^{AB/F}$	SF	SD	t/s
SWT	6.0864	4.1844	0.5720	12.2618	24.2289	45.1168
NSCT	5.9941	3.7413	0.5049	10.1382	22.1382	304.2692
NSST	6.1288	4.2153	0.5486	12.4086	24.9255	120.6846
NSST+SWT	6.2798	4.4834	0.5743	12.9836	25.9647	147.3417

通过 2 个实例，对各算法进行的仿真实验，结果表明，结合 NSST 和 SWT 的红外与可见光图像融合算法使得融合图像获得了最多的信息量、最大的对比度和最高的清晰度，融合图像质量最佳，优于 NSST, SWT 和 NSCT 等算法，但算法运行时间较长，算法运行效率较低。

4 结语

文中充分利用了 NSST 算法表达图像连续曲线的优势和 SWT 表达图像细节强的特点，提出一种基于 NSST 和 SWT 相结合的红外与可见光图像融合算

法，在采用线性加权平均的低频系数融合策略和区域平均能量取大的高频系数融合策略下，融合图像红外目标突出，背景细节清晰，优于其他常规算法，该算法是一套有效的针对红外与可见光图像融合的方案。采用不同的低频系数融合策略和高频系数融合策略去完善文中算法性能，以及如何降低算法运行效率是下一步的工作。

参考文献：

[1] JING Zhao, LI Hai-yun. An Image Fusion Algorithm Based on Multi-resolution Decomposition for Func-

- tional Magnetic Resonance Images[J]. Neuroscience Letters, 2011, 487(5): 74—77.
- [2] MA J, CHEN C, LI C, et al. Infrared and Visible Image Fusion via Gradient Transfer and Total Variation Minimization[J]. Information Fusion, 2016, 31(C): 100—109.
- [3] 孙永明, 吴谨, 刘劲, 等. 基于 DWT 的高频系数压缩感知图像融合[J]. 红外技术, 2014(9): 714—718.
SUN Yong-ming, WU Jin, LIU Jing, et al. High Frequency Coefficient Compression Perceptual Image Fusion Based on DWT[J]. Infrared Technology, 2014(9): 714—718.
- [4] 张志华, 孔玲君, 王勇, 等. 一种新的彩色图像碎片全自动拼接算法[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 206—209.
ZHANG Zhi-hua, KONG Ling-jun, WANG Yong, et al. A Novel Algorithm of Debris Automatically Splicing for Color Images[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(17): 206—209.
- [5] 邢笑雪. 基于 NSST 的图像融合算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
XING Xiao-xue. Research on Image Fusion Algorithm Based on NSST[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [6] 韩潇, 彭力. 基于改进拉普拉斯金字塔的图像融合方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(5): 191—194.
HAN Xiao, PENG Li. Image Fusion Method Based on Improved Laplacian Pyramid[J]. Automation & Instrumentation, 2014(5): 191—194.
- [7] 叶明, 唐敦兵. 区域清晰度的小波变换图像融合算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1328—1333.
YE Ming, TANG Dun-bing. Research on Image Fusion Algorithm Based on Wavelet Transform for Region Sharpness[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(9): 1328—1333.
- [8] DENG Y, LI C, ZHANG Z, et al. Image Fusion Method for Infrared and Visible Light Images Based on SWT and Regional Gradient[C]// IEEE, Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, 2017: 976—979.
- [9] SHAHDOOSTI H R, HAZAVEI S M. Image Denoising in Dual Contourlet Domain Using Hidden Markov Tree Models[J]. Digital Signal Processing, 2017, 67: 17—29.
- [10] LUO X, ZHANG Z, WU X. A Novel Algorithm of Remote Sensing Image Fusion Based on Shift-invariant Shearlet Transform and Regional Selection[J]. AEUE-International Journal of Electronics and Communications, 2016, 70(2): 186—197.
- [11] WANG J, LAI S, LI M. Improved Image Fusion Method Based on NSCT and Accelerated NMF[J]. Sensors, 2012, 12(5): 5872—5887.
- [12] 孔韦韦, 雷英杰. 基于 NSST 域人眼视觉特性的图像融合方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(6): 777—782.
KONG Wei-wei, LEI Ying-jie. Technique for Image Fusion Based on NSST Domain and Human Visual Characteristics[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(6): 777—782.
- [13] 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.
- [14] 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 Sinica, 2017, 45(12): 2965—2970.
- [15] NAGARJUNA P, TYAG D, RAMACHANDRA R. SWT and Spread Spectrum Coding Based Copyright Protection Technique for Digital Images[C]// International Conference, 2017: 58—63.
- [16] 刘健, 雷英杰, 邢雅琼, 等. 基于改进型 NSST 变换的图像融合方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 275—280.
LIU Jian, LEI Ying-jie, XING Ya-qiong, et al. Image Fusion Method Based on Improved NSST Transform[J]. Control and Decision, 2017, 32(2): 275—280.
- [17] 刘健, 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, 31(3): 453—457.
LIU Jian, LEI Ying-jie, XING Ya-qiong, et al. SAR and Gray Visible Image Fusion Based on Hidden Markov Tree Model in NSST Domain [J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 453—457.
- [18] 罗杰, 孔韦韦. 基于 NSST 和联合稀疏表示的红外与可见光图像融合算法[J]. 电子世界, 2016(12): 62—63.
LUO Jie, KONG Wei-wei. Infrared and Visible Image Fusion Algorithm Based on NSST and Joint Sparse Representation[J]. Electronics World, 2016(12): 62—64.