文章编号:1001-5078(2012)06-0695-04 ·图像与信号处理·

基于 Contourlet 变换和模糊理论的图像融合算法

陈木生
(泉州师范学院物理与信息工程学院,福建 泉州 362000)

摘 要:提出一种基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外与可见光图像融合算法。首先,对源图像进行 Contourlet 变换;随后对低频和高频的小波系数采用不同的融合规则,即低频部分采用基于模糊集的自适应加权融合方法,高频部分采用基于区域小波能量加权的方法;最后再通过 contourlet 逆变换,获得融合图像。实验结果表明该算法能够较好地保留源图像的细节信息,具有较好的视觉效果,是一种有效实用的方法。

关键词:Contourlet 变换;图像融合;模糊集;可见光图像;红外图像
中图分类号:TP391.4 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.06.022

Image fusion based on contourlet transform and fuzzy theory

CHEN Mu-sheng
(Dept. of Science and Technology, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: For the fusion of visual and infrared images, a new method is proposed based on the contourlet transform and fuzzy theory. Firstly, the source images are decomposed using contourlet transform. Secondly, the contourlet coefficients are fused with different rules. Fuzzy theory is used to fuse low frequency sub-band, which can adaptively calculate the wavelet coefficients weights of original images. While the high frequency sub-bands are merged with local energy as weight. Ultimately, the fusion image is obtained through an inversed contourlet transform. The experimental results show that the fusion scheme can get better visual effect and preserve image detail information of the original images. It is an effective and practical fusion method.

Key words: contourlet transform; image fusion; fuzzy theory; visual image; infrared image

1 引 言

小波变换作为一种图像多尺度几何分析工具,具有良好的空域和频域的局域性,在图像融合中能够得到较好的效果,是目前的研究热点。但小波变换也有极限性,它只能反映信号的零维奇异性,即只能反映奇异“点”的位置和特性,但在表示图像结构的直线和曲线奇异性时却不是最优的,而难以表达图像中边缘等细节信息,在图像融合中通常会产生块状效应,降低了融合结果的质量[1-3]。为了克服小波在图像处理中的局限性,目前一些学者提出一种“真正”的二维图像几何表示方法即 Contourlet 变换。Contourlet 变换不仅继承了小波变换的多分辨率时频分析特征,而且弥补了小波变换的方向性缺乏,具有良好的各向异性特征。不仅能较好地捕获二维图像中线和面的奇异性,实现二维图像的稀疏表达,还能用比小波变换更少的系数来表达光滑的曲线[2,4]。目前基于多尺度变换的图像融合规则很多,依据特征量的不同主要有系数绝对值最大规则、局部方差规则、局部梯度规则、局部能量规则等,根据什么样的准则对图像的融合结果有一定的影响,并且这些融合融合规则都具有融合结果的信息不完全、易受噪声干扰等问题,为解决这一问题,模糊

基金项目:福建省教育厅科技项目(No. JA10239);泉州市科技项目(No. 2009Z53)资助。

作者简介:陈木生(1980-),男,讲师,硕士,主要研究方向为小波变换,图像融合,数字水印。E-mail:mushengchen@163.com

收稿日期:2011-09-04;**修订日期**:2011-11-01

推理作为一种解决不确定性问题的有效手段被引入到 Contourlet 变换域图像融合中[5]。

模糊推理是一种基于模糊逻辑、能够有效解决不确定性问题的不确定性推理方法,广泛应用于目标识别、图像分析、自动控制、智能信息处理和计算机科学等领域。相对于其他方法,它具有易于理解、灵活性好、包容不精确数据以及可以利用专家知识和基于自然语言等优点,该方法能够改进图像融合的性能,尽可能多地将源图像中的信息融入融合图像中[5]。因而本文将模糊推理这一解决不确定问题的有效手段引入到 Contourlet 域图像融合,提出一种基于模糊理论和 Contourlet 变换的图像融合方法。该方法是先对源图像进行 Contourlet 变换,对于低频部分采用基于模糊理论的"加权和选取"融合方式,高频部分采用基于区域能量加权和引入调节因子的方法,结果表明该方法能够得到较好的融合效果,融合图像具有较高的清晰度和对比度。

2 Contourlet 变换

Contourlet 变换是一种"真正的"二维图像表示方法,这种变换可以很好地抓住图像的几何结构。Contourlet 变换采用塔型方向滤波器组对图像进行多尺度、多方向的分解,首先采用拉普拉斯金字塔变换对图像进行高斯金字塔分解,生成一个低通采样图像和一个带通图像;对低频子带图像继续使用拉普拉斯变换进行迭代分解,便可以将原始图像分解为一系列不同尺度上的低频和高频子带图像;然后再利用方向滤波器组对带通图像进行多方向分解,将分布在同方向的奇异点合成一个系数。计算时,每层先通过扇形滤波器组进行扇形方向上的频率切分,随后与旋转重采样操作进行高频信息方向性分析,捕获图像中的线和面的奇异性,最终将图像的频域划分为 2^l 个楔形区域。当尺度变细时,非零的小波系数的数目以指数形式增长,出现了大量不可忽略的系数,最终表现为不能"稀疏"地表示原函数。由于 Contourlet 变换基的支撑区间具有随尺度而长宽比变化的"长条形结构",所以 Contourlet 变换有很好的多尺度分辨性、多方向性和各向异性,能够准确地将图像中的边缘捕获到不同尺度、不同频率的子带中。在 Contourlet 系数中,表示图像边缘的系数能量更加集中,Contourlet 系数同小波系数的统计特性相同,Contourlet 系数分布也具有持续性和聚集性[2-3,6],在实际应用中,方向数一般随着尺度增加而增加,相比小波变换方法,在分解中高维情况下每次仅产生一个高频图像,可以避免扰频现象。

3 图像的模糊度表征

由于成像过程本身的复杂性,图像存在不确定性和不精确性,也就是说图像本身有着模糊性,模糊理论为数字图像处理提供了新的方法。其基本思想是将数字图像经过某种变换,转化为同等大小的模糊矩阵,矩阵中的每个元素为像素灰度的一种分布,应用一定的算法求解该分布,然后对该分布进行某种变换和反变换,实现对图像的某种处理。其中模糊隶属度函数很多,目前主要有高斯模糊隶属度函数、三角形式的模糊隶属度函数等[5]。一幅 $M\times N$ 且最大灰度为 S 的图像可定义为一模糊点集矩阵,记为 $\bigcup_i\bigcup_j b_{ij}$,其中 $i=1,2,\cdots,M;j=1,2,\cdots,N$。$b_{ij}$ 为 (i,j) 处像素元的模糊隶属度,$b_{ij}\in[0,1]$,目前最常用的高斯模糊隶属度函数定义为[7]:

$$b_{ij}=\exp(-(x-c)^2/2\sigma^2) \tag{1}$$

式中,x_{ij} 是 (i,j) 处像元的灰度值;c 和 σ^2 是 x 为中心的邻域均值和方差。

4 基于模糊理论的融合算法

对于作为人眼观测对象的红外与可见光融合图像来说,本文主要是在多分辨率分析算法的基础上设计满足人眼视觉感知特性,同时兼顾红外与可见光图像融合固有特点的融合规则。以可见光图像 V 和红外图像 I 融合进行融合处理,基本步骤为:

(1)对可见光图像 V、红外图像 I 分别进行 Contourlet 变换,分解层数为 J,可得:

$$V(x,y)=L_J^V(x,y)+\sum_{j=1}^{J}H_{j,r}^V(x,y) \tag{2}$$

$$I(x,y)=L_J^I(x,y)+\sum_{j=1}^{J}H_{j,r}^I(x,y) \tag{3}$$

式中,J 代表 Contourlet 分解层数;j,r 代表分解尺度和不同方向,上标代表不同的图像。

(2)图像经 Contourlet 分解后,高频分量的大部分数值在0附近,只有少数的系数值较大,并且系数值大对应图像的边缘和细节信息,因而高频部分采用基于区域小波能量的图像融合方法,具体算法如下:

$$H_{j,r}^F(x,y)=\frac{H_{j,r}^V(x,y)\times E_{j,r}^V(x,y)+H_{j,r}^I(x,y)\times E_{j,r}^I(x,y)\times\alpha}{E_{j,r}^V(x,y)+E_{j,r}^I(x,y)\times\alpha} \tag{4}$$

式中,$H_{j,r}^F(x,y)$ 代表融合后的高频系数;$E_{j,r}^k=\sum_{x'=-m/2}^{m/2}\sum_{y'=-n/2}^{n/2}w.\times H_{j,r}^k(x+x',y+y')^2$,$w=\frac{1}{16}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&8&1\\1&1&1\end{bmatrix}$,$m\times n$ 为区域块的大小,本文中选取的大小为 3×3。其中,α 为红外图像高频系数的调节因子[8],由于红外图像的灰度较大,若引入较多的红外图像信息,将会导致融合图像产生灰度失真,使可见光图像变模

糊,影响融合图像的清晰度,本文中 $\alpha = 0.75$。

(3)对于低频系数,提出一种基于"选择和加权"的融合方法,其具体的实现如下:

(i)根据公式(1)求出低频子图 $L_J^V(x,y)$,$L_J^I(x,y)$的模糊隶属度 $B_1(x,y)$,$B_2(x,y)$;

(ii)根据公式(5)计算模糊隶属度的匹配度 M,其大小在[0,1]之间。

$$M(x,y) = \frac{2\sum_{x'=-m/2}^{m/2}\sum_{y'=-n/2}^{n/2} B_1(x+x',y+y') * B_2(x+x',y+y')}{S_{B1}(x,y)+S_{B2}(x,y)} \tag{5}$$

其中:

$$S_{B1} = \sum_{x'=-m/2}^{m/2}\sum_{y'=-n/2}^{n/2} w. \times B_1(x+x',y+y')^2$$

$$S_{B2} = \sum_{x'=-m/2}^{m/2}\sum_{y'=-n/2}^{n/2} w. \times B_2(x+x',y+y')^2$$

(iii)对于低频子图中的点(x,y),根据其模糊隶属度的匹配度 M 进行融合,当 M 大于阈值 thr 时,选择加权的融合方法,加权系数为 λ;当 M 小于阈值 thr 时,选取 S 大所对应的低频系数,其表示如下:

$$L_J^3(x,y) = \lambda * L_J^1(x,y) + [1-\lambda] * L_J^2(x,y) \tag{6}$$

式中:

$$\lambda = \begin{cases} 1 & M \leqslant \text{thr 且 } S_{A1} \geqslant S_{B1} \\ 0 & M \leqslant \text{thr 且 } S_{A1} \leqslant S_{B1}, \\ S_{A1}/(S_{A1}+S_{B1}) & M \geqslant \text{thr} \end{cases}$$

$L_J^F(x,y)$表示融合图像的低频系数,thr $\in$ [0.65,0.85],本文选取 thr = 0.80。

(4)对融合处理后得到的低频和高频系数进行逆变换,得到融合后的图像。

5　实验结果

为了验证本文融合方法的合理性和有效性,针对同一场景的灰度可见光图像(如图 1 所示)和红外图像(如图 2 所示),对这两幅图像分别采用本文方法,小波变换和模糊理论相结合的方法如参考文献[5];基于 Curvelet 变换的方法如参考文献[2];基于 NSCT 变换的方法参考文献[7]。实验结果如图 3 ~ 图 6 所示,从图中可以看出这 4 种方法都能较好地保留两幅源图像的重要信息,不仅保留了可见光图中的背景信息,而且较为突出地保存了红外源图像中的目标信息。从图中可以看出,本文的结果如图 3 中的对比度比较大,图中的灌木、栅栏比较清晰;图 4、图 6 在人周围的灌木比较模糊。为了更加客观地对融合结果进行评价,本文还利用熵、空间频率、标准偏差[9]三个评价指标对融合图像进行评价,结果如表 1 所示,从表 1 中我们可以看出本文算法能够获得最高的熵、空间频率和标准偏差。这也说明了本文融合结果包含了较多的细节信息,具有较高的清晰度和对比度。在本文高频融合算法中,α 为红外图像高频分量的调节因子,是为了避免红外部分的灰度值太大引起融合图像的模糊,仿真结果也表明,α 值越大,融合图像中可见光图像部分越模糊。

图 1　可见光图像

Fig. 1　visual image

图 2　红外图像

Fig. 2　infrared image

图 3　本文方法

Fig. 3　result of this paper

图 4　文献[5]

Fig. 4　result of article [5]

图5 文献[2]

Fig. 5 result of article [2]

图6 文献[7]

Fig. 6 result of article [7]

表1 实验结果评价

Tab. 1 evaluation of experimental result

	本文	article [5]	article [2]	article [7]
熵	6.69	6.40	6.38	6.64
空间频率	9.61	8.06	8.54	7.08
标准偏差	30.05	24.5	24.42	26.76

5 结 论

本文对基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外与可见光图像融合算法进行了研究。利用 Contourlet 变换的多分辨率、多方向性和模糊理论的不确定性,对于低频分量采用“加权和选取”的方法,高频部分采用局部能量和标准偏差融合方法。结果表明,本文的方法能够获得较高的熵、空间频率和调节因子,能够有效地保留融合图像的细节信息,融合结果较为清晰,对比度较大,能够较好地保留可见光图像和红外图像中的细节信息,是一种适合用于可见光与红外图像融合的方法。

参考文献:

[1] Zhou Ai-ping, Liang Jiuzhen. A daptive image fusion based on the second generation curvele tand wavelet transform [J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (9): 1010 – 1016. (in Chinese)
周爱平,梁久祯. 基于二代 curvelet 与 wavelet 变换的自适应图像融合[J]. 激光与红外, 2010, 40 (9): 1010 – 1016.

[2] Fu Zhenyu, Jin Wei, Cen Xiongying. Infrared and visible images fusion using non-subsampled contourlet transform [J]. Computer Engineering & Application, 2010, 46(7): 175 – 177. (in Chinese)
傅震宇,金炜,岑雄鹰. 采用非抽样轮廓波的红外与可见光图像融合[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(7): 175 – 177.

[3] Wu Jiapeng, Yang Zhaoxuan, Su Yuting. Wavelet domain image fusion rule based on fuzzy reasoning[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(12): 1416 – 1419. (in Chinese)
吴佳鹏,杨兆选,苏育挺. 基于模糊推理的小波域图像融合规则[J]. 天津大学学报, 2007, 40 (12): 1416 – 1419.

[4] Liu Qihai, Lin Yuchi, Feng Weichang. Novel different source image fusion algorithm using lifting directionlet transform[J]. Infrared & Laser Engineering, 2010, 39 (2): 358 – 362. (in Chinese)
刘启海,林玉池,冯伟昌. 采用提升方向波变换的异源图像融合新算法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 358 – 362.

[5] Li Tao, Tian Yan, Liu Jian, et al. Image fusion scheme based on fuzzy sets and wavelet transform [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech, 2005, 33 (3): 24 – 26. (in Chinese)
李涛,田岩,柳健,等. 一种基于模糊集和小波变换的图像融合方法[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(3): 24 – 28.

[6] Wu Yan, Xiao Ping, Wang Changming, et al. Fusion segmentation algorithm for SAR images based on the persistence and clustering in the contourlet domain[J]. Actaopticasinic, 2010, 30(7): 1977 – 1981. (in Chinese)
吴艳,肖平,王昌明,等. 基于 Contourlet 域持续性和聚集性的合成孔径雷达图像融合分割算法[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1977 – 1981.

[7] Huo Guanying, Li Qingwu, Shi Da. Multi-sensor image fusion algorithm considering neighborhood consistency in the nonsubsampled contourlet transform domain[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37 (4): 770 – 775. (in Chinese)
霍冠英,李庆武,石丹. 一种邻域一致性的 NSCT 域多传感器图像融合算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(4): 770 – 775.

[8] Liu Kun, Guo Lei, Chen Jing-son. Image fusion algorithm based on Contoulet domain in Hidden markovtree model [J]. Actaphotonicasinica, 2010, 39(8): 1383 – 1386. (in Chinese)
刘坤,郭雷,陈敬松. 基于 Contourlet 域隐马尔可夫树模型的图像融合算法[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1383 – 1386.

[9] Tian Yafei, Qin Yunxia, Yang Jiayuan. An approach of image fusion based on general image quality evaluation[C]. Image & Signal Processing, 2009, CISP.