文章编号:1001-5078(2013)04-0399-05

·红外技术及应用

基于 Shearlet 变换的红外与可见光图像自适应融合

邓承志^{1,2},饶 伟^{1,2}

(1. 南昌工程学院计算机网络与信息安全研究所,江西 南昌 330099;2. 南昌工程学院信息工程学院,江西 南昌 330099)

摘 要:提出一种基于 Shearlet 变换的红外与可见光图像自适应融合算法。算法首先对待融合图像进行 Shearlet 变换;然而采用粒子群优化算法确定出低频成分的最佳融合权值,自适应地对红外与可见光图像的 Shearlet 低频系数进行整合,利用 Shearlet 变换对边缘、轮廓等细节特征的准确定位,采用加权局部能量最大准则对 Shearlet 高频系数进行融合;最后对融合系数进行逆 Shearlet 变换得到融合图像。与现有的部分算法进行对比实验,结果表明本文算法获得较好地融合效果。

关键词:图像融合;Shearlet 变换;粒子群优化;红外;可见光 中图分类号:TP911.73 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.04.011

Shearlet based adaptive fusion of infrared and visible images

DENG Cheng-zhi^{1,2}, RAO Wei^{1,2}

(1. Institute of Computer Networks and Information Security, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;
 2. School of Information Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: An adaptive fusion method of infrared and visible images based on shearlet transform is presented. Firstly, the source images are transformed by shearlet transform. And then, the low-frequency coefficients are adaptively fused by the optimal fusion weights, which are selected by particle swarm optimization. With the better representation of Shearlet for edge and contour, the weighted local energy rule is employed to select the better high-frequency coefficients to fusion. Finally, the fused coefficient is transform by inverse Shearlet transform to obtain fused image. Compared to the other existing methods, the experimental results show the performance of the proposed method is much better.

Key words: image fusion; Shearlet transform; particle swarm optimization; infrared image; visible image

1 引 言

图像融合是根据某种规则,将来自不同传感器 (或同一传感器不同时刻)的图像进行融合,以得到 信息更加丰富、更加满足实际应用需求的图像,广泛 应用于遥感图像处理、医学图像处理等诸多领 域^[1]。

图像融合算法大体可分为空间域融合和变换域 融合两大类^[2]。变换域融合方法采用某种变换,将源 图像变换到另一空间进行融合,能够更好地保留源图 像的特征,是目前红外与可见光图像融合的主流算 法。传统的变换域融合算法包括基于离散余弦变换 的方法^[3]、基于小波变换的方法^[4-5]等。在变换域融 合方法中,图像的稀疏表示是融合算法好坏的前提。 近年来,随着曲线波变换、轮廓波变换等多尺度几何 分析理论的提出与发展,为图像稀疏表示提供了新的 方法。基于此,人们提出了基于曲线波的图像融合算 法^[6]、基于轮廓波的图像融合算法^[7]、基于多轮廓波

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 6116202);江西省自然 科学基金项目(No. 2009GZW0020;No. 2010GZW0049);江西省教育 厅科技项目(No. GJJ12632);南昌工程学院青年基金项目(No. 2010KJ015)资助。

作者简介:邓承志(1980 -),男,博士,副教授,硕士生导师,研 究领域为图像稀疏表示理论及应用。E-mail:dengchengzhi@126.com 收稿日期:2012-08-06;修订日期:2012-08-25

的红外与可见光图像融合^[8]等。

最近,Lim 等人^[9]通过具有合成膨胀的仿射系 统构造了一种新的多尺度几何变换——Shearlet 变 换。与曲线波和轮廓波等相类似,Shearlet 具有各向 异性、多方向和多分辨率特性,同时具有最优的非线 性逼近性能^[10]。另外,Shearlet 具有更简单和严谨 的数学框架,不仅为多维数据的几何表示提供了更 为灵活的理论工具,同时具有更加自然的数字实现。 这些优良特性使得 Shearlet 更加适用于图像融 合^[11]。本文提出一种新的红外与可见光图像融合 算法。算法采用粒子群优化算法确定低频系数的最 佳融合权值,自适应地对低频系数进行融合,完整地 保留了源图像的主要内容;采用加权局部能量最大 方式,实现高频系数的融合,更好地保留了源图像中 的边缘等细节信息。实际红外与可见光图像的实验 表明了本文算法的有效性。

2 Shearlet 变换

Shearlet 作为合成小波一个特例,由具有合成膨胀的仿射系统衍生而来。具有合成膨胀的仿射系统 如下:

$$\Psi_{AB}(\psi) = \{\psi_{j,l,k}(x) \\ = |\det A|^{j/2} \psi(B^{l}A^{j}x - k); j, l \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z}^{2}\}$$
(1)

其中, $\psi \in L^2(\mathbb{R}^2)$, A和B是2×2可逆矩阵, $|\det B| = 1$ 。如果 $\Psi_{AB}(\psi)$ 满足Parseval框架(紧框架),则 $\Psi_{AB}(\psi)$ 的元素称为合成小波。

定义 1: 令
$$A_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix}, B_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, 假定 \psi \in L^2(\mathfrak{R}^2) 满足:$$

 $(1) \overset{\circ}{\boxtimes} \psi(\xi) = \psi(\xi_1, \xi_2) = \psi_1(\xi_1) \psi_2(\xi_2/\xi_1),$

其中 ψ 是 ψ 的傅里叶变换, $\xi = (\xi_1, \xi_2) \in \Re^2, \xi_1 \neq 0;$

$$\begin{split} (2)\psi_1 是连续小波, 且 \psi_1 \in C^{\infty}(\mathbb{R}), \mathrm{supp}\psi_1 ⊂ \\ \Big[-2, \frac{1}{2}\Big] \cup \Big[\frac{1}{2}, 2\Big]; \end{split}$$

(3) $\psi_2 \in C^{\infty}(\mathbb{R})$, supp $\psi_2 \subset [-1,1]$, 且 $\|\psi_2\|_2 = 1_{\circ}$ 则称函数集: $\{\psi_{a,s,t}(x) = a^{-3/4}\psi(A_a^{-1}B_s^{-1}x - k) : a \in \mathfrak{R}^+, s \in \mathfrak{R}^+, k \in \mathfrak{R}^2\}$ 为 Shearlet 系统, $\psi_{a,s,t}(x)$ 为 Shearlet 基函数。

定义2:函数 $f \in L^2(\mathfrak{N}^2)$ 的连续 Shearlet 变换定 义为:

$$SH_{\psi}f(a,s,t) = \langle f, \psi_{a,s,t} \rangle \tag{2}$$

3 融合算法

本文融合算法属像素级融合范畴,其核心部分

主要包括低频系数融合规则和高频系数规则。

3.1 低频系数融合

给定红外图像 A 和可见光图像 B,对其进行 L 级 Shearlet 变换得到低频子带系数 $S_L^A(x,y)$ 和 $S_L^B(x,y)$,以及高频方向子带系数 $D_{a,s}^A(x,y)$ 和 $D_{a,s}^B(x,y)$,a 表示尺度,s 为方向。低频系数包含图 像的概要信息,本文选定加权求和作为融合规则:

 $S_L^F(x,y) = \boldsymbol{\omega} \times S_L^A(x,y) + (1-\boldsymbol{\omega}) \times S_L^B(x,y)$ (3)

其中, $S_L^F(x,y)$ 为融合后低频系数; $\omega \in [0,1]$ 为融合 权值。为了简便起见,通常令 $\omega = 0.5$ 。这个融合权 值假定不同传感器获得的低频成分都一样,显然不 具一般性,不利于低频成分的保留。虽然经过某种 变换之后的低频成分包含较少的图像细节,但它包 含图像的主要信息。这部分系数的高效融合,将影 响到最终的融合结果。因此,融合权值 ω 的选取也 非常关键。

本文采用粒子群优化算法来选取融合权值 ω, 实现低频系数的自适应融合,以提高低频系数的融 合效果。粒子群优化算法通过最优化适应值函数的 方式,确定最优的粒子(或位置参数)。而适应值函 数的值由粒子的位置参数来决定,位置参数与融合 权值 ω 对应。粒子的速度矢量决定位置的变化程 度,通过以下两式对其进行更新:

 $V_{id}^{\text{new}} = w \times V_{id}^{\text{old}} + C_1 \text{rand}_1 () \times (\text{pbest}_{id} - x_{id}^{\text{old}}) + C_2 \text{rand}_2 () \times (\text{gbest}_{id} - x_{id}^{\text{old}})$ (4)

$$V_{id}^{\text{new}} = x_{id}^{\text{old}} + V_{id}^{\text{new}}$$
(5)

式中, $d = 1, 2, \dots, N, w$ 为惯性权重。 C_1 和 C_2 是加 速因子, V_{id}^{new} 和 V_{id}^{old} 表示粒子当前速度和更新后的速 度。 x_{id}^{old} 和 x_{id}^{new} 表示粒子当前位置和更新后的位置。

信息熵是信息论中度量信息量的一个指标。 熵的大小直接反映信息量的多少。因此,图像信 息熵能够很好地度量图像信息的丰富程度。熵值 越大,说明图像携带的信息量越多,图像的内容越 丰富。而低频系数包含图像的主要信息。为了更 好地保持低频系数的丰富内容,本文选定信息熵 作为粒子群优化算法选取低频系数融合权值的适 应值函数。

给定源图像的低频系数,最佳融合权值选取的 具体步骤如下:

步骤 1:初始化参数,选定粒子种群维数为 Shearlet 低频系数的个数,加速因子 $C_1 = C_2 = 2$,最 大惯性权重 w = 0.95,最小惯性权重 w = 0.4,位置 参数搜索范围[0,1],最大迭代次数为50次,随机 产生种群位置和速度;

步骤2:计算融合图像低频系数的信息熵(即适应值函数的值),根据式(4)和式(5)计算粒子的新速度 *V*^{iew}_i和新位置 *x*^{iew}_i;

步骤3:更新个体最优位置、全局最优位置、全 局最优适应值;

步骤4:判断是否达到最大迭代次数。若满足, 输出最佳融合权值,退出程序;否则,转到步骤2。

3.2 高频系数融合

Shearlet 变换具有多方向、多分辨率等特性,能 够稀疏表示图像中的边缘等方向结构特征。因此, Shearlet 高频系数的模值能够很好地对图像的边缘 等细节信息进行定位。系数模值较大,说明存在明 显的细节信息。基于此,本文选定局部能量作为系 数重要程度的度量。虽然 Shearlet 变换能够去除图 像系数的相关性,但系数还是具有一定的局部相似 性。考虑到系数的局部类聚特性和噪声的影响,本 文采用加权局部能量作为高频系数的融合规则。给 定红外与可见光图像的高频系数 $D_{a,s}^{A}(x,y)$ 和 $D_{a,s}^{B}(x,y), 加权局部能量定义如下:$

 $E_{a,s}(x,y) = \sum_{x \in \Omega} \sum_{y \in \Omega} W(x,y) [D_{a,s}(x,y)]^2$ (6) 其中, Ω 为系数(x,y) 的邻域; W(x,y) 为权函数。考 虑到系数的类聚特性, 权函数选定了以下 3 × 3 的窗 函数:

$$\begin{bmatrix} W(x,y) \end{bmatrix}_{3\times 3} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

高频系数的融合规则为:

$$D_{a,s}^{F}(x,y) = \begin{cases} D_{a,s}^{A}(x,y) & \text{if } E_{a,s}^{A}(x,y) \ge E_{a,s}^{B}(x,y) \\ D_{a,s}^{A}(x,y) & \text{otherwise} \end{cases}$$
(7)

3.3 融合算法流程

给定红外图像 A 和可见光图像 B,本文融合算 法的具体实现如下:

步骤 1: 对红外与可见光图像进行 Shearlet 变换;

步骤2:采用粒子群优化算法确定出低频系数 的最佳融合权值;

步骤 3:根据低频系数融合规则(式(3)),代入 最佳融合权值,得到融合低频系数 $S_L^F(x,y)$;

步骤4:计算各高频子带系数对应的加权局部 能量值 *E_{a,s}(x,y*); 步骤 5:根据高频系数融合规则(式(7)),得到 各融合高频子带系数 $D_{a,s}^{F}(x,y)$;

步骤 6:组合融合后的低频系数 $S_L^F(x,y)$ 和高频 系数 $D_{a,s}^F(x,y)$,进行 Shearlet 逆变换,得到融合 图像。

4 实验结果与分析

为了验证算法的有效性,选取三组红外与可见 光图像为例进行实验,并与小波域方法和曲波域方 法两种算法进行对比。采用客观指标和主观指标对 算法进行评价。其中客观指标包括互信息(MI)、边 缘融合质量指数(*Q*^{AB/F})^[12]。测试图像分别定义为 Im1~Im3,如图1所示。







(c)Im3 图1 测试图像

表1给出了各算法对应融合结果的客观评价指标结果。互信息度量融合图像与源图像之间的相关性,值越大,说明融合图像包含更多的源图像信息,融合效果越好。而边缘融合质量指数可以度量融合图像中边缘保留的好坏和边缘周围振铃效应的强弱,值越大,边缘保留的越好,振铃效应越弱。从表1可以看出,本文方法在互信息和边缘融合质量指数上比其他算法优越,特别是对边缘细节较为丰富的Im3图像,说明本文方法能够很好地融合源图像

中的信息,保留更丰富的边缘,同时减少振铃效应。 表1 各算法融合结果 MI 与 Q ^{AB/F} 比较						
	Im1		Im2		Im3	
	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$	MI	$Q^{AB/F}$
小波方法	1.516	0.401	1.994	0.487	2.754	0.499
曲波方法	1.523	0.425	2.001	0.496	2.535	0.509
本文方法	1.605	0.462	2.109	0.508	2.978	0.545

图 2 给出三组红外与可见光图像的实验结果。 从图像可看出,三种方法均能较好地融合可见光图 像中的目标和红外图像中的人和建筑物等有用信 息。但是,小波域和曲线域融合结果包含较多的噪 声,并且部分目标被噪声掩盖。比较而言,本文方法 融合后的图像目标更加突出,边缘更加清晰。从主 观视觉效果上,本文方法要优于其他方法。



图 2 各算法融合结果比较

5 结束语

本文提出了一种新的红外与可见光图像融合算 法。算法利用了 Shearlet 变换的多尺度、多方向特 性,以及对图像边缘等方向信息的稀疏表示。首先 选取信息熵为适应值函数,采用粒子群优化方法,确 定出低频系数的最佳融合权值,通过最佳融合权值 加权平均融合规则实现低频系数的融合;然后通过 加权局部能量极大的方式,实现高频系数的融合。 分别对三组不同类型的红外与可见光图像进行实验 仿真,实验结果表明,本文方法不论是在客观指标还 是主观视觉方面都比其他算法更具优势。

参考文献:

[1] Wang Yuehua, Tao Zhongxiang. Overview of quality evalu-

ation methods of fused infrared and visible images [J]. Infrared,2012,33(6):7-11.(in Chinese) 王跃华,陶忠祥.红外与可见光图像融合质量评价方 法综述 [J].红外,2012,33(6):7-11.

- [2] Parjares G, Cruzdela J M. A wavelet-based image fusion tutorial [J]. Pattern Recognition, 2004, 37 (9): 1855 - 1872.
- [3] Jinshan T. A constrast based image fusion technique in the DCT domain [J]. Digital Signal Processing, 2004, 14 (3):218-226.
- [4] Amolins K, Yun Z, Dare Peter. Wavelet based image fusion techniques-an introduction, review and comparison
 [J]. ISPRS Journal of Phototrammetry & Remote Sensing,2007,62(4):249 263.
- [5] Liu Bin, Liu Weijie, Peng Jiaxiong. Fusion of infrared and

visible images based three channel nonseparable symmetrical wavelets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5):974-979. (in Chinese) 刘斌,刘维杰,彭嘉雄.采用三通道不可分对称小波的 红外与可见光图像融合 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5):974-979.

- [6] Zhao Jingchao, Qu Shiru. A better algorithm for fusion of infrared and visible image based on curvelet transform and adaptive PCNN [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(6):849-853. (in Chinese) 赵景朝,曲仕茹. 基于 Curvelet 变换和自适应 PCNN 的 红外与可见光图像融合[J].西北工业大学学报, 2011, 29(6):849-853.
- [7] Cheng Musheng. Image fusion based contourlet transform and fuzzy theory [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 696-698. (in Chinese)
 陈木生. 基于 Contourlet 变换和模糊理论的图像融合 算法 [J]. 激光与红外, 2012, 42(6):696-698.
- [8] Xia C, Licheng J, Fang L, et al. Multicontourlet-based adaptive fusion of infrared and visible remote sensing images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,

2010,7(3):549-553.

- [9] Lim W. The discrete shearlet transform : A new directional transform and compactly supported shearlet frames [J].
 IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19 (5): 1166 1180.
- [10] Deng Chengzhi. Shearlet transform and its application in image processing [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology,2011,30(6):1-6. (in Chinese)
 邓承志. Shearlet 变换与图像处理应用 [J]. 南昌工程 学院学报,2011,30(6):1-6.
- [11] Wang Zhaohui, Wang Jiaqi, Zhao Degong, et al. Image fusion based on shearlet and improved PCNN [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(2):213-216. (in Chinese)
 王朝晖, 王佳琪, 赵德功, 等. 基于 Shearlet 与改进 PC-NN 的图 像融合 [J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 213-216.
- [12] Petrovic V, Xydeas C. On the effects of sensor noise in pixellevel image fusion performance [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Image Fusion. Paris, France: IEEE, 2000:14 - 19.