

# 基于多方向 $\hat{\alpha}$ trous 小波变换的多传感器图像融合

李俊峰,李其申,赵喜玲,江泽涛

LI Jun-feng, LI Qi-shen, ZHAO Xi-ling, JIANG Ze-tao

南昌航空大学 计算机学院, 南昌 330063

Faculty of Computing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

E-mail: jflee2006@sina.com

LI Jun-feng, LI Qi-shen, ZHAO Xi-ling, et al. Multi-sensor image fusion algorithm based on multi-directional  $\hat{\alpha}$ trous wavelet transform. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(30): 193-195.

**Abstract:** The construction of NonSubsampled Directional Filter Bank(NSDFB) and  $\hat{\alpha}$ trous wavelet transform which is full shift invariant are introduced, and a novel multi-sensor image fusion scheme based on NSDFB combining  $\hat{\alpha}$ trous wavelet transform for multi sensor images is proposed. Firstly, each source image is decomposed in highpass subbands and lowpass subbands by  $\hat{\alpha}$ trous wavelet transform, and the highpass subbands are decomposed in multi-directional high pass-bands respectively by NSDFB. Then different fusion rules are used in different subbands, where local gradient preferential image fusion rule is adopted in highpass subbands and average image fusion rule is adopted in lowpass subbands. Finally the fused image is reconstructed by taking inverse NSDFB transform and inverse  $\hat{\alpha}$ trous wavelet transform. The experimental results show that the performance of the novel algorithm is better than the traditional fusion algorithms based on wavelet transformation, and especially, the novel fusion algorithm can effectively eliminate the spectrum warping and the artificial edges caused by wavelet transform.

**Key words:** image fusion; nonsubsampled directional filter bank;  $\hat{\alpha}$ trous wavelet transform; shift invariant

**摘要:**分析和研究了非下采样方向滤波器组及具有平移不变性的  $\hat{\alpha}$ trous 小波变换的图像变换的优点,提出了一种基于多方向  $\hat{\alpha}$ trous 小波变换的图像融合方法。首先利用  $\hat{\alpha}$ trous 小波变换将待融合源图像分解成不同尺度,不同分辨率的高低频分量,再对高频分量利用非下采样方向滤波器组进行方向分解,然后采取不同的融合方法对分解的高低频分量进行融合处理,低频系数采取平均加权法融合,高频系数则采取局部梯度优先的加权法融合,最后将融合的各频带进行逆非下采样方向滤波器组变换和逆  $\hat{\alpha}$ trous 小波变换得到融合图像。实验表明,在几种不同的客观评价标准下,该方法优于传统小波域中的融合效果,能有效地消除小波变换所带来的光谱扭曲和假边缘现象。

**关键词:**图像融合;非下采样方向滤波器组; $\hat{\alpha}$ trous 小波变换;平移不变性

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2008.30.059 文章编号:1002-8331(2008)30-0193-03 文献标识码:A 中图分类号:TP391

## 1 引言

图像融合是将两幅或者多幅具有不同信息表达形式的图像进行融合,使得融合图像在信息的表达上更能满足人们需要的一种图像处理方法。图像融合的实质是利用待融合图像在时空上的互补性、冗余性,从而使融合图像对场景和目标的表达更加全面,更加有利于人们分析和理解的过程。现有的图像融合方法大体经历3个阶段:简单的融合方法<sup>[1]</sup>、基于塔式分解的融合方法<sup>[2-3]</sup>以及基于小波分解方法<sup>[4-5]</sup>。

小波变换作为一种图像的多尺度、多分辨率分解工具,具有良好的空域和频域特性,在图像融合领域得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。该方法较容易提取图像的细节信息,在一定程度上能够满足图像融合的一般要求,且融合效果要优于一般早期传统的融合算<sup>[4-5]</sup>。但基于小波变换的融合方法并非完美,实验证明,小波变换的

优势主要体现在对一维信号的奇异性检测上,而对于二维图像信号,小波只能以“点”奇异来逼近“线”奇异,这样就不能稀疏地表示原来信号的特征<sup>[7]</sup>。另外小波变换只能检测有限方向上的边缘信息且变换不满足平移不变性,这使得变换后图像的信息缺失较大,融合后的图像容易产生假边缘和光谱扭曲等现象<sup>[8-9]</sup>。

鉴于上述原因,本文介绍了一种具有多方向,多分辨率分解的图像变换方法。该变换结合了  $\hat{\alpha}$ trous 小波和非下采样方向滤波器组,具有平移不变性和方向分解的优点,能很好地消除图像的频谱泄露和频谱混叠等缺陷,能更好地表现图像的细节特征<sup>[10]</sup>。将该变换应用在图像融合中,能较好地消除了小波变换方法在融合图像中出现的假边缘和光谱扭曲现象。

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60673055)。

作者简介:李俊峰(1982-),男,硕士研究生,研究领域:图像处理与模式识别;李其申(1975-),男,博士,副教授,研究领域:图像处理与模式识别、生物信息学。

收稿日期:2007-12-03

修回日期:2008-01-31

## 2 多方向 àtrous 小波变换(MD-AT)

### 2.1 àtrous 小波变换

àtrous 小波变换是一种无抽取离散小波变换方法,其在变换中没有进行下采样操作,具有各向同性和平移不变性。具体操作是:利用低通滤波器  $h_0$  作为尺度函数与图像  $P$  进行卷积可以得到图像  $P$  的近似图像序列  $p_1 \cdots p_N$ 。其中作为卷积核的  $h_0$  可由三次 B 样条函数得到,如一维尺度的  $h_0$  为:  $h_0 = (1/16) * [1, 4, 6, 4, 1]$ 。分解的细节信息  $dw_j$  可通过相邻近似图像的差值计算得到,即  $dw_j = p_{j-1} - p_j$ , 其中  $j=1, \dots, N, p_0 = P$ 。从上述过程可知,其重构公式为:

$$P_r = p_N + \sum_{j=1}^N dw_j \quad (1)$$

其中  $P_r$  为重构图像,  $N$  为分解层数<sup>[10]</sup>。

### 2.2 非下采样方向滤波器组(NSDFB)

非下采样方向滤波器组类似于传统的方向滤波器组,也是将图像频谱分解成各个方向的楔形区域,但它没有像传统方向滤波器组一样在设计中使用下采样因子,而是利用等效移位原理,去除了下采样操作,这就是所谓的非下采样滤波器组<sup>[11]</sup>。非下采样方向滤波器组是利用互补扇形滤波器作为基本模块,对其进行相应地上采样和线性变换而得到具有不同方向支撑域的滤波器组。双通道互补扇形滤波器  $U_0$  和  $U_1$  如图 1 所示。

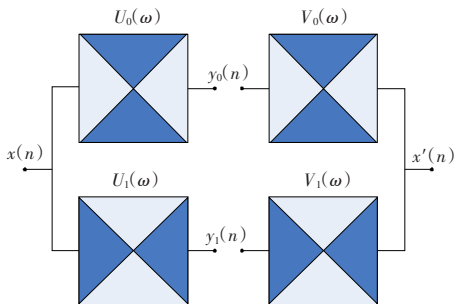


图1 双通道互补扇形滤波器

要使分解后能完全重构,扇形滤波器组必须满足条件:  $U_0(\omega)V_0(\omega) + U_1(\omega)V_1(\omega) = 1$ 。  $U_0(\omega)$  和  $U_1(\omega)$  的设计是以一维分数阶样条正交滤波器为原型,在 McClellan 变换中利用映射函数  $P(\omega_1, \omega_2) = (\cos \omega_2 - \cos \omega_1) / 2$  而得到的。然后对扇形滤波器进行 Quincunx 矩阵  $Q$  和幺模矩阵  $R_i (i=0, 1, 2, 3)$  上采样操作,可得到棋盘滤波器和平行四边形滤波器。如图 2 所示为扇形滤波器分别经过  $Q$  上采样和  $R_1$  上采样所得到的棋盘滤波器和平行四边形滤波器,矩阵  $Q$  和  $R_i (i=0, 1, 2, 3)$  分别为:

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \quad R_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

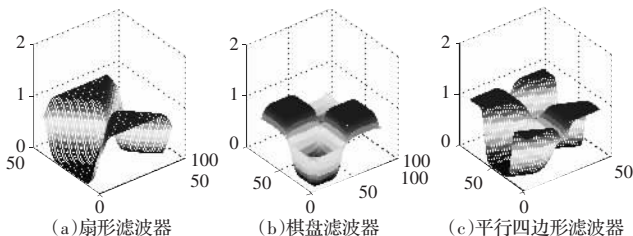


图2 滤波器对应的频率响应

多方向非下采样滤波器组可由上述三个基本滤波器级联而成。如 4 方向非下采样滤波器组是利用扇形滤波器与棋盘滤波器级联而成的,如图 3 所示。而 8 方向非下采样滤波器组是利用 4 方向滤波器组和平行 4 变换滤波器级联而成。对于 16 方向或更多方向滤波器组的构造可以用类似的方法得到。

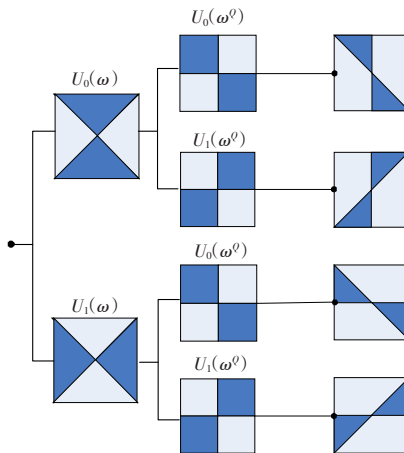


图3 4方向非下采样滤波器组

上述变换是一个可逆的过程,所以其重构滤波器组的构造与分解滤波器组的构造类似。

### 2.3 多方向 àtrous 小波变换

àtrous 小波变换是一种有效的多分辨率分解,但缺乏多方向性。非下采样方向滤波器组(NSDFB)在满足了平移不变性的同时,继承了多方向分解的优点,能检测图像多个方向的细节信息,但其缺乏多分辨率分解的特性,所以将两者进行有效结合则在满足图像多分辨率变换的同时,对图像进行多方向分解,即多方向 àtrous 小波变换(MD-AT)。分解过程可以通过迭代的方式进行多级分解,每一级分解都是对低频分量进行相同的 àtrous 变换和 NSDFB 分解。主要的分解过程如图 4 所示:

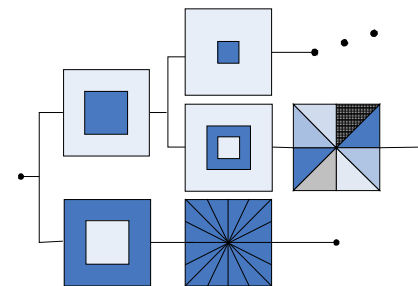


图4 多方向 àtrous 小波变换总体框架

## 3 基于 MD-AT 的多传感器图像融合

多传感器图像是通过不同传感器而采集的具有不同特点图像,将多传感器图像进行有效的融合,可以使融合图像在信息和目标的表达上更适合人们的认识和理解。本文以两副多传感器图像  $A, B$  为例,说明多方向 àtrous 小波变换的图像融合算法。具体的融合过程分为以下几步:

- (1) 对  $A, B$  分别作  $N$  级 àtrous 变换,得到其高低频分量。
- (2) 对  $A, B$  变换后的高频分量分别进行 NSDFB 分解,分别得到不同方向的高频信息。
- (3) 对步骤(1)、(2)得到的低频分量和每一级不同方向的高频分量分别利用不同融合规则进行融合。

具体的融合规则是:低频分量采取平均加权法融合,即: $c_f^N = (c_A^N + c_B^N)/2$ 。 $c_A^N$ 、 $c_B^N$ 和  $c_f^N$  分别是  $A$ 、 $B$  图像的低频分量及其融合的低频分量。高频分量采用局部梯度优先的加权法融合方法,首先对同一级相应方向的高频系数进行分块,每一块的大小选取为  $3 \times 3$ 。然后计算两幅图像高频信息对应块的平均梯度,通过平均梯度决定各方向高频系数的融合权值。假设  $A$ 、 $B$  图像第  $k$  级高频分量的第  $i$  方向的第  $j$  子块的高频信息为  $d_{A_i}^{k_j}$  和  $d_{B_i}^{k_j}$ ,则  $d_{F_i}^{k_j} = w_j^{k_i} * d_{A_i}^{k_j} + (1 - w_j^{k_i}) * d_{B_i}^{k_j}$ ,其中,  $d_{F_i}^{k_j}$ 、 $w_j^{k_i}$  为第  $k$  级高频分量第  $i$  方向的第  $j$  块的融合系数和融合权值。权值计算如式(2)所示:

$$w_j^{k_i} = \begin{cases} T & \text{grad}(d_{A_i}^{k_j}) \geq \text{grad}(d_{B_i}^{k_j}) \\ 1-T & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $T$  为对应的阈值,  $T \in (0, 1)$ , 一般选取其值为  $0.4 \sim 0.9$ ,  $\text{grad}(d_{x_i,j,k}^l)$  为第  $i$  子块的平均梯度。

(4)通过以上 3 步计算,可得到各分量的融合系数,然后对各融合系数进行相应得 NSDFB 逆变换分别得到每一级各方向的高频融合系数,再对各级高频融合系数和低频融合系数进行  $\alpha$ trous 逆变换,就可以得到的融合图像。

#### 4 实验及结果评价

选取两组 256 灰度级的多传感器图像进行实验,分别是医学图像(CT/MIR)和红外与可见光图像(Infrared/Visible),大小都为  $256 \times 256$  像素。实验还将本文提出的 MD-AT 方法的融合结果与小波变换(DWT)的融合结果做了比较。MD-AT 变换方法进行三层  $\alpha$ trous 变换,每一层高频系数的方向分解数为 8,4,4。DWT 进行了三层分解,采用的小波函数是“db4”。经过大量实验证明,高频系数融合的阈值  $T=0.8$  时,融合效果较好。融合的结果如图 5、图 6 所示。

主观分析:图 5 中基于 DWT 的融合图像(c)明显存在较大的光谱扭曲现象,并伴有虚假边缘,如图中矩形框内所示。相对应的 MD-AT 变换的融合图像(d)则边缘就较为光滑,没有明显的虚假边缘存在。图 6 中(c)图像右下角也存在虚假信息,并且整个图像从视觉效果上看,平整度不如(d)图像,且其光谱扭曲现象明显。所以从图 5、图 6 可看出,在人体视觉效果上分析,MD-AT 变换方法要优于传统的 DWT 方法。

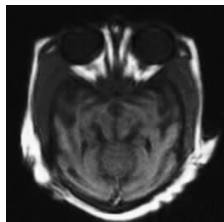


图 5(a)MIR 图像



图 5(b)CT 图像

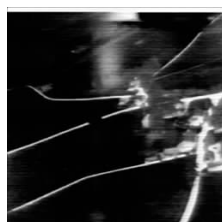


图 6(a)Infrared 图像



图 6(b)Visible 图像

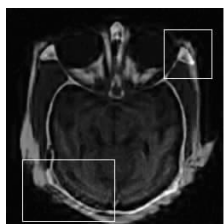


图 5(c)DWT 融合图像

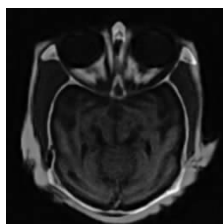


图 5(d)MD-AT 变换的融合图像



图 6(c)DWT 融合图像



图 6(d)MD-AT 变换的融合图像 (下转 231 页)

客观分析:为进一步对融合效果进行客观评价,本文采用常用的信息熵、标准差、偏差、交互信息量、相关系数评价参数作为融合图像定量的评价标准<sup>[12]</sup>。表 1 给出了 MD-AT 融合方法与小波变换融合方法的评价参数表。

表 1 融合图像的客观评价参数

		信息熵	标准差	偏差	相关系数	互信息量
CT/MIR	DWT	6.188 7	37.463 1	27.882 1	0.699 0	2.958 5
	MD-AT	6.064 5	37.487 9	27.717 9	0.708 0	3.542 2
Infrared/Visible	DWT	7.171 5	41.536 0	65.410 7	0.658 3	5.161 0
	MD-AT	7.159 1	40.501 1	65.200 0	0.667 2	5.601 4

信息熵是衡量图像信息量大小的一个重要指标,其值越大表明图像包含的信息量越大。标准差反映了图像灰度值相对于平均值的离散状况,标准差越大,图像灰度级分布分散,反差越大。偏差是融合图像与源图像的差值的灰度平均值,是光谱扭曲程度的重要指数。偏差越小说明融合效果越好,光谱扭曲程度也就越低。相关系数是描述光谱特征的相似性,即保持光谱特性的能力,融合结果光谱信息保持越多,相关系数越大,理想情况应接近于 1。交互信息量是几个变量相关性的量度,即反映融合图像包含源图像信息量的量度。其值越大表示融合图像从源图像中获取的信息量越大,融合效果也越好。

评价参数分析,从所列的评价参数可以看出,MD-AT 方法融合图像在偏差、相关系数、互信息量三个参数中要优于所对应的 DWT 融合图像的评价参数。说明基于 MD-AT 方法的融合图像在图像灰度分布、光谱保持能力及与源图像的相关性保持度上要优于 DWT 方法。而 DWT 方法的融合图像因为存在一定的假边缘信息和光谱扭曲等现象,所以融合图像的虚假边缘和不合理的光谱信息充当了图像的信息量,从而增大了融合图像的信息熵和图像灰度的分布,这种增大在客观上是与源图像信息量的背离,并且在视觉特性上这种与源图像信息量背离的现象是不合理的<sup>[13]</sup>。因此从表 1 中可看出,DWT 方法的融合图像的信息熵和标准差要高于 MD-AT 方法。综合考虑所给参数,可以看出基于 MD-AT 变换的融合方法在所给的评价参数中融合效果上要优于 DWT 的融合方法。

#### 5 总结

本文介绍了非下采样方向滤波器组的构造、特性,分析了