

基于双密度双树复数小波变换的图像融合研究

岳 晋^{①②} 杨汝良^② 宦若虹^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘 要: 双密度双树复数小波变换综合了双密度小波、双树小波和复数小波的优点, 具有平移不变性以及良好的方向性, 将其引入图像融合能够更好地提取原始图像的特征, 为融合图像提供更多的信息。该文提出一种基于双密度双树复数小波变换的图像融合方法, 首先将图像进行双密度双树复数小波变换, 然后在相应尺度上利用融合规则将变换系数融合, 最后进行重构得到融合结果。采用多组具有不同特征的源图像进行融合实验, 并对融合图像进行了主客观评价。实验结果表明, 该文方法的融合效果优于传统的小波变换方法。

关键词: 图像处理; 图像融合; 双密度双树复数小波变换

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0129-05

Research on Image Fusion with Double Density Dual-Tree Complex Wavelet Transform

Yue Jin^{①②} Yang Ru-liang^② Huan Ruo-hong^{①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China*)

^②(*Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Double Density Dual-Tree Complex Wavelet Transform (DDDCWT) integrates the advantages of double density wavelet, dual tree wavelet and complex wavelet. It has translation invariability and improved directionality. When it is introduced to image fusion, the characteristics of original images are extracted better and more information for fusion is obtained. A novel image fusion method based on DDDCWT is proposed in this paper. Firstly, the source images are decomposed using DDDCWT, then the transform coefficients are fused with the fusion regular in the corresponding scales, and finally the fused coefficients are reconstructed to obtain fusion results. The proposed method is successfully used to merge several sets of multi-sensor images with different modalities. The experimental results indicate that the proposed approach can significantly outperform the traditional wavelet-transform-based image fusion method.

Key words: Image processing; Image fusion; Double Density Dual-Tree Complex Wavelet Transform(DDDCWT)

1 引言

图像融合是以图像为主要研究内容的技术, 是将相同或不同传感器得到的同一目标的多幅图像在统一的坐标中, 利用图像融合算法合成一幅图像的过程。由于待融合的多幅图像之间具有信息的冗余性和互补性, 经过图像融合技术得到的合成图像可以更全面、更精确地描述所研究的对象, 为进一步图像处理和分析提供高质量数据。因此, 图像融合技术在军事、医学、遥感、计算机视觉等领域得到了广泛的应用。

近年来, 多分辨率分析在图像处理中得到了广泛的应用, 同时也被成功地用于图像融合。Burt^[1]利用拉普拉斯金字塔提出了最早的多分辨率图像融合方法, 随后比率低通金字塔^[2]、梯度金字塔^[3]等各种金字塔技术被应用于图像融合。随着小波变换技术的发展, 小波多分辨率分析以其良好的数

学性质被广泛地应用于图像融合领域。小波变换是图像融合的有效手段, 它不仅提供了方向信息, 而且还可以通过选取不同的正交小波核函数使不同分辨率包含唯一的信息。目前, 随着小波变换快速算法的出现, 基于小波变换的图像融合方法^[4-7]已成为现今研究的热点。

尽管离散小波变换功能强大, 但有以下缺点: (1)对数据敏感, 即输入数据的变化会对离散小波变换系数产生不可预测的结果; (2)方向性差, 即离散小波变换系数只表示 3 个空间方向(水平、垂直和对角线)的信息; (3)没有相空间信息, 而相空间信息对描述非平稳信号很重要。连续小波变换虽具有平移不变性, 但它的冗余数据多, 计算代价太大。1999 年 Kingsbury 提出了双树复数小波变换(Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DTCWT)^[8,9], 具有平移不变性, 提供了 6 个方向的信息, 因而具有较好的方向性和精确的相空间信息。2004 年 Selesnick 提出了双密度双树小波变换(Double Density Dual-Tree Wavelet Transform, DDDTWT)^[10], 它

同时具有双密度小波变换和双树小波小波变换的优点, 在图像去噪、图像增强、图像分割和运动目标的估计中具有较大优势^[11]。

本文在双密度双树小波变换的基础上, 提出了一种新的基于双密度双树复数小波变换(Double Density Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DDDTCWT)的图像融合方法。利用双密度双树复数小波变换对图像几何特征更优的表达能力有效地提取原始图像的特征, 为融合图像提供更多的信息。实验采用了多组具有不同特征的源图像。实验结果表明, 该方法远远优于现有的小波变换方法。

2 双密度双树复数小波变换原理

2.1 二维双密度双树小波变换原理

二维双密度双树小波采用了 3 个 Hilbert 滤波器对, h_0 为低通滤波器, h_1 为一阶高通滤波器, h_2 为二阶高通滤波器。二维双密度双树小波变换有 2 个尺度, 4 个分辨函数, 即 $\psi_{h,i}(t)$, $\psi_{g,i}(t)$, $i = 1, 2$ 。

两个小波函数是将另一个函数偏置一半得到的, 即

$$\psi_{h,1}(t) \approx \psi_{h,2}(t - 0.5) \tag{1}$$

$$\psi_{g,1}(t) \approx \psi_{g,2}(t - 0.5) \tag{2}$$

另外两个小波函数是近似 Hilbert 变换对, 即

$$\psi_{g,1}(t) \approx H|\psi_{h,1}(t)| \tag{3}$$

$$\psi_{g,2}(t) \approx H|\psi_{h,2}(t)| \tag{4}$$

二维双密度双树小波变换的设计过程参见文献[10], 其尺度为 2 的变换分解步骤如图 1 所示。它每一层有 6 个方向因子。

2.2 二维双密度双树复数小波变换原理

Kingsbery 提出在同一个数据上, 用两个独立的小波变换平行作用来实现复数小波变换^[8], 双密度双树复数小波变换可通过二组 3 对滤波器同时作用在输入数据上来实现。双密度双树小波每层变换仅对低频部分进行进一步分解, 没有对高频部分进行再分解, 显然高频部分也包含许多有用的信息。因此, 在对低通滤波器进行分解的同时, 对 2 个高通滤

波器也进行进一步分解, 并通过将两棵树的系数进行组合, 用上部树 A 的叠加滤波器组表示复数小波变换的实部; 下部树 B 的叠加滤波器组表示复数小波变换的虚部, 即形成双密度双树复数小波变换(DDTCWT), 即

$$\psi_{j,k}(x,y) = \psi_{h(j,k)}(x,y) + i\psi_{g(j,k)}(x,y), \quad j,k = 0,1,2 \tag{5}$$

其尺度为 1 的变换分解如图 2 所示。从图 2 可以看出, 每棵树有 9 个子带, 其中 6 个子带 $hi1$, $hi2$, $hi3$, $hi5$, $hi6$, $hi7$ 具有方向性信息, 因而每一层分解有 12 个不同方向的信息, 且无论二维双密度双树复数小波变换分解树有多深, 每层都保持 12 个方向的信息, 比二维实数小波变换多了 6 个方向。因此可以进一步提高图像的分解与合成的精度, 从而更好地提取原始图像的信息。

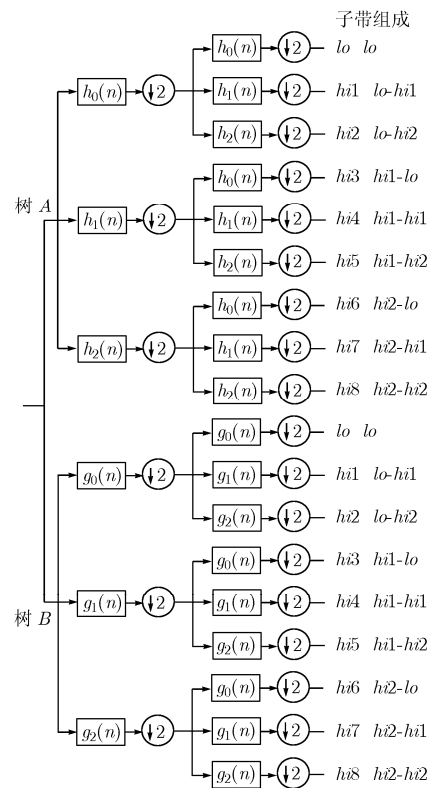


图 2 二维双密度双树复数小波变换的分解

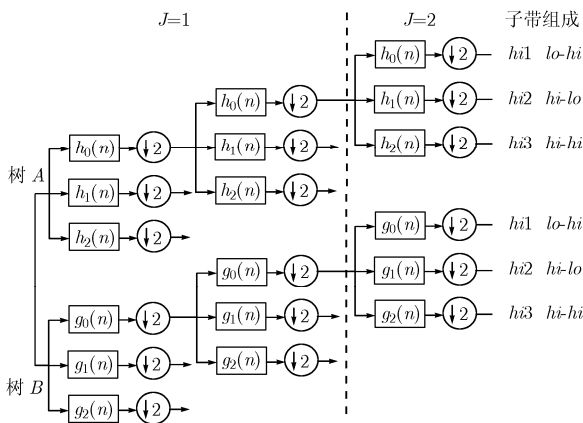


图 1 二维双密度双树小波变换的分解

3 基于双密度双树复数小波变换的图像融合算法

3.1 图像融合方案

若对二维图像进行双密度双树复数小波变换, 最大分解层数为 N , 最终有 $(N+1)$ 个不同频带, 其中包括 N 个高频带和一个低频带。这里以两幅图像的融合为例, 对多幅图像的融合方法可以由此类推。设 A, B 为精确配准的源图像, 其融合处理的基本步骤如下: (1)对每一源图像进行双密度双树复数小波变换; (2)对各个频带层分别按照一定的融合算子进行融合; (3)得到融合后的各个高频带和低频带小波系数; (4)根据融合后的各个高频带和低频带小波系数进行图像重构, 得到融合后的图像。

图 3 给出了图像融合算法的示意图。

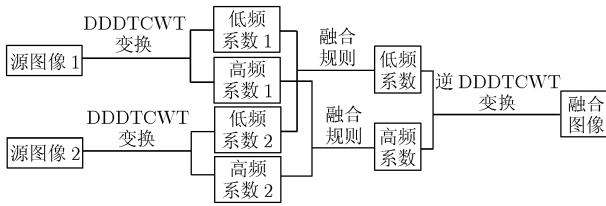


图 3 基于双密度双树复数小波变换的图像融合算法

3.2 融合规则及算子的确定

在图像融合过程中, 融合规则及融合算子的选择对于融合的质量至关重要。为使算法简单, 且能获得视觉特性更佳、细节更丰富、突出的融合效果, 采用如下简单融合规则。

(1)对分解后图像的低频部分, 即图像的“粗像”(位于最高分解层), 采用加权平均的方法;

(2)在源图像中, 明显的图像特征, 如直线、曲线、轮廓和区域等, 往往表现为灰度值及其变化, 而在 DDDTCWT 变换域则表现为变换系数的模值大小。尤其是图像的边缘等细节特征在 DDDTCWT 域中表现为一些“模值”较大的高频系数。或者说, DDDTCWT 域中模值较大的高频系数包含了更多的边缘等纹理信息。因此, 对待融合图像, 简单地取模值较大的高频分量, 得到的融合图像的细节更丰富、更清晰。

4 实验及结果分析

为了验证该融合算法的效果, 对具有不同特征的源图像进行了融合实验, 并将融合结果与常用的'db4'小波变换得到的融合结果进行了比较。为了使融合结果的比较更具有一般性, 两种算法采用相同的融合规则, 分解层数均为 3 层。

图 4, 图 5 是不同聚焦的 2 幅图像融合, 其目的是解决因不同聚焦而引起的图像局部模糊。图 4 是对清晰图像的左右两部分分别进行模糊处理(即低通滤波), 作为待融合的 2 幅输入图像。图 5 是实际 2 幅多聚焦图像。从融合结果可以看出, 采用'db4'小波变换和本文 DDDTCWT 融合算法都能得到很好的融合效果, 得到目标都比较清晰的图像。但通过

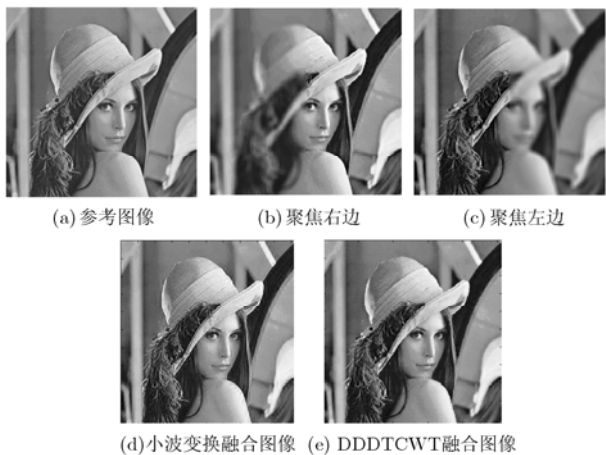


图 4 人工多聚焦图像及其融合结果

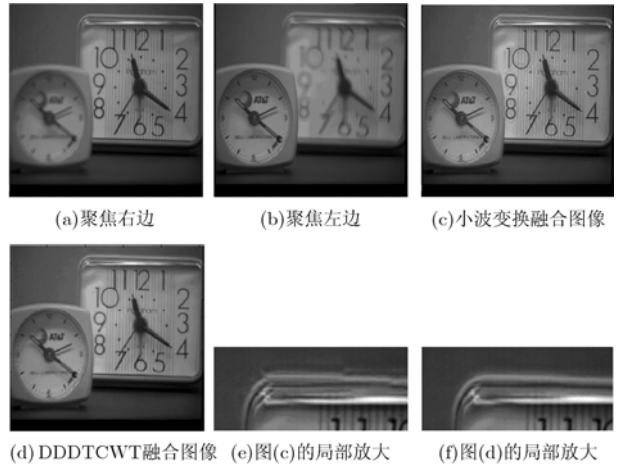


图 5 实际多聚焦图像及其融合结果

比较可以看出, 采用'db4'小波得到的融合图像边缘模糊且有许多“重影”, 而采用 DDDTCWT 方法得到的融合图像则有效地保留了边缘信息, 使融合图像更为清晰, 效果更好。

图 6 为医学 CT 和 MRI 图像的融合。CT 和 MRI 图像得到的均是断层扫描图像, 然而各有其不同的特性。CT 图像中图像亮度与组织密度有关, 骨骼在 CT 图像中亮度高, 一些软组织在 CT 图像中无法反映; MRI 图像中图像的亮度与组织中的氢原子等的数量有关, 一些软组织在 MRI 图像中亮度高, 而骨骼在 MRI 图像中无法显示; 这两类图像中所包含的信息中有很多是“互补”的。从融合结果可以看出, 两种融合算法都能有效地提取源图像中的有效信息; 但经过比较可以发现, 图像 6(d)的对比度更大, 融合图像包含的细节成分更多, 可视效果更好。

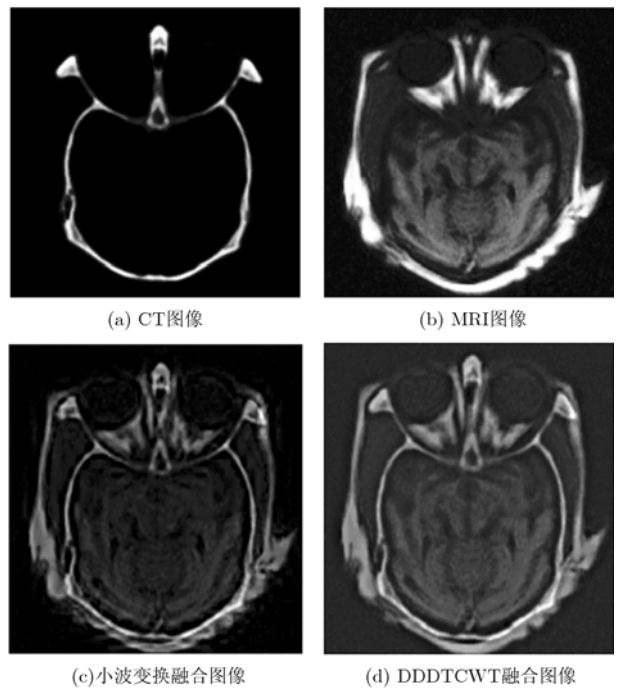


图 6 医学 CT 和 MRI 图像及其融合结果

表1 不同融合算法的性能比较

	人工多聚焦图像		实际多聚焦图像		医学图像		红外可见光图像	
	MSE	d	EMI	PMI	EMI	PMI	EMI	PMI
小波变换方法	23.5742	0.0336	0.6232	4.4161	0.5867	1.4253	0.6342	1.1880
本文方法	7.0301	0.0175	0.6719	4.6774	0.7440	1.6013	0.6755	1.2574

图7为同一场景的可见光图像和红外图像的融合,主要是为了解决单一可见光图像受天气、光照强度等因素影响和红外图像对比度低等问题。从融合结果可以看出,两种融合算法都能有效地提取可见光图像和红外图像中的有用信息,从而能够显著地降低人或机器在目标识别中的错误。但也能看出,图像7(d)的对比度更大,可视效果更好。

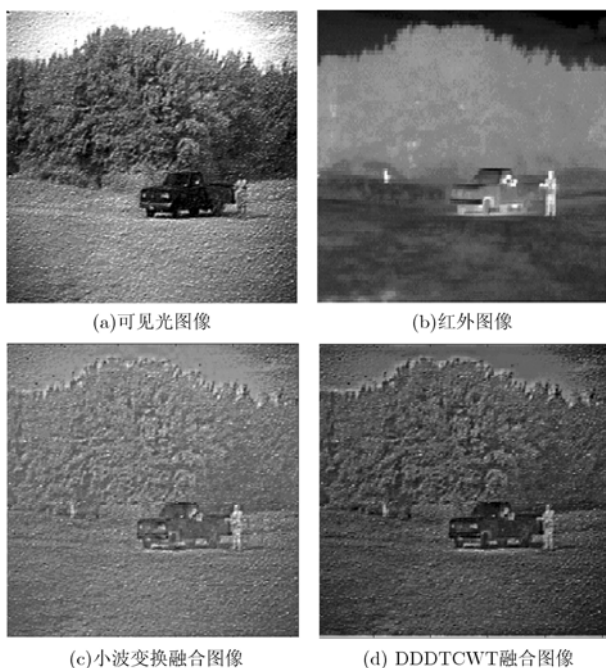


图7 可见光与红外图像及其融合结果

对于人工多聚焦图像,由于存在原始清晰图像,因此采用均方误差(Mean Square Error, MSE)和偏差指数 d 作为评价融合效果的标准。均方误差越小,说明融合图像与理想图像的平均差异越小,融合效果越好。偏差指数表示融合图像和理想图像的偏离程度。偏差指数越小,说明两幅图像越接近,边缘细节信息保持得越好。

对于实际多聚焦图像、红外可见光图像和医学图像,由于没有标准参考图像,对于融合效果的客观性能评价采用边缘互信息(EMI)和像素互信息(PMI)^[12]两个评价测度来进行。其中,边缘互信息是由 Xydeas 和 Petrovic^[13]在 2000 年提出的图像融合客观评价测度。它测量融合图像中所“继承”输入图像边缘信息的多少。边缘互信息越大,说明融合后图像保留的边缘信息越多。像素互信息是由我国学者屈贵红

等^[14]提出的信息测度。它采用互信息作为评价指标对融合图像的整体效果进行定量评价。一般说来,PMI 的值越大,表示融合图像从源图像中获取的信息越丰富,融合效果越好。表1给出了两种融合算法的性能比较。

5 结束语

由于双密度双树复数小波变换同时具有双密度、双树小波和复数小波的特性,具有平移不变性,以及良好的方向性和精确的相空间信息,因此可以更好地提取原始图像的特征,为融合提供更多的有用信息。将双密度双树复数小波变换应用于图像融合中,采用4组具有不同特征的源图像进行了融合实验,并对融合质量进行了主客观评价。结果表明,该算法有效可行。双密度双树复数小波变换作为一种新的图像多尺度几何分析工具在图像融合领域有着潜在的应用前景。

参考文献

- [1] Burt P J and Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code. *IEEE Trans. on Communication*, 1983, 31(4): 532-540.
- [2] Toet A. Image fusion by a ration of low pass pyramid. *Pattern Recognition Letters*, 1989, 9(4): 245-253.
- [3] Burt P J. A gradient pyramid basis for pattern-selective image fusion. *Society for Information Display Digest of Technical Papers*, 1985, 16: 467-470.
- [4] Zhang Z and Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application. *Proc. IEEE*, 1999, 87(8): 1315-1326.
- [5] 张学帅, 潘泉, 赵永强, 史慧荣. 基于静态多小波变换的图像融合. *光电子·激光*, 2005, 16(5): 605-609.
Zhang Xue-shuai, Pan Quan, Zhao Yong-qiang, and Shi Hui-rong. Image fusion method based on stationary multiwavelet transform. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(5): 605-609.
- [6] 刘贵喜, 刘纯虎, 凌文杰. 一种基于小波多分辨率分解的图像融合新算法. *光电子·激光*, 2004, 15(3): 344-347.
Liu Gui-xi, Liu Chun-hu, and Ling Wen-jie. A novel algorithm for image fusion based on wavelet multi-resolution decomposition. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2004, 15(3): 344-347.
- [7] 杨志, 毛士艺, 陈炜. 一种新的基于小波对比度的图像融合算

- 法. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 209-211.
- Yang Zhi, Mao Shi-yi, and Chen Wei. New image fusion algorithm based on wavelet contrast. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(2): 209-211.
- [8] Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters. In: Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Work shop, Bryce Canyon, Utah, USA, 1998: 86-89.
- [9] Kingsbury N G. Image processing with complex wavelets. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, 357(9): 2543-2560.
- [10] Selesnick I W. The double-density dual-tree DWT. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2004, 52(5): 1304-1314.
- [11] 张春梅, 张太镒, 陆从德. 一种能保留图像边缘信息的去噪新方法. 中国图象图形学报, 2006, 11(10): 1464-1467.
- Zhang Chun-mei, Zhang Tai-yi, and Lu Cong-de. New method for images denoising while keeping edge information. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(10): 1464-1467.
- [12] 刘刚. 基于多分辨率的多传感器图像融合研究. 上海: 上海交通大学出版社, 2005: 30-32.
- Liu Gang. Research on multiresolution-based multisensor image fusion. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Publication, 2005: 30-32.
- [13] Xydeas C S and Petrovic V. Objective image fusion performance measure. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 308-309.
- [14] Qu Gui-hong, Zhang Da-li, and Yan Ping-fan. Information measure for performance of image fusion. *Electronics Letters*, 2002, 38(7): 313-315.
- 岳 晋: 女, 1980 年生, 博士生, 研究方向为图像处理、图像融合.
- 杨汝良: 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为星载和机载合成孔径雷达.
- 宦若虹: 女, 1979 年生, 博士生, 研究方向为图像处理、模式识别.