

文章编号:1004-9037(2013)06-0000-06

# 基于 Contourlet 变换多聚焦图像融合方法

蔡志芳<sup>1</sup> 孙 巍<sup>2</sup>

(1. 北京电子科技职业学院电信工程学院, 北京, 100016; 2. 吉林大学汽车工程学院, 长春, 130022)

**摘要:**该方法首先提取源图像的亮度分量,采用非下采样 Contourlet 变换对其进行分解,通过“合成图像像素值取大”准则对高频系数进行处理得到融合决策图,并对其一致性校验,最后根据校验后的决策图在 RGB 空间进行像素点选取,得到融合图像。实验结果表明,本文方法解决了 RGB 空间融合方法容易导致的颜色失真,同时本方法仅对亮度分量融合,降低运算复杂度。融合图像在保留图像有用信息的同时,弥补了传统空间域方法在细节表现力上的不足,更加符合人类的视觉特征。本文融合方法还用于灰度多聚焦图像融合中,实践证明,融合效果很好。

**关键词:**图像处理;彩色图像融合;非下采样 Contourlet 变换;YUV 色彩空间

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A

## Multi-Focus Image Fusion Algorithm with Contourlet Transform

Cai Zhifang<sup>1</sup>, Sun Wei<sup>2</sup>

(1. School of Telecommunications Engineering, Beijing Vocational College of Electronic Science Technology, Beijing, 100016, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun, 130022, China)

**Abstract:** The luminance components of the input color images are processed with nonsubsampling Contourlet transform (NSCT). The decision map is attained by fusing the high frequency coefficients through the scheme of Synthesis image coefficient value select maximum (SICVSM). Then the decision map is verified by consistency verification and is used to select the RGB components simultaneously. Experiment results show that the proposed algorithm avoids color distortion caused by fusion algorithms in RGB space model. At the same time this method is only the luminance component integration, thereby reducing the computational complexity. The fused image, which not only retains the important information existing in the input color images, but also improves the detail expression, is more adaptive to the vision of human beings. The integration method is also applied to gray-scale multi-focus image integration in this paper, and the practice shows it is pretty effective.

**Key words:** image fusion; color image fusion; nonsubsampling contourlet transform; YUV color space

## 引 言

目前大多数彩色多聚焦图像融合方法是在灰度多聚焦图像融合方法的基础上提出的。由于彩色图像与灰度图像在色彩空间上的差异,研究者习惯于采用灰度多聚焦图像融合方法对彩色图像的各个分量分别进行融合,从而得到融合后的彩色图像。

按照色彩空间模型选取的不同,彩色多聚焦图

像融合方法的发展分为两个阶段。第1阶段:在 RGB 空间对彩色图像进行融合。这类方法提取彩色图像的 R, G, B 分量,采用相应的融合方法分别对 3 个分量进行融合,最后合成融合图像。例如,王亚杰等<sup>[1]</sup>采用 Dual-Tree Complex Wavelet Transform (DT-CWT)的方法对 R, G, B 分量分别进行融合。第二阶段:在其他色彩空间(如 IHS 或 YUV)对彩色图像进行融合。这类方法首先将彩色图像由 RGB 空间变换到 IHS 或 YUV 空间,然后在 IHS 或 YUV 空

间对相应的分量进行融合,得到融合图像。例如在 IHS 空间,Wei Huang 等<sup>[2]</sup>采用分块融合方法对 I 分量(亮度)进行融合,徐胜男<sup>[3]</sup>等采用基于离散小波框架的方法对 I 分量进行融合;在 YUV 空间, Luca Bogoni<sup>[4]</sup>等采用基于金字塔分解的方法分别对 Y 分量(亮度)和 U, V 分量(色差)进行融合,付朝霞<sup>[5]</sup>等采用基于小波变换的方法对各分量分别进行融合。

目前彩色多聚焦图像融合方法主要存在两方面的问题:(1)色彩空间模型的选择;(2)融合方法。一方面,在 RGB 空间进行融合,容易造成颜色失真;在 IHS 或 YUV 空间对各分量分别进行融合,将破坏各分量之间的原始比例关系,影响融合图像的质量。另一方面,现有融合方法难以准确提取源图像的清晰区域。

针对以上问题,本文提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled contourlet transform, NSCT)的空间域彩色多聚焦图像融合方法。首先提取彩色图像的亮度分量(Y 分量),将彩色多聚焦图像融合转化成灰度多聚焦图像融合。然后将变换域和空间域融合方法相结合,采用 NSCT 对源图像的亮度分量进行分解,求取“合成图像”,根据“合成图像”各像素点的系数“指导”源彩色图像中相应像素点的选取。NSCT 良好的方向选择性弥补了空间域融合方法在细节表现力上的不足。对源彩色图像 R, G, B 分量相应像素点统一选取的方法避免了对各分量分别进行融合的方法产生的颜色失真。实验结果表明,本文方法融合图像的效果优于 RGB 空间的融合方法以及 IHS 和 YUV 空间的其他融合方法。

## 1 色彩空间模型的选择

与一个灰度像素点对应一个像素值不同,一个彩色像素点对应 3 个像素值。在 RGB 模型<sup>[6]</sup>中,任一颜色都是通过红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色以不同的比例相加混合产生,3 个分量不仅表示亮度也表示色度,存在着相关性,对 3 个分量分别进行融合会破坏它们之间的比例关系,从而引起颜色失真。YUV 模型<sup>[7]</sup>包括一个亮度分量 Y 和两个色差分量 U, V。Y 分量和 U, V 分量是分离的。Y 分量对应彩色图像的灰度,体现了彩色图像的边缘、清晰度等纹理特征。

针对以上色彩空间模型的特点以及彩色多聚焦图像的特点,本文选取彩色图像的亮度分量 Y

作为融合对象,通过亮度分量中像素点的选取“指导”源图像各分量中像素点的选取。原因如下:

(1)人眼视觉系统对亮度信息比对彩色信息敏感。

(2)彩色图像的亮度分量包含了其灰度图像的所有信息,与色度分量相比,更能反映彩色多聚焦图像的特征。

(3)仅对亮度分量进行融合,一方面保持了各像素点处 3 个分量之间的比例,避免了融合过程对图像彩色信息的破坏;另一方面将彩色多聚焦图像融合转化成了灰度多聚焦图像融合,使融合运算的对象由 3 个分量变成 1 个分量,降低了算法复杂度。

## 2 非下采样 Contourlet 变换原理

Minh N Do 和 Martin Vetterli 于 2002 年提出了一种“真正”的二维图像表示方法:Contourlet 变换<sup>[8-9]</sup>。该方法利用 Laplacian 塔形分解(Laplacian pyramid, LP)和方向滤波器组(Directional filter bank, DFB)实现了一种多分辨、多尺度、多方向的图像表示方法,能够准确地捕获图像中的边缘信息。但是,Contourlet 变换在分解过程中有上下采样过程,不具备平移不变性。

A. L. Cunha 等人于 2005 年提出了非下采样 Contourlet 变换<sup>[10-12]</sup>。该变换的核心是不可分离的两通道非下采样滤波器组,通过非下采样金字塔结构和非下采样方向滤波器组分解,利用 à trous 算法实现,生成一种灵活的多尺度、多方向并且具有平移不变特性的图像分解方法。

NSCT 变换完全重构条件是 Bezout 恒等式

$$H_0(z)G_0(z) + H_1(z)G_1(z) = 1 \quad (1)$$

式中: $H_0(z)$  为低通分解滤波器, $H_1(z)$  为高通分解滤波器, $G_0(z)$  为低通重建滤波器, $G_1(z)$  为高通重建滤波器。而严格下采样滤波器组除了要满足式(1)外,还需要满足双正交的其他条件才能实现。NSCT 在基本风扇滤波器组或钻石滤波器组的基础上,通过对滤波器的操作得到象限滤波器组和平行滤波器组,从而避免了对图像的采样操作。

图 1 为 NSCT 的分解框图。首先,用非下采样金字塔变换将输入图像分解为低通子带和高通子带,以实现图像的多分辨率分解;然后利用非下采样方向滤波器组将高通子带分解为多个方向子带,以实现图像的多方向分解;最后对每一层的低通子带重复上述操作,得到了输入图像的多层非下

采样 Contourlet 变换。与 Contourlet 变换相比, NSCT 借鉴 à trous 算法的思想,并不对 LP 分解后的分量和 DFB 分解后的分量进行下采样,而是对滤波器进行上采样,从而具有平移不变性。图 1 (b)为 3 层 NSCT 的频率分割图。

图 2 为 lena 图像的 NSCT 结果,共进行了 2 层非下采样 LP 分解,这两层分别被非下采样滤波器组分解成 4 个和 8 个带通方向图像。

由于 NSCT 中金字塔滤波器和 DFB 都是非下采样的,因此具有以下特点:

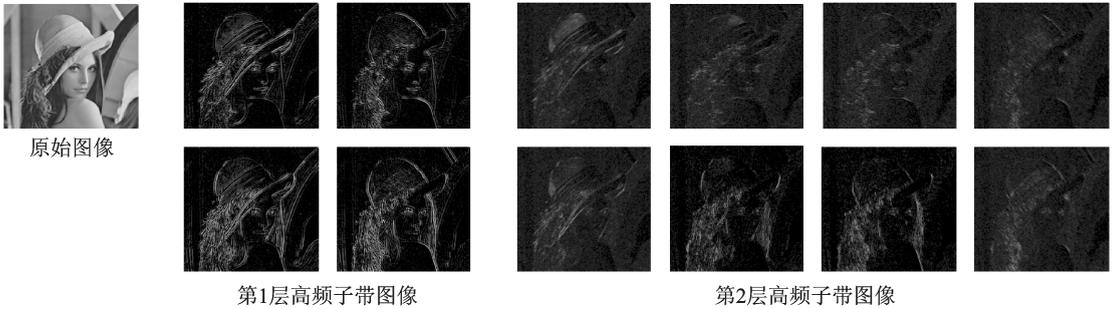


图 1 非下采样 Contourlet 变换的实现

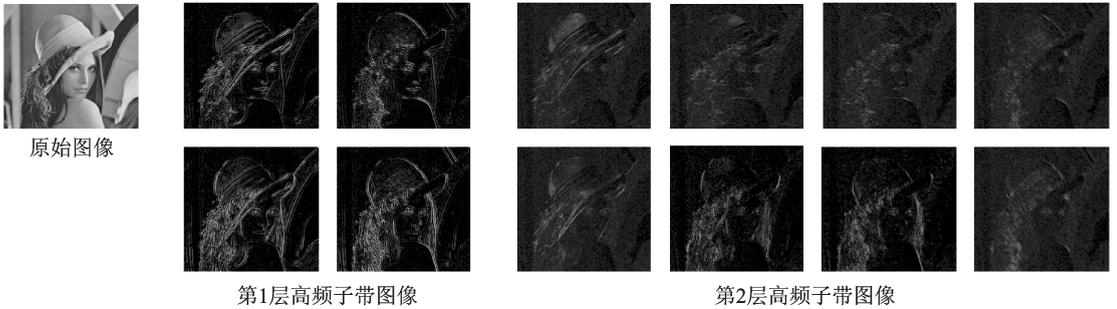


图 2 lena 图像的非下采样 Contourlet 变换结果

(1) 图像经 NSCT 得到的各个子带具有与源图像相同的大小,子带的视觉特征及信息更加完整。

(2) 根据多抽样率理论,NSCT 的低频子带不会有频率混淆现象产生,因而具有良好的方向选择性。

### 3 融合方法原理

对彩色图像的亮度分量进行融合实际上是灰度多聚焦图像融合。灰度多聚焦图像融合方法主要分为空间域和变换域。空间域图像融合方法缺乏图像的细节表现力,难以准确选取源图像的清晰部分,融合效果不理想。分块融合方法分割子块的尺寸难以统一,融合图像易出现块效应。变换域图像融合方法由于变换系数选取的不准确以及变换与反变换过程中对源图像信息的破坏,难以保留源图像中的有用信息。

本文将传统的空间域融合方法和多分辨率分析方法结合,根据亮度分量分解后高频系数的特点来进行亮度分量像素点的选取。由于 NSCT 得到的高频子带与源图像具有相同的尺寸,像素点之间的对应关系明确,采用 NSCT 对亮度分量进行分解。

由 NSCT 的原理可知,高频系数反映了图像的边缘细节信息,根据光学系统成像原理可知,清

晰图像的高频系数远大于模糊图像的高频系数。考虑选取像素值大的高频系数作为融合后的高频系数。但是,仅根据像素值的大小进行系数的选取存在以下问题:

(1) 融合图像的高频子带中对应像素点的系数来自于不同的图像。

(2) 融合图像的高频子带中像素点与其邻近像素点来自于不同的图像。

融合方法应尽量满足所有高频子图像中任一系数来自清晰图像,问题(1)将会造成清晰图像对应的高频信息的损失。针对这个问题,引入“合成图像”。同一源图像经非下采样 Contourlet 分解得到的所有高频子图像相加得到的图像,称为“合成图像”。计算过程如式(2)所示

$$p_i(m, n) = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{m_j} |H_{i,l}^{j,l}(m, n)| \quad (2)$$

式中,  $m_j$  代表第  $j$  层高频系数的子带数,  $N$  代表分解的层数。

通过“合成图像”中各点像素值的大小确定融合图像对应像素点的选取,就可以保证其选自同一清晰源图像。

问题(2)会降低融合图像的整体效果。本文通过“一致性”校验保证融合图像中每个区域的像素点选自同一清晰源图像。

以上分析针对彩色图像亮度分量的融合,彩色

图像的融合还存在一个问题:如果彩色图像各分量的融合结果不一致,将造成融合彩色图像颜色失真。本文方法根据亮度分量融合时得到的融合决策图来“指导”源彩色图像 R, G, B 三个分量中像素点的选取,避免了融合图像的颜色失真。

本文融合方法步骤如下:

(1)按照公式(3)计算源彩色图像的亮度分量 Y。为方便起见,将亮度分量记为  $L_i$ ,  $i = A$  或 B 代表源彩色图像。

$$Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (3)$$

(2)对亮度分量  $L_i$  进行 NSCT,得到高频子图像  $H_{i,l}^j$ ,其中,  $i = A$  或 B 代表源图像,  $j = 1, 2, \dots, N$  代表分解的层数,  $l$  代表每一层高频系数的各个子带。

(3)按照式(2)求取“合成图像”  $p_i(m, n)$ 。

(4)根据“合成图像”中各点的像素值  $p_i(m, n)$  确定加权因子  $w(m, n)$ ,得到融合决策图

$$w(m, n) = \begin{cases} 1 & p_A(m, n) \geq p_B(m, n) \\ 0 & p_A(m, n) < p_B(m, n) \end{cases} \quad (4)$$

(5)对融合决策图进行“一致性”校验,即图中每一像素点的加权因子应与其周围“多数”加权因子的取值保持一致:如果某因子的 8 个邻域因子中至少有 5 个因子为 1,则该因子校验后应为 1,反之亦然。

(6)根据校验后的融合决策图中加权因子  $\bar{w}(m, n)$  求取融合彩色图像 F 的各分量,从而得到融合彩色图像

$$F_R = \bar{w}(m, n) \times A_R(m, n) + (1 - \bar{w}(m, n)) \times B_R(m, n) \quad (5)$$

$$F_G = \bar{w}(m, n) \times A_G(m, n) + (1 - \bar{w}(m, n)) \times B_G(m, n) \quad (6)$$

$$F_B = \bar{w}(m, n) \times A_B(m, n) + (1 - \bar{w}(m, n)) \times B_B(m, n) \quad (7)$$

## 4 融合实验与结果

图 3(a, b)所示为 book 彩色多聚焦图像(大小为 600 像素  $\times$  800 像素),场景中的两本书与相机间距离不同,通过对两本书分别对焦得到两幅多聚焦图像。同理,通过对花朵和墙分别对焦得到图 4(a, b)所示的 flower 彩色多聚焦图像(大小为 600 像素  $\times$  800 像素)。

分别采用文献[1, 2, 5]的方法和本文方法对图 3 和图 4 所示的彩色多聚焦图像进行对比融合实验。文献[1]中基于双树复数小波变换的方法中低

频系数阈值分别为 0.1 和 0.001,高频系数阈值分别为 0 和 0.1。文献[2]在 IHS 空间进行分块融合,子块的最佳尺寸分别为  $60 \times 40$  和  $30 \times 20$ 。文献[5]在 YIQ 空间进行融合,考虑到高频系数融合时子块的分割,采用 haar 小波基,子块尺寸为 5 像素  $\times$  5 像素。考虑到算法的复杂度,本文方法融合时 NSCT 分解层数为 2 层,第 1 层有 4 个方向子带,第 2 层有 8 个方向子带。各算法融合图像如图 3(d)~(j)和图 4(d)~(j)所示。

彩色图像在存储时是 3 维的 RGB 图像,因此融合图像的质量评价应在 R, G, B 三个分量上进行。由于不存在标准图像,采用 Gemma Piella 和 Henk Heijmans<sup>[13]</sup>提出的加权融合质量指标(Weighted fusion quality index, WFQI)和边缘融合质量指标(Edge dependent fusion quality index, EFQI)作为融合图像的客观评价指标。WFQI 定义如下

$$Q_w(A, B, F) = \sum_{\omega \in \Omega} c(\omega) (\rho_A(\omega) \cdot Q_0(A, F|\omega) + (1 - \rho_A(\omega)) \cdot Q_0(B, F|\omega)) \quad (8)$$

$$c(\omega) = C(\omega) / \left( \sum_{\omega' \in \Omega} C(\omega') \right) \quad (9)$$

$$C(\omega) = \max(\eta(A|\omega), \eta(B|\omega)) \quad (10)$$

$$\rho_A(\omega) = \eta(A|\omega) / (\eta(A|\omega) + \eta(B|\omega)) \quad (11)$$

$\eta(A|\omega)$  代表为源图像 A 在窗口  $\omega$  内的某种特征(如方差,能量等),  $\Omega$  代表所有窗口的总和,  $Q_0$  为总体质量指标,详见文献[13]。EFQI 定义如下

$$Q_E(A, B, F) = Q_w(A, B, F)^{1-\alpha} \cdot Q(A', B', F')^\alpha \quad (12)$$

式中:  $A', B', F'$  分别为源图像 A, B 及融合图像 F 的边缘图像。

WFQI 和 EFQI 考虑了人类视觉特征,WFQI 体现了融合图像包含源图像信息的程度,EFQI 则侧重于人眼对图像边缘信息的敏感程度,二者范围均为  $[-1, 1]$ ,越接近 1 表示融合图像效果越好。计算时分别求出 R, G, B 三个分量的 WFQI 和 EFQI,最后进行算术平均。

各算法融合图像如图 3(c)~(f)和图 4(c)~(f)所示,融合结果性能指标如表 1 和表 2 所示。

由图 3 和图 4 可以看出,文献[1]融合图像(图 3(c), 图 4(c))与源图像清晰区域相比有明显的颜色失真,这是因为 R, G, B 分量不仅表示亮度也表示色度,对它们分别融合的做法既破坏了各分量之间的比例关系又不能充分利用图像的灰度信息,从而造成颜色失真与模糊。与之相比,文献[2]融合图像(图 3(d), 图 4(d))的清晰程度得到明显改

善,这得益于融合方法选择了 I 分量为融合对象,从而很好地提取了图像的灰度信息,但融合图像在过渡区域(两本书的相交区域以及花朵的边缘)出现了块效应,这正是分块融合方法很难解决的问题。文献[5]虽然在色彩空间的选择上与文献[2]类似,但由于变换域融合方法在保留源图像有用信

息上的不足,融合图像(图 3(e),图 4(e))在物体边缘出现模糊。可见,通过提取彩色图像亮度分量进行融合的方法可以很好地解决 RGB 空间融合造成的颜色失真等现象。本文方法的融合结果(图 3(f),图 4(f))很好地解决了文献[2]和文献[5]方法存在的块效应和模糊现象。

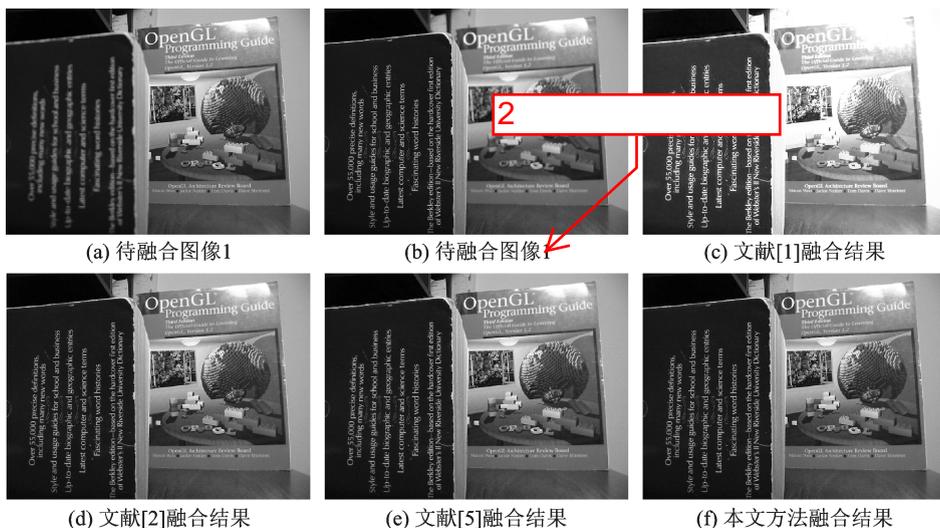


图 3 book 图像各种方法融合结果

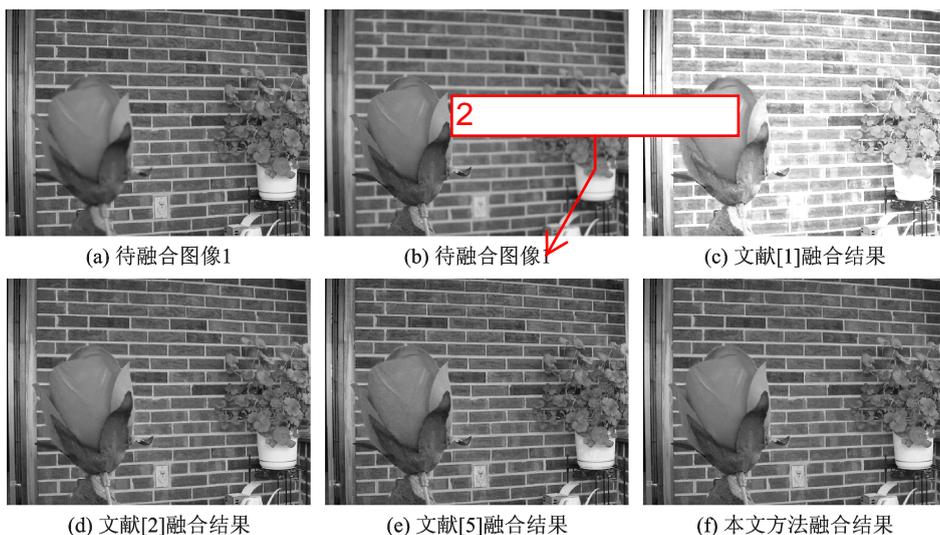


图 4 flower 图像各种方法融合结果

表 1 book 图像融合结果性能表

	文献[1]方法	文献[2]方法	文献[5]方法	本文方法
WFQI	0.637 3	0.911 2	0.907 7	0.912 3
EFQI	0.620 6	0.921 4	0.914 6	0.923 6

表 2 flower 图像融合结果性能表

	文献[1]方法	文献[2]方法	文献[5]方法	本文方法
WFQI	0.636 3	0.911 0	0.895 5	0.911 2
EFQI	0.606 9	0.899 9	0.874 8	0.901 5

由表 1 和表 2 的客观评价数据,可以得出以下的结论:

(1)在 WFQI 方面,文献[1]融合结果性能最差,说明基于 RGB 空间的融合方法难以保留源图像的信息。文献[2,5]及本文方法融合结果性能明显提高,体现了基于 HIS, YUV 空间方法的合理性。其中,文献[2]优于文献[5],这体现了空间域融合在保留源图像信息上的优势。本文方法在保

留源图像信息上效果最好,因为以亮度分量的融合情况“指导”其他分量融合的做法既充分利用了源图像的灰度信息,又保持了源图像的色彩信息。

(2)在 EFQI 方面,本文方法优于其他方法。可见,本文方法能够更好地保留源图像的边缘信息,更加符合人类的视觉特征。这说明本文方法在继承了空间域融合方法优势(很好保留源图像有用信息)的基础上,解决了空间域融合方法在细节表现力上的不足,这得益于 NSCT 得到的高频系数具有良好的方向性,能够充分反映图像的细节信息。

## 5 结束语

本文从色彩空间模式和融合方法两方面入手,提出了一种基于非下采样 Contourlet 变换的空间域彩色多聚焦图像融合方法。一方面,与 RGB 空间的融合方法相比,本文通过对亮度分量像素点的选取去“指导”源图像各分量中像素点的选取,保持了源图像各分量之间的比例关系,解决了 RGB 空间融合方法容易导致的颜色失真。同时,本文方法仅对亮度分量进行融合,降低了运算复杂度。另一方面,本文方法将 NSCT 与空间域融合方法结合,在保留图像有用信息的同时,弥补了传统空间域方法在细节表现力上的不足,更加符合人类的视觉特征,这得益于 NSCT 具有良好的方向性以及融合准则能够准确提取细节信息。此外,本文的融合方法还可以用于灰度多聚焦图像融合中,实践证明,取得了很好的融合效果。

**致谢** 本文使用的彩色多聚焦图像由 A. Goshtasby 及 Image Fusion systems Research 公司提供,在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 王亚杰,李殿心,徐心和,等. 基于双树复小波变换彩色多聚焦图像融合方法[J]. 计算机工程与应用, 2007,43(28):12-14,40.  
Wang Y J, Li D Q, Xu X H. Color multi-focus image fusion method based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Computer Engineering and Applications, 2007,43 (28):12-14,40.
- [2] Huang W, Jing Z L. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion [J], Pattern Recognition Letters,2007,28(4) :493 - 500.
- [3] 徐胜男,陈桂友,池海,等. 基于离散小波框架变换的彩色多聚焦图像融合算法[J], 计算机应用, 2005, 25(3):580-582.  
Xu S N, Chen G Y, Chi H. Color multifocus image

- fusion based on discrete-wavelet frame transform[J], Computer Applications, 2005,25(3):580-582.
- [4] Bogoni L, Hansen M W. Pattern-selective color image fusion[J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 34 (8):1511-1526.
- [5] 付朝霞,韩炎,刘晓利,等. 一种新的多聚焦彩色图像融合方法[J]. 中国体视学与图像分析,2006,11(3): 222-225,229.  
Fu Z X, Han Y, Liu X L, A new method for multi-focus color image fusion[J]. Chinese Journal of Stereology and Mage Analysis, 2006, 11 (3): 222-225, 229.
- [6] 章毓晋. 图像处理[M]. 北京:清华大学出版社,2003: 17-21.  
Zhang Y J. Image Processing and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 17-21.
- [7] 何小海. 图像通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005: 4-7.  
He X H. Image Communication[M]. Xian: Xidian University Press, 2005: 4-7.
- [8] Minh N D, Vetterli M. Contourlets: a directional multiresolution image representation [C] // Proc of IEEE International Conference on Image Processing, Rochester:IEEE, 2002: 357-360.
- [9] Minh N D, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [10] Zhou J P, Cunha A L, Minh N D. Nonsubsampled contourlet transform: construction and application in enhancement[C]// Proc of IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: IEEE, 2005: 469-472.
- [11] Cunha A L, Zhou J P, Minh N D. Nonsubsampled contourlet transform: filter design and applications in denoising[C]//Proc of IEEE International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: IEEE, 2005: 749-752.
- [12] Cunha A L, Zhou J P, Minh N D. The nousubsampled contourlet transform: Theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006,15(10):3089-3101.
- [13] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion [C] // Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. Barcelona, Spain: IEEE,2003: 173-176.

**作者简介:**蔡志芳(1973-),女,讲师,研究方向:信号与信息处理,E-mail:361203@163.com;孙巍(1978-),女,讲师,博士,研究方向:汽车内燃机。