

非采样轮廓波变换下的红外与可见光图像融合

王奎, 李卫华, 李小春

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对红外与可见光图像融合存在的边缘模糊、视觉效果不佳的问题,提出了一种改进的基于非下采样轮廓波变换(NSCT)的红外和可见光图像融合方法。首先采用NSCT对红外与可见光图像进行多尺度、多方向分解,然后对低频系数采用基于边缘的方法进行融合;对高频系数采用基于区域能量的方法进行融合。最后,通过NSCT反变换来获取融合图像。实验结果表明:文中改进算法得到的融合图像不仅边缘等细节部分更加清晰,而且在视觉效果上更加符合人眼视觉特性。

关键词 图像融合;非下采样 Contourlet 变换;红外图像;可见光图像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.012

中图分类号 TP391.41 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0055-05

Infrared and Visible Image Fusion Based on NSCT

WANG Kui, LI Weihua, LI Xiaochun

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at the problems that the edge is fuzzy and the visual effect is poor during the fusion of the infrared and visible images, a fusion algorithm based on NSCT is proposed. NSCT has shift-invariance and a good direction selection, only thus can the algorithm fully capture the contour and more details of the image. Firstly, the NSCT is used to take multi-scale, multi-direction decomposition for the infrared and visible image, and then the edges of the low frequency image is extracted by using the isotropic Soble gradient operator, and fused the low frequency coefficients by edge information to attain the low frequency fusion image. Meanwhile, the high frequency coefficients are fused by region energy to attain the high frequency fusion image. Finally, the fusion image is reconstructed by performing the inverse NSCT on the low frequency fusion image and the high frequency fusion image. The simulation experiments according to both the subjective and objective criteria, including the information entropy, space frequency and average gradient, show that the algorithm can get a good fusion image with more clearly details such as edges. Besides, the fusion image is more conform to the requirements of human vision.

Key words: image fusion; non-sub sampled contourlet transform; infrared image; visible image

图像融合是对包含同一个场景的 2 幅或 2 幅以上图像中重要的有用信息加以综合,高效地利用待

收稿日期:2015-05-05

基金项目:中国博士后基金资助项目(CEMEE2014K00348)

作者简介:王奎(1990—),男,河南漯河人,硕士生,主要从事图像融合研究.E-mail:kgddy2013@163.com

引用格式:王奎,李卫华,李小春.非采样轮廓波变换下的红外与可见光图像融合[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):55-59. WANG Kui, LI Weihua, LI Xiaochun. Infrared and Visible Image Fusion Based on NSCT[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 55-59.

融合图像间的互补信息来获取一幅新的对研究对象描述更精准、更详细、更可靠的融合图像的技术^[1]。图像融合技术广泛应用于安全监控、医疗卫生、遥感探测、航空航天等领域^[2]。

近年来,随着多尺度几何分析工具,如 Wavelet、Curvelet、Contourlet、Shearlet 等的快速发展以及在高维信号处理方面的广泛应用,极大地促进了图像融合的研究与发展。然而,大部分图像融合算法只是对低频系数进行简单的取平均值处理,该方法计算量小,速度快,但是容易造成融合图像的对比度^[3]下降,而且没有考虑图像的边缘信息,容易造成边缘模糊,降低融合图像质量。同时,在高频系数融合规则的选取上,通常采用的“绝对值取大法”虽然能够极大程度地保留源图像中的清晰部分但是不具有鲁棒性,而且没有考虑人眼视觉系统的区域敏感性,得到的融合图像视觉效果不佳。

根据红外图像与可见光图像的成像特点,本文在分析非下采样 Contourlet 变换 NSCT(Nonsub-sampled Contourlet Transform, NSCT)^[4]的基础上,针对红外与可见光图像融合过程中容易引起边缘轮廓模糊,融合图像视觉效果不佳等问题,提出了基于边缘信息和区域能量的 NSCT 融合算法^[5]。

1 NSCT 的基本原理

2002年, M. N. Do 和 M. Vetterli 提出的 Contourlet 变换是一种有效的二维图像稀疏表示方法^[6]。此外, Contourlet 变换具有比小波变换更好的多方向性,还具有小波变换不具备的高维空间各向异性。Contourlet 变换可以通过塔式方向滤波器组来实现。塔式方向滤波器组是由 1 个拉普拉斯金字塔和 1 组方向滤波器级联构成,二者之间相互独立。待融合图像首先经过塔式滤波器作多尺度分解,在每个尺度上,方向滤波器组将分解后得到的带通信号划分为多个方向子带。Contourlet 变换是先对信号进行采样然后再经过滤波器进行多尺度多方向分解,这使得图像融合过程中容易产生 Pseudo-Gibbs 效应,降低融合图像质量。于是,2006年, L. Da Cunha 等人在 Contourlet 变换的基础上提出了非下采样 Contourlet 变换^[4]。NSCT 取消了多尺度、多方向分解过程中的信号采样环节,使得 NSCT 变换具有平移不变性,有效地消除了 Pseudo-Gibbs 现象。非下采样 Contourlet 变换首先采用非下采样金字塔滤波器(Nonsubsampled Pyramid Filter Banks, NSPFB)对图像进行多尺度分解,然后再采用非下采样方向滤波器组(Nonsubsampled Direc-

tional Filter Banks, NSDFB)对得到的各尺度子带图像进行方向分解^[7],见图 1。

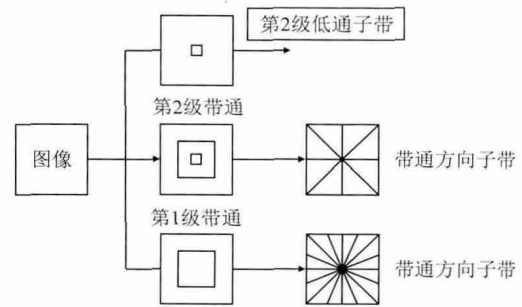


图 1 NSCT 分解示意图

Fig.1 The schematic diagram of NSCT decomposition

图像经 N 级 NSCT 分解后可得到 $1 + \sum_{j=1}^N 2^{l_j}$ 个尺寸大小不变的子带图像,其中 l_j 为尺度 j 下的方向分解级数。

2 基于 NSCT 的图像融合算法

2.1 图像融合算法基本流程

首先,对经过预配准的红外与可见光图像进行 NSCT 变换,得到低频子带图像和高频子带图像。NSCT 不仅具有多分辨率特性,还具有很好的方向选择性以及平移不变性,能够把图像分解到不同尺度下,类似于人类视觉系统的分层次理解。此外,分解系数还具有局部化特征,便于分析源图像的近似信息和细节信息,而且其精确重构能力保证了图像分解过程中没有任何信息损失。因此,选择 NSCT 对红外与可见光图像进行融合,有效地综合了红外图像中准确的人物目标信息和可见光图像中清晰的背景信息,以便可以高效地获取更精准、更可靠的融合图像。尽管非下采样 Contourlet 变换可以很好地对红外与可见光图像进行多尺度几何分析,但是,图像融合规则的选取也对融合图像的质量有着至关重要的影响。为了能得到一幅边缘轮廓细节清晰、视觉效果良好的融合图像,本文对低频子带图像选取基于边缘轮廓信息的规则进行融合,采用基于区域能量^[8]规则对高频子带图像进行融合。基于 NSCT 的图像融合算法的基本流程如下:

步骤 1 对经过严格空间配准的红外与可见光图像分别利用 NSCT 变换进行多尺度、多方向分解,得到低频子带图像和高频子带图像^[2];

步骤 2 选择基于边缘信息的融合规则对低频子带图像进行融合,对高频子带图像采用基于区域能量的融合规则进行融合;

步骤 3 对融合后所得的系数矩阵进行 NSCT 反变换来重构融合图像。

基于 NSCT 的图像融合算法的基本流程见图 2。

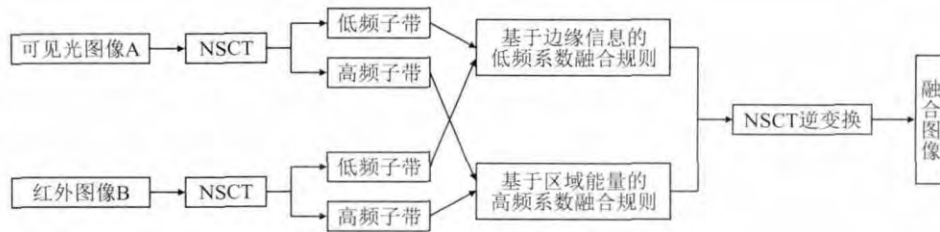


图 2 基于 NSCT 的红外与可见光图像融合算法的基本流程

Fig.2 The basic process of the infrared and visible image fusion algorithm based on NSCT

2.2 图像融合算法规则

本文改进算法选取基于边缘轮廓信息的规则对低频子带图像融合,先对低频部分进行边缘提取操作,然后通过边缘信息来得到融合图像的低频系数;对高频部分,根据人眼视觉系统的区域敏感特性,对高频系数采用基于区域能量的规则进行融合。

图像的低频部分包含了图像的主要能量^[9],在非采样轮廓波变换图像融合算法中,传统的融合策略通常采用“加权平均法”对低频部分进行处理。该方法简单、计算量小、速度快,能够提高融合图像的信噪比,但是削弱了融合图像的对比度,容易引起边缘或纹理局部模糊。而且,可见光图像和红外图像对相同场景的表示差别很大,假如仅仅只是取平均值来处理,将大大削弱可见光图像和红外图像的信息互补特性,使得图像融合变得毫无意义。本文在分析 NSCT 原理的基础上,给出了一种基于图像边缘信息的低频系数融合方法。

本文通过梯度算子来对低频部分进行边缘提取操作。图像 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 处的梯度可以用矢量表示为:

$$\nabla f(x, y) = [G_x, G_y]^T = [\partial f / \partial x + \partial f / \partial y]^T \quad (1)$$

式中: G_x, G_y 分别表示 x 方向, y 方向上的梯度。梯度的幅值和方向角分别为:

$$|\nabla f(x, y)| = [G_x, G_y]^{1/2} = (G_x^2 + G_y^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$j(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (3)$$

为了便于计算,本文采用各向同性 Soble 算子的模板通过卷积运算来得到梯度的近似值。各向同性 Soble 算子的模板由 2 个模板 G_x, G_y 组成,分别对应水平方向和垂直方向的梯度卷积运算。因为各向同性 Sobel 边缘梯度算子计算简单,而且边缘检测效果好,因此本文选择了各向同性 Soble 边缘梯度算子,见图 3。

通过各向同性 Soble 边缘梯度算子对低频子带图像进行边缘提取操作,并将得到的结果与阈值(阈值通常取 0.1~0.5,这里我们取 0.25)比较来确定边缘点。如果待融合图像中相同位置 2 个像素点均为

边缘点,则采用模值较大的低频子带图像来作为融合图像;如果待融合图像中相同位置 2 个像素点只有一个为边缘点,则该低频子带图像即为融合图像;如果待融合图像中相同位置 2 个像素点都不是边缘点,则对 2 个低频子带图像进行取平均值操作来得到融合图像。

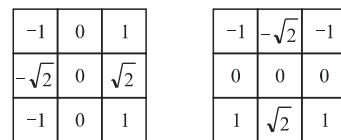


图 3 各向同性 Soble 梯度算子模板

Fig.3 Isotropic Soble gradient operator

高频子带图像含有源图像中大部分的细节信息,在多尺度几何分析图像融合算法中,通常采用“绝对值取大法”对高频子带图像进行处理,该方法十分简便,如果待融合图像中相同位置的目标信息差别很大,而且图像成像过程中干扰较小时,“绝对值取大法”能够最大程度地获取待融合图像中明显的细节信息。但如果待融合图像间目标场景信息比较接近时,该方法就会忽略部分信息,导致融合图像质量下降。此外,人眼视觉系统对区域特征比对单个像素点更为敏感,因此,在本文融合算法中选择区域能量来融合高频子带图像。首先根据式(4)计算 2 幅源图像中各高频子带对应像素点的区域能量:

$$E(x, y) = \sum_{x' \in M, y' \in N} |D(x+x', y+y')|^2 \quad (4)$$

式中: M, N 为局部区域的大小(通常是边长为奇数的正方形区域,例如 $3 \times 3, 5 \times 5$ 等), x', y' 的变化范围在 M, N 内; D 表示 2 幅源图像中各高频子带对应像素点的系数值。

区域匹配度见式(5):

$$M = 2 \frac{\sum_{x' \in M, y' \in N} D_{IR}^{i,k}(x+x', y+y') + D_{VI}^{i,k}(x+x', y+y')}{E_{IR}^{i,k}(x, y) + E_{VI}^{i,k}(x, y)} \quad (5)$$

如果两幅源图像中各高频子带对应像素点的区域匹配度 $< TH$ (TH 为阈值,通常取 0.5~1.0,本文取 0.7),则高频融合系数为:

$$D_{F}^{i,k}(x, y) =$$

$$\begin{cases} D_{IR}^{i,k}(x+x',y+y'), E_{IR}^{i,k}(x,y) \geq E_{VI}^{i,k}(x,y) \\ D_{VI}^{i,k}(x+x',y+y'), E_{IR}^{i,k}(x,y) < E_{VI}^{i,k}(x,y) \end{cases} \quad (6)$$

否则:

$$D_F^{i,k}(x,y) = \begin{cases} \omega_{\max} D_{IR}^{i,k}(x+x',y+y') + \omega_{\min} D_{VI}^{i,k}(x+x',y+y'), \\ \quad E_{IR}^{i,k}(x,y) \geq E_{VI}^{i,k}(x,y) \\ \omega_{\min} D_{IR}^{i,k}(x+x',y+y') + \omega_{\max} D_{VI}^{i,k}(x+x',y+y'), \\ \quad E_{IR}^{i,k}(x,y) < E_{VI}^{i,k}(x,y) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_{\min} = 1/2 - 1/2((1-M)/(1-T))$; $\omega_{\max} = 1 - \omega_{\min}$ 。

3 实验仿真及评估

为了对上述算法进行验证,本文选择采用 MATLAB7.1 对可见光图像和红外图像进行了大量的仿真实验,实验中使用的红外与可见光图像都已经过严格的空配准。本文选取 2 组不同场景且均含有人物目标的红外与可见光图像的融合结果进行分析。图 4、图 5 分别为 2 组红外与可见光图像。通过观察对比 2 组可见光图像和红外图像可明显看出,红外图像中目标人物清晰可见,场景非常模糊,而可见光图像中,由于光线比较暗,无法分辨出行人目标,但是场景信息十分丰富、细节清晰。

为了评估本文融合算法的性能,文中还采用了小波变换(Wavelet Transform, WT)^[9]、拉普拉斯金字塔变换(Laplacian Pyramid, LP)及轮廓波变换(Contourlet Transform, CT)与本文算法进行了对比,并对融合结果进行了主、客观评价分析。在仿真实验中对源图像进行 3 级尺度分解,CT 和本文算法的方向分解数依次为 4, 3, 2。

图 4(a)、图 4(b)、图 5(a)、图 5(b)分别对应第 1 组和第 2 组红外和可见光图像;图 4(c)、图 5(c)为小波变换的融合图像;图 4(d)、图 5(d)为拉普拉斯金字塔变换的融合图像;图 4(e)、图 5(e)为轮廓波变换融合图像;图 4(f)、图 5(f)为本文提出的基于 NSCT 的融合图像。表 1 为采取客观评价指标对 2 组图像融合的评估结果。

可以分别采用主观和客观 2 个方面来对融合图像质量进行评估,主观方面主要是通过人眼视觉观察融合图像的边缘纹理等细节,整体亮度、对比度以及清晰度等。然而,客观评价是对融合图像进行定量分析,本文采用熵(Entropy, E)、空间频率(Space Frequency, SF)、平均梯度(Average Gradient, AG)^[10]来对融合图像进行评价。E 表示图像经过融合之后的信息量,其值越大表示得到的融合图像更全面,经过融合后的图像越可靠;SF 表示像素的

灰度值在空间的变化程度,SF 越大融合图像灰度值变化越大,也就越清晰;AG 表示图像边缘灰度变化率的大小,用来表示图像的清晰度,其值越大表示得到的融合图像越清晰。

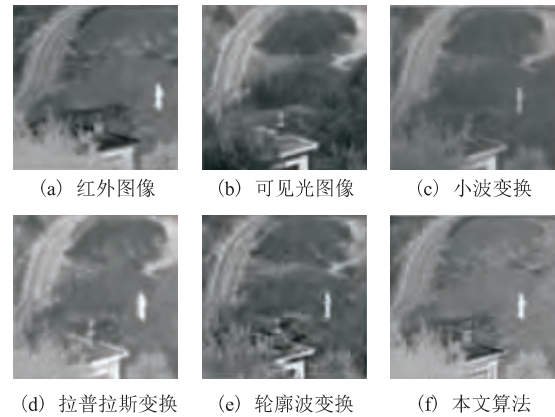


图 4 第 1 组红外与可见光图像融合结果

Fig.4 The first group of image fusion results

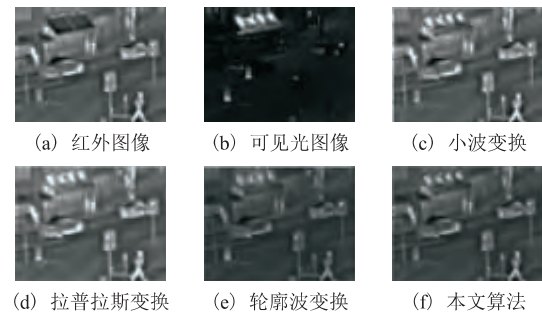


图 5 第 2 组红外与可见光图像融合结果

Fig.5 The second group of image fusion results

从主观角度来评价图像,通过观察仿真结果可以看出,图 4(c)和图 5(c)融合图像对比度明显偏低,融合图像中人物目标不够突出,特别是在图 5(c)中有明显的伪吉布斯现象,这是由于在小波变换不具有平移不变性,而且融合过程中只是采用简单的加权平均和绝对值取大的结果;图 4(d)和图 5(d)融合图像由于拉普拉斯金字塔变换不具有多方向性,导致融合图像边缘模糊;图 4(e)和图 5(e)轮廓波变换融合图像效果明显优于 WT 和 LP,但是细节部分不够清晰;图 4(f)和图 5(f)本文改进算法得到的融合图像在整体亮度和对比度方面效果最好,而且能够很好地捕捉到图像的边缘纹理等细节信息,视觉效果良好。例如,图 4(f)中可以清楚地分辨出人物目标身边的铁丝网,而从图 4(c)、图 4(d)以及图 4(e)中很难发现铁丝网的存在。此外,图 5(f)中的广告牌很清晰,而在 5(c)、图 5(d)和图 5(e)中广告牌的边缘都有不同程度的模糊,特别是 WT 融合图像中,广告牌边缘有明显的“波纹”。从主观人眼视觉角度出发,不难发现,利用文中方法得到的融合图像不仅提高了原图像的清晰度和对比

度,还能够较好地提取可见光图像的纹理信息和红外图像的目标信息,其融合效果明显优于其他几种方法。

表1 融合图像客观评价参数

Tab.1 The evaluation parameters of fused images

图像	方法	E	AG	SF
第1组	WT	6.439 1	0.023 1	6.348 4
	LP	6.554 2	0.031 5	8.678 5
	CT	6.695 2	0.037 1	10.219 1
	本文方法	6.790 8	0.037 9	10.437 8
第2组	WT	5.734 8	0.022 2	7.481 7
	LP	6.213 4	0.031 5	9.132 4
	CT	6.264 2	0.037 1	11.953 6
	本文方法	6.287 9	0.038 8	12.594 7

4 结语

本文在研究非采样轮廓波变换理论的基础上提出了一种图像边缘轮廓信息与区域能量相结合的红外与可见光图像融合算法。NSCT变换具有多尺度、良好的方向选择性、平移不变性等优点,是一种效果很好的图像变换方法;考虑人类视觉系统对于边缘和区域敏感的特性,本文采用基于边缘和区域能量的方法进行融合。通过仿真实验分析,本文提出的融合方法提高了融合图像的整体清晰度,特别是边缘等细节信息的表达能力,而且取得了很好的视觉效果。

参考文献(References):

- [1] 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.
YE Chuanqi. Research on Multi-Sensor Image Fusion Algorithm Based on Multiscale Decomposition[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- [2] 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 Yaqiong, WANG Xiaodan, BI Kai, et al. Fusion Technique for Infrared and Visible Light Images Based on Independent Component Analysis and Non-subsampled Contourlet Transform[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2251-2257. (in Chinese)
- [3] 易正俊,宋瑞晶,李华锋.基于非采样Contourlet变换的图像融合算法[J].信号处理,2010,26(6):875-879.
YI Zhengjun, SONG Ruijing, LI Huafeng. Image Fusion Algorithm Based on Nonsubsampled Contourlet Transform[J]. Signal Processing, 2010, 26(6): 875-879. (in Chinese)
- [4] Da Cunha A L, Zhou J, Do M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [5] 张强,郭宝龙.基于非采样Contourlet变换多传感器图像融合算法[J].自动化学报,2008,34(2):135-141.
ZHANG Qiang, GUO Baolong. Fusion of Multi-sensor Image Based on the Nonsubsampled Contourlet Transform[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(2): 135-141. (in Chinese)
- [6] Do M N, Vetterli M. The Contourlet Transform: An Efficient Directional Multiresolution Image Representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [7] 王跃华,陶忠祥.一种基于NSCT变换的红外与可见光图像融合算[J].光学与光电技术,2012,10(4):81-84.
WANG Yuehua, TAO Zhongxiang. A Kind of Fusion Algorithm for Infrared and Visible Image Based on NSCT[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(4): 81-84. (in Chinese)
- [8] 曹喆.一种区域特性的小波图像融合新算法[J].计算机工程与应用,2011,47(26):213-215.
CAO Zhe. Novel Image Fusion Algorithm Based on Regional Feature with Wavelet[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(26): 213-215. (in Chinese)
- [9] 刘海涛,石跃祥,康蕴.基于小波分析的图像融合新方法[J].计算机工程与应用,2013,49(6):205-208.
LIU Haitao, SHI Yuexiang, KANG Yun. New Method for Image Fusion Based on Wavelet Transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(6): 205-208. (in Chinese)
- [10] 杨桡,童涛,陆松岩,等.基于多特征的红外与可见光图像融合[J].光学精密工程,2014,22(2):489-496.
YANG Guang, TONG Tao, LU Songyan, et al. Fusion of Infrared and Visible Images Based on Multi-features[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 489-496. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)