

一种基于像素清晰度的 NSCT 域 多聚焦图像融合方法

时海亮, 黄海洋, 李刚

(郑州轻工业学院 数学与信息科学系, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对非下采样 Contourlet 变换等多分辨率方法在图像融合过程中需要对源图像进行分解和重构, 有可能改变源图像可靠信息等问题, 提出了一种基于像素清晰度的 NSCT 的空域多聚焦图像融合方法. 该方法根据 HVS 对局部对比度的敏感性和方向选择性, 以及有用信息和噪声在 NSCT 域中的分布特点, 引入局部方向对比度和方向向量的概念, 用于衡量像素清晰度; 然后通过比较多聚焦图像相应位置像素的清晰度, 以选择模式决定融合图像的像素取自哪幅源图像. 实验结果表明, 该方法不仅能够从源图像中提取更多的有用信息, 而且能够避免人为信息或高频噪声的引入, 图像融合效果优于传统方法.

关键词: 多聚焦图像融合; 像素清晰度; 非下采样 contourlet 变换; 局部方向对比度; 方向向量
中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A

A method for multifocus image fusion in NSCT domain based on pixel clarity

SHI Hai-liang, HUANG Hai-yang, LI Gang

(Dept. of Mathe. and Infor. Sci. Zhengzhou Univ. of Light Ind. Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Considering the problem that NSCT-based multiresolution fusion methods may change the reliable information during the process of decomposition and reconstruction, a multifocus image fusion method based on a new pixel clarity measure and NSCT in spatial domain was proposed. According to the characteristics of the human visual system (HVS) of frequency and direction selectivity, and the distribution difference between the image's salient features and the noise in NSCT domain, the conception of local directional contrast and directional vector is introduced in the measurement of pixel clarity. Finally based on pixel clarity of the corresponding pixels of the source images, a selection principle is put forward for fusion. Experimental results demonstrated that the proposed method could not only extract more important visual information from source images, but also effectively avoid the introduction of artificial information. It significantly outperforms the traditional image fusion methods.

Key words: multifocus image fusion; pixel clarity; NSCT; local directional contrast; directional vector

收稿日期: 2011 - 10 - 09

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(102300410112); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010A520045)

作者简介: 时海亮(1981—), 男, 河南省郑州市人, 郑州轻工业学院讲师, 主要研究方向为图像融合和数字水印.

0 引言

图像融合是信息融合的重要分支之一,它综合利用不同源图像信息彼此之间的互补性和冗余性,生成一幅新图像.图像融合现已广泛应用于医学、遥感、计算机视觉等领域.多聚焦图像融合的目的是对多幅成像焦距不同所拍摄的同一场景中不同部分清晰的多聚焦图像形成一幅保持原图像细节信息的清晰图像^[1].目前常用的多聚焦图像融合算法有加权平均法、小波变换法^[2-3]、Contourlet 变换法^[4]、非下采样 Contourlet 变换(NSCT)法等^[5-6].以小波变换为代表,包括 Contourlet 和 NSCT 等在内的多分辨率分解融合方法在近几年成为图像融合研究的主要方向,并取得了良好的融合效果,但无论何种多分辨率方法,对图像融合问题仍然较难完美解决.究其原因,多分辨率分解方法在融合过程中都需对源图像进行多分辨率分解和重构,从而对源图像中的可靠信息有一定的改变,使得融合图像容易产生较明显的条状或块状纹理现象,影响图像质量^[7].

在多分辨率分解方法中,NSCT 具有多尺度、多方向和移不变等性质^[5],对图像的纹理、边缘等细节信息能给出良好的表示.本文将在分析图像有用信息和噪声在 NSCT 域中的分布特点基础上,提出一种新的像素清晰度的度量方法,并在此基础上提出一种摒弃多分辨率重构的空域多聚焦图像融合方法.

1 基于像素清晰度的图像融合

1.1 NSCT

NSCT 是一种灵活的多分辨率分解方法,具有比小波变换和 Contoulet 变换更强的图像边缘信息表达能力^[8].利用 NSCT 提取源图像的边缘特征,可以为融合图像提供更丰富的信息.NSCT 是将多分辨率分析和方向分析分开进行,首先采用非下采样塔式滤波器组 NSPFB(nonsubsampled pyramid filter bank)对图像进行多分辨率分解,然后采用非下采样方向滤波器组 NSDFB(nonsubsampled directional filter bank)对得到的各带通子带图像进行方向分解,从而得到不同尺度、方向子带图像.

NSCT 通过采用二通道非下采样滤波器组消除了频谱混叠现象,可获得更好的频率选择性和正则

性.NSCT 在分解和重构过程中取消了下采样和上采样环节,使得图像具有平移不变性以及各级子带图像与源图像具有相同尺寸大小等特性,从而在融合过程中能够有效减少配准误差对融合结果的影响,能较容易找到各个子带图像之间的对应关系,有利于融合运算的实现^[7].

1.2 像素清晰度

对一幅图像 I 进行 J 级 NSCT 分解后,得到不同尺度、方向的子带系数

$$\{C_j^l(m, n), \bar{C}_j^l(m, n)\} \quad 1 \leq j \leq J, l=1, 2, \dots, 2^j$$

其中 $C_j^l(m, n)$ 表示低通子带系数, $\bar{C}_j^l(m, n)$ 表示尺度 j 上的各带通方向子带系数.

一般情况下,在多分辨率分解域中绝对值较大的带通系数对应着亮度变化明显的像素,即对应着诸如边缘、直线、纹理等图像中的显著特征.所以在基于多分辨率分解的融合方法中,常采用选取绝对值较大的带通系数的融合规则.然而,这种规则对噪声非常敏感,容易将噪声作为有用信息而引入到融合图像中.好的融合规则应该尽量的保留原始图像中的有用细节信息,同时屏蔽噪声等虚假信息.根据人眼视觉系统(HVS)对局部对比度的敏感性,以及有用信息和噪声在 NSCT 域中的分布特点,下面提出一种新的评价像素清晰度的度量方法.

图像对比度^[9]可定义为

$$R = \frac{L - L_B}{L_B} = \frac{\Delta L}{L_B}$$

其中 L 表示图像局部灰度值; L_B 表示图像背景灰度值,对应着低频部分; ΔL 则对应着带通高频部分.由于 HVS 不仅对局部对比度变化敏感,还具有频率选择性和方向性^[10],而 NSCT 具有良好的方向特性,允许在不同尺度下具有不用数目的方向^[8],故为了更准确地表示图像中的显著特征,本文引入局部方向对比度的概念,定义为

$$R_j^l(m, n) = \begin{cases} \frac{\sum_{l=1}^{2^j} |C_{j,l}^l(m, n)|}{\bar{C}_j^l(m, n)} & \bar{C}_j^l(m, n) \neq 0 \\ \sum_{l=1}^{2^j} |C_{j,l}^l(m, n)| & \bar{C}_j^l(m, n) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\bar{C}_j^l(m, n)$ 的定义如式②所示,为低通图像中以坐标为 (m, n) 的像素为中心的局部区域的灰度平均值,局部区域的大小可为 3×3 或 5×5 .

$$\overline{C_j^l(m, n)} = \frac{1}{M \times N} \times \sum_{k_1=-(M_1-1)/2}^{(M_1-1)/2} \sum_{k_2=-(N_1-1)/2}^{(N_1-1)/2} C_j^l(m+k_1, n+k_2) \quad (2)$$

另外,自然图像局部区域的重要特征如纹理、边缘、直线等,一般还具有较强的方向性.在 NSCT 域,这些特征对应着幅值较大的 NSCT 系数^[10],且系数越大,图像特征越清晰,然而这些系数主要分布在少量的方向子带上.离焦边缘等图像特征和噪声则不同,它们有可能也对应着幅值较大的 NSCT 系数,但是它们的局部方向能量在各方向子带上分布比较均匀^[10].因此为区分聚焦图像特征和离焦图像特征及噪声,引入方向向量. j 尺度下坐标为 (m, n) 的方向向量的定义如下:

$$\bar{V}_j^l(m, n) = (C_{j,1}^l(m, n), C_{j,2}^l(m, n), \dots, C_{j,2^j}^l(m, n))$$

方向向量的方差为

$$D_j^l(m, n) = \frac{1}{2^j} \sum_{l=1}^{2^j} (C_{j,l}^l(m, n) - \bar{V}_j^l(m, n))^2 \quad (3)$$

$$\text{其中, } \bar{V}_j^l(m, n) = \frac{1}{2^j} \sum_{l=1}^{2^j} C_{j,l}^l(m, n).$$

方向向量方差大,说明其所对应的像素很可能是边缘等重要聚焦图像特征,否则就可能是离焦图像特征或噪声.

一个像素如果同时具有较大的局部方向对比度 $R_j^l(m, n)$ 和方向向量方差 $D_j^l(m, n)$,那么,就说明它对应着图像的重要特征.故可将像素清晰度定义为

$$P_j^l(m, n) = R_j^l(m, n) D_j^l(m, n)$$

从而可据此对原始多聚焦图像相应位置的像素的清晰度进行比较,确定出某一幅图像的对应像素是否是聚焦的重要图像特征,以决定是否将该像素作为目标像素.

这种像素清晰度的定义不仅考虑到带通系数与相应低频子带系数之间的关系,还考虑到了各带通方向子带系数之间的关系,既可突出对比度信息,又可反映聚焦离焦特征和几何结构等细节信息,同时还可有效防止将噪声引入到融合图像中.

1.3 融合方法

假设有 2 幅多聚焦图像 A 和 B ,并假设 A 和 B 已精确配准.

1) 对 A 和 B 进行 J 级 NSCT 分解,可得相应系数

$$\{C_j^A(m, n), C_{j,l}^A(m, n)\} \quad (1 \leq j \leq J, l=1, 2, \dots, 2^j)$$

$$\{C_j^B(m, n), C_{j,l}^B(m, n)\} \quad (1 \leq j \leq J, l=1, 2, \dots, 2^j)$$

2) 利用 $j=1$ 的 NSCT 系数,根据式①③计算像素清晰度 $P_1^A(m, n)$ 和 $P_1^B(m, n)$.

3) 形成融合决策映射 $M(m, n)$

$$M(m, n) = \begin{cases} 1 & P_1^A(m, n) \geq P_1^B(m, n) \\ 0 & P_1^A(m, n) < P_1^B(m, n) \end{cases}$$

4) 对 $M(m, n)$ 进行一致性校验.使用 3×3 方形结构元素对 $M(m, n)$ 进行数学形态学的腐蚀和膨胀运算,消除映射矩阵中的孤立点.

5) 根据式④,利用映射矩阵 $M(m, n)$ 和原始多聚焦图像生成融合图像 F .

$$F(m, n) = \begin{cases} A(m, n) & M(m, n) = 1 \\ B(m, n) & M(m, n) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 仿真分析

2.1 图像融合效果评价

图像融合的评价指标一般包括主观视觉感知和客观定量评价.主观视觉感知比较直观,但容易受视觉心理因素的影响,故需选择适当的客观定量指标进行全面评价和比较.

本文采用客观定量指标有平均梯度、标准方差^[11]、互信息^[12]、基于边缘梯度信息的评价因子、融合丢失信息量和人为引入的信息量.其中,后三者是由 V. Petoovic 等^[13]提出的一种综合评价融合效果的指标.基于边缘梯度信息的评价因子能较好地反映源图像到融合图像边缘信息的传递量,融合丢失信息量旨在衡量在融合过程中从源图像中丢失的信息量,人为引入的信息量表示融合过程中被人为引入的并非源图像信息的、可能减损融合图像有用性的虚假信息量.

2.2 实验结果及分析

实验采用如图 1a) ,b) 所示的大小为 480×640 的原始多聚焦图像“disk”进行融合.

为验证本文提出的融合方法的有效性,对 4 种融合方法进行比较.方法 1 为空域加权平均法,方法 2 为基于小波变换的融合方法,方法 3 为基于 NSCT 变换的融合方法,方法 4 为本文提出的融合方法.

其中,方法 2 和方法 3 中的融合规则采用文献^[14]中论证的效果较好的简单融合规则,即对低频系数取平均,对高频系数选取具有较大绝对值的系数,分解级数为 3 级;方法 2 中的小波基采用“9-7”

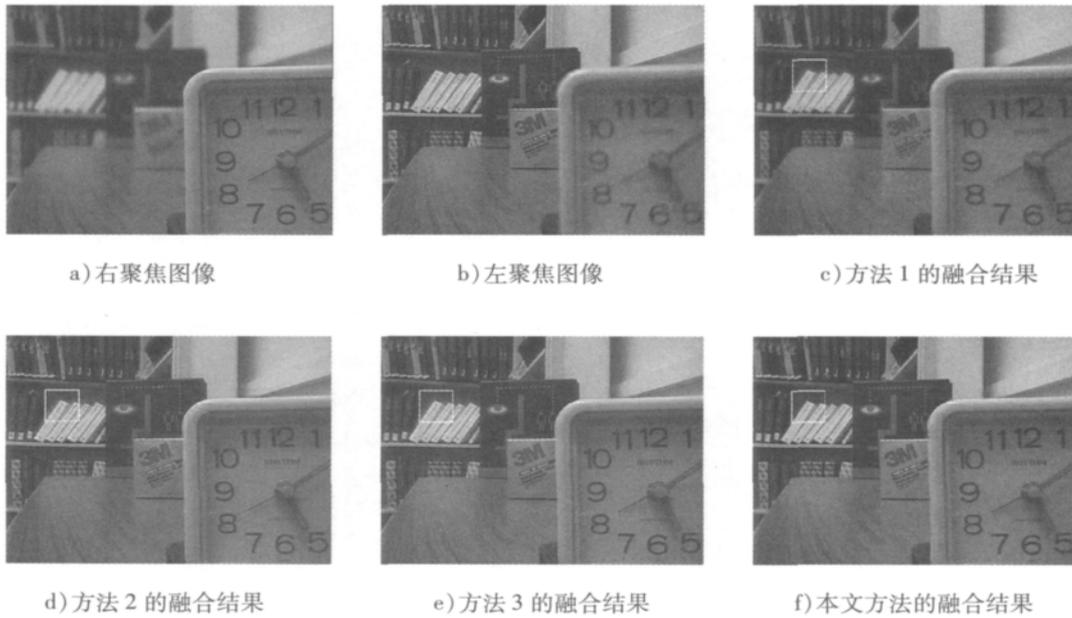


图1 “disk”多聚焦图像与融合图像

对称双正交小波;方法3和方法4中的NSCT变换在多分辨率分解阶段采用“9-7”对称双正交小波,方向分解阶段采用“23-45”双正交五株滤波器;方法3中NSCT的各分解级的方向数分别是4,8,16;方法4中,为减少计算像素清晰度的运算时间,设置NSCT的分解级数为1,其方向数为8.相应的融合图像如图1c)一f)所示.

从融合结果可以看出,4种融合方法都能够取得令人满意的视觉效果,消除了源图像的聚焦离焦差异,提高了图像的清晰度,使场景中的各个目标都比较清晰.但本文提出的融合方法得到的融合图像的视觉效果最好.为清晰说明这一点,将图1c)一f)左上方矩形框内的剪裁图像列举在图2中.图2a)清晰度较低,对比度不高;图2b)中含有大量的

白色虚影,主要分布在书本边缘部分;图2c)中虚影得到抑制,但仍存在.相比图2b)效果提高的原因在于NSCT在分解和重构过程中取消了上采样和下采样操作,避免了引入频率混叠效应;图2d)中图像视觉效果更好,虚影基本消失.这说明本文提出的像素清晰度的度量方法及融合方法取得了良好的效果,是有效可行的.

表1给出了图1c)一f)4个融合结果的融合指标数据.可以看出,方法1加权平均法引入的人为虚假信息最少,但同时丢失了最多的源图像有用信息;除此之外,从其他评价指标数据可以看出,本文提出的方法能够提取更多的有用信息注入到融合图像中,图像的清晰度更高,融合效果更好.

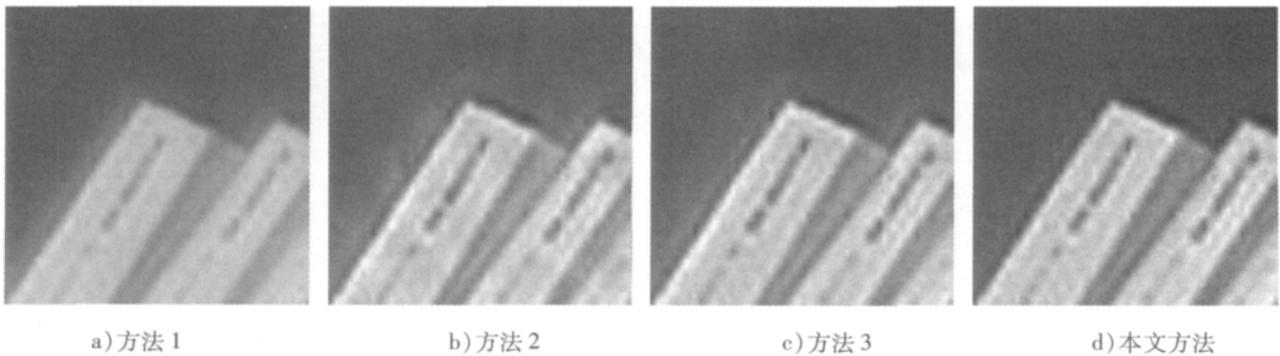


图2 “disk”局部融合图像

表1 图1(c) —f) 4个融合结果的融合指标数据

方法	平均梯度	标准方差	互信息	边缘梯度评价因子	融合丢失信息量	人为引入信息量
方法1	0.165 0	0.064 1	2.503 5	0.645 2	0.349 2	0.005 6
方法2	0.173 4	0.107 9	2.323 8	0.712 3	0.179 0	0.108 7
方法3	0.173 4	0.107 2	2.472 7	0.726 3	0.179 1	0.094 5
本文方法	0.173 5	0.110 4	2.680 4	0.730 3	0.148 9	0.090 8

3 结论

多分辨率分解方法在图像融合过程中需对源图像进行分解和重构,对其中的有用信息不可避免地会有一些的改变,影响了图像质量。NSCT作为一种新的图像多分辨率几何分析工具,具有良好的空域、频域局部特性、方向特性和平移不变性,能够更精确地表示图像边缘信息。本文利用该特点,并根据HVS对局部对比度的敏感性和方向选择性,以及有用信息和噪声在NSCT域中的分布特点,引入了局部方向对比度和方向向量的概念,提出了一种新的评价像素清晰度的度量方法,并在此基础上提出了一种摒弃多分辨率重构的基于像素清晰度的空域多聚焦图像融合方法。实验结果表明,该方法不仅能够从源图像中提取更多的有用视觉信息,而且能够有效避免人为信息或高频噪声的引入,不论从视觉效果还是图像质量定量分析,本文方法均优于传统方法。

参考文献:

- [1] Zhang Zhong, Blum Rick S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. Proc IEEE, 1999, 87(8): 1315.
- [2] 侯宝生. 一种基于小波变换与局部能量的多聚焦图像融合算法[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2009, 24(3): 96.
- [3] 范文涛, 马莉. 一种基于像素清晰度的多聚焦图像融合方法[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2009, 24(6): 100.
- [4] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Trans Image Process, 2005, 14(12): 2091.
- [5] Da Cunha Arthur L, Zhou Jiangping, Do M N. The non-subsampled contourlet transform: theory, design and applications [J]. IEEE Trans Image Process, 2006, 15(10): 3089.
- [6] 时海亮, 方敏, 梁锦锦. 基于非亚采样 Contourlet 和 SWT 的多光谱图像和全色图像的融合算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 124.
- [7] 曹寅, 蔡云泽, 韩瑜. 基于视觉结构相似度的离焦图像融合方法[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(11): 1501.
- [8] 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.
- [9] Dauphin G, Beghadi A, Lesegno V. A local directional bandlimited contrast [C] // Proc 7th Int Symposium Signal Process and Its Application, Paris: IEEE, 2003: 197-200.
- [10] Zhang Qiang, Guo Baolong. Multifocus image fusion using nonsubsampling contourlet transform [J]. Signal Process, 2009, 89(7): 1334.
- [11] 张强, 郭宝龙. 基于 Curvelet 变换的图像融合算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(2): 458.
- [12] Yin Chen, Risk S Blum. A new automated quality assessment algorithm for image fusion [J]. Image and Vision Comp, 2009, 27: 1421.
- [13] Petrovic V, Xydeas C. Objective image fusion performance characterization [C] // Proc IEEE Int Conf Comp Vision, Beijing: IEEE, 2005: 1866-1871.
- [14] Wang Weiwei, Shui Penglang, Song Guoxiang. Multifocus image fusion in wavelet domain [C] // Proc Int Conf Machine Learning and Cybernetics, Xi'an: Inst of Electr and Electronics Eng Inc, 2003: 2887-2890.