

·信号与信息处理·

基于双树复小波变换的多聚焦图像融合方法

杨 伟^{1,3}, 柴 奇^{1,2}, 王黎明¹

(1. 合肥电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 73678 部队, 福建 厦门, 361009; 3. 92602 部队, 浙江 宁波 315031)

摘 要:针对同一场景的多聚焦图像融合, 提出了一种基于双树复小波变换(DT-CWT)的图像融合新算法. 首先利用 DT-CWT 对图像进行多尺度和多方向分解, 并根据双树复小波分解域各子带的系数特性定义了图像局部方向对比度, 然后针对高频分量系数的选择, 采用基于方向对比度的融合规则, 而在低频域采用图像清晰度为测度的融合策略. 实验结果表明, 该算法能够很好地将多聚焦图像中的重要信息提取并注入到融合图像中, 与其他方法相比较, 取得了更好的融合效果, 提高了融合图像的质量.

关键词:图像融合; 双树复小波变换; 清晰度; 平移不变性

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)03-0059-04

Multi-Focus Image Fusion Method Based on Dual-Tree Complex Wavelet Transform

YANG Wei^{1,3}, CHAI Qi^{1,2}, WANG Li-ming¹

(1. Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Unit 73678, Xiamen 361009, China; 3. Unit 92602, Ningbo 315031, China)

Abstract: Focusing on multi-focus image fusion of the same scene, a new image fusion algorithm based on dual-tree complex wavelet transform (DT-CWT) was proposed. Firstly the image was decomposed with various scales and directional features using DT-CWT, the local directive contrast was defined according to the characters of the coefficients of all the sub-bands in the domain of dual-tree wavelet transform, and then the local directive contrast was applied in high frequency parts, and the definition of the image was applied in low frequency parts. Compared with other methods, the experiment results show that the proposed algorithm can extract and infuse the important information of the multi-focus image to the fusion image, the better fusion results are acquired, and the quality of fusion image was improved.

Key words: image fusion; dual-tree complex wavelet transform; image definition; translation invariance

对于同一场景成像时, 由于可见光成像系统的聚焦范围有限, 使得场景中所有目标不能同时形成清晰的像. 因此, 通过图像融合技术把这些不同聚焦的图像融合成一幅能提供所有目标都清晰的像就显得十分重要. 所谓图像融合就是指综合利用各成像传感器得到的不同图像的互补信息和冗余信息, 获得对该场景更为全面、准确的图像描述. 随着科技的

发展, 图像融合技术已经广泛应用于军事、遥感、医学图像处理、自动目标识别以及计算机视觉等领域^[1].

近几年来, 人们提出了很多图像融合的方法, 特别是基于小波变换的融合方法因小波变换良好的时频分析特性及多方向性取得了较好的融合效果并得到广泛应用. 但离散小波变换过程的采样操作使得

收稿日期: 2009-04-05

基金项目: 安徽省重点实验室基金(2007A0103013Y)

作者简介: 杨伟(1982-), 陕西蓝田人, 硕士研究生, 研究方向为光学目标检测、图像处理.

其不具有平移不变性,容易在融合结果中引起图像细节模糊,并且离散小波变换只能提供图像垂直、水平和对角 3 个方向的细节信息,多方向性有限.双树复小波变换(Dual-tree Complex Wavelet Transform, DT-CWT)是 Kingsbury^[2-5]提出的一种具有近似平移不变性、良好的方向选择性、有限的冗余和高效的计算效率的小波变换形式,可以对图像进行更加精确的描述和方向操作,在图像融合领域较传统小波变换更具有优势^[6].

在详细讨论 DT-CWT 的基础上,提出了一种在图像经过 DT-CWT 分解后的低频域采用基于清晰度的融合策略,而在高频域采用基于图像局部方向对比度规则的图像融合方法,并将该方法应用于多聚焦图像融合的研究中.实验结果表明无论视觉效果,还是客观评价,该方法均取得了良好的融合效果.

1 双树复小波变换

双树复小波变换^[7]是一种新的小波变换形式,其与常规的复小波变换完全不同,它独立地使用 2 棵实滤波树来生成小波系数的实部和虚部.图 1 所示为一维信号的 4 层双树复小波分解示意图.双树复小波变换包含了 2 个平行的实小波树,即树 a 和树 b 两个分支,树 a 和树 b 分别产生小波系数的实部和虚部.需要注意的是,双树复小波变换中所有的滤波器都是实值滤波器,仅当 2 棵树合并时才出现复系数,而且所用滤波器经过严格设计,具有不同的延迟,从而使抽样所产生的混叠现象减少到最少,保证了变换过程的平移不变性,图 2 所示为其平移不变性分析.双树复小波变换扩展到二维可以通过使用 2 棵树先对图像的行进行滤波,再用 2 棵树对列进行滤波,这类类似于离散小波变换扩展到二维情况时的方法,不同的是双树复小波分解分别产生指向 $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ$ 和 $\pm 75^\circ$ 的 6 个细节子带图像,而实小波仅只产生水平、垂直和对角 3 个方向的细节子带图像.所以双树复小波变换保持了良好的方向分析能力,能更加有效地抽取图像各个方向的细节特征.

2 基于 DT-CWT 的图像融合算法

2.1 局部方向对比度

根据对人眼生理特点的科学研究,对于灰度图

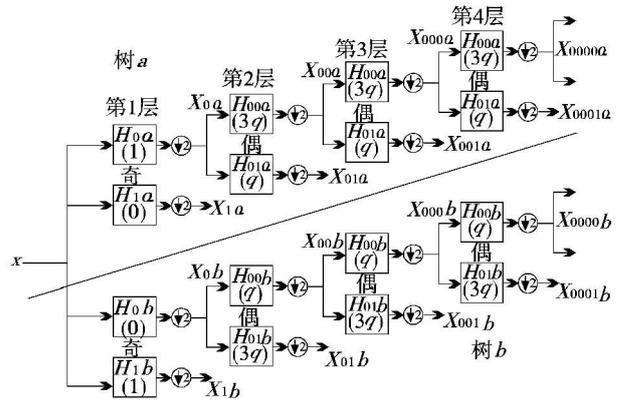
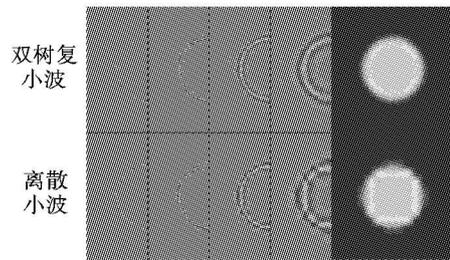


图 1 一维信号的 4 层双树复小波分解



小波:第1层 第2层 第3层 第4层 第4层尺度函数

图 2 二维双树复小波变换的平移不变性分析

像,人类视觉系统对反映图像各区域差异的对比度比较敏感,图像的对比度定义为^[8]

$$C = (I - I_B) / I_B = I_H / I_B \quad (1)$$

其中, C 表示图像对比度; I 表示图像亮度; I_B 表示图像的背景亮度(低频部分); I_H 表示图像的高频部分.根据以上对比度的定义公式,定义 DT-CWT 分解后各子带图像的局部方向对比度为

$$\begin{cases} C_j^1 = |D_j^1| / |A_j^1|, C_j^4 = |D_j^4| / |A_j^2| \\ C_j^2 = |D_j^2| / |A_j^1|, C_j^5 = |D_j^5| / |A_j^2| \\ C_j^3 = |D_j^3| / |A_j^1|, C_j^6 = |D_j^6| / |A_j^2| \end{cases} \quad (2)$$

其中, D 表示 6 个方向的高频子带; J 表示分解层数; A 表示低频子带; $|\cdot|$ 表示复数求模.该对比度定义同时考虑了图像的低频和低频分量,消除了数据相关性,更加合理.

2.2 清晰度

图像清晰度是一个描述图像细节表现能力的物理量,表示相邻影像之间边界的清晰程度,以相邻影像间的边界宽度表示.边界宽度越大表明图像越清晰,反之则图像模糊.图像清晰度侧重表现人类视觉

上对图像清晰和模糊的主观感受以及图像表现的层次.采用八邻域拉普拉斯算子和作为评价图像清晰度的函数^[9],其具有无偏性好、单峰性强、在聚焦平面附近具有变换趋势明显和灵敏度高的特点.八邻域拉普拉斯算子和定义为

$$\nabla^2 f(m, n) \approx |8 \times f(m, n) - f(m-1, n-1) - f(m-1, n) - f(m-1, n+1) - f(m, n-1) - f(m, n+1) - f(m+1, n-1) - f(m+1, n) - f(m+1, n+1)| \quad (3)$$

根据式(3)定义图像的清晰度为

$$G(m, n) = \nabla^2 f(m, n) \quad (4)$$

2.3 算法步骤

设 A, B 分别为 2 幅待融合的多聚焦图像,融合算法具体描述如下:

(1)首先对经过严格配准的源图像 A, B 分别进行 DT-CWT 分解,得到一系列的高频子带图像 $D_{A,J}^i(m, n)$ 和 $D_{B,J}^i(m, n)$,其中 J 为分解层数, i 表示分解方向, $I_{A,L}(m, n)$ 和 $I_{B,L}(m, n)$ 则表示低频子带图像.

(2)图像的低频部分表现的主要是图像的轮廓信息,采取基于清晰度的融合规则,且计算某像素的清晰度时,通常考虑以其为中心的邻域,以消除可能出现的块状效应^[10].规则具体如下式所示

$$CL(m, n) = \sum_{i=-p}^p \sum_{j=-p}^p G(m+i, n+j) \quad (5)$$

其中, $[-p, p]$ 表示邻域区间,且系数选择按下式计算

$$I_{F,L}(m, n) = \begin{cases} I_{A,L}(m, n), & CL_A(m, n) > CL_B(m, n) + T \\ I_{B,L}(m, n), & CL_A(m, n) < CL_B(m, n) - T \\ 0.5 \times I_{A,L}(m, n) + 0.5 \times I_{B,L}(m, n), & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $I_{F,L}$ 表示融合图像的低频子带系数; T 为阈值.

(3)图像的高频部分表现的是图像的细节信息,且对多聚焦图像的成像机理研究表明,多聚焦图像经 DT-CWT 分解后,清晰图像的高频系数远大于模糊图像的高频系数,而其低频系数则相差不大.所以在高频部分,采取基于对比度的融合规则,具体如下

$$D_{F,J}^i(m, n) = \begin{cases} D_{A,J}^i(m, n), & C_{A,J}^i(m, n) \geq C_{B,J}^i(m, n) \\ D_{B,J}^i(m, n), & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $D_{F,J}^i(m, n)$ 表示融合图像的高频子带系数.

(4)最后,对融合后的系数进行 DT-CWT 逆变换,得到融合图像.

3 融合实验和性能评价

实验采用的多聚焦图像如图 3 所示,图 3a 为大闹钟聚焦图像,图 3b 为小闹钟聚焦图像,图 3c 为采用基于离散小波和融合规则(定为方法一)的融合图像,图 3d 为采用基于 DT-CWT 和高频选大规则(定为方法二)的融合图像,图 3e 为采用文中方法的融合图像.实验所用源图像大小为 512×512 ,并且经过严格配准,小波分解层数为 3 层,区域大小取为 3×3 .为了对本方法进行客观评价,分别引入常用的图像均值、平均梯度、信息熵以及标准差作为融合图像质量的客观评价指标.融合图像如图 3 所示,实验结果如表 1 所示.

表 1 融合图像性能评价

融合图像	均值	平均 梯度	信息熵	标准差
方法一融合图像	79.532 5	2.738 5	7.181 6	50.778 9
方法二融合图像	79.510 8	2.775 9	7.250 8	50.825 5
文中方法融合图像	80.321 0	2.850 2	7.262 4	51.102 1

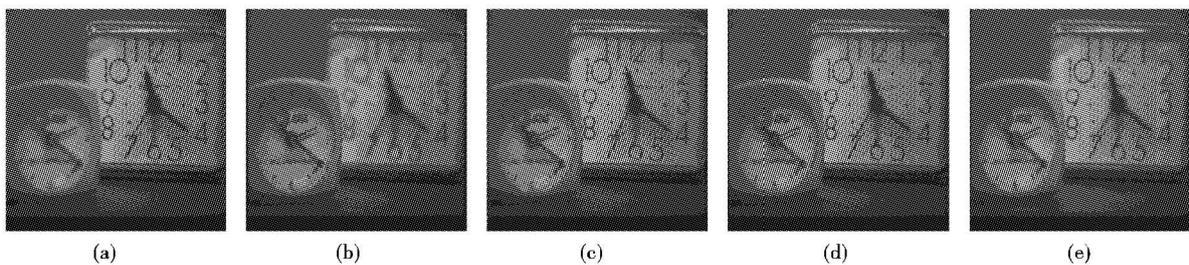


图 3 多聚焦源图像和不同融合方法得到的融合图像

从图 3 融合图像可以看出,各种方法均获得了大小闹钟均清晰的图像,但基于文中方法的融合图像细节表现更加清楚.另外从表 1 中数据也可以看出,此方法得到的融合图像的评价参数均为最好,所以提出的基于 DT-CWT 的多分辨率图像融合方法得到的融合图像最清晰,细节最丰富,包含的信息量最大,融合效果最好,是一种行之有效的方法.

4 结 论

针对多聚焦图像的成像特点,在详细讨论 DT-CWT 的基础上,提出了一种基于 DT-CWT 和图像对比度的图像融合算法.该方法首先利用 DT-CWT 对输入图像进行多尺度和多方向分解,并根据双树复小波域各分解子带的系数特性定义了局部方向对比度,基于此在高频域采用基于方向对比度的融合规则,而在低频域采用基于图像清晰度的融合策略.实验结果表明,该算法能够很好地将不同聚焦图像中的重要信息提取并注入到融合图像中,并且无论是视觉效果还是客观评价参数,与其他方法相比较,该方法均取得了更好的融合效果,提高了融合图像的质量,能够更加有效地融合多聚焦图像.

参考文献

[1] 王红梅,张科,李言俊.基于小波变换的图像融合方法

(上接第 49 页)

整数.为了提高测温精度,要严格按照 DS1820 的时序要求去操作.

5 结 论

在传统的温度测量系统中,往往采用模拟的温度传感器进行设计,必须经过 A/D 转换后才可以被微处理器识别和处理.这样的设计方法不仅对前端模拟信号处理电路提出了更高的要求,而且不具有数字通信和网络功能.结合 DS1820 的新特性和现代温度测量系

(上接第 58 页)

[8] 朱锡芳,吴峰.基于小波阈值法和维纳滤波的稀疏孔径光学系统成像的恢复[J].应用光学,2007,28(5):526-530.

[9] Lucy, L. B. An Iterative Technique for the Rectification of Observed Distributions[J]. The Astronomical Journal,

[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 328-332.

[2] N Kingsbury. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [C]//Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Workshop. Bryce Canyon, Utah, USA;1998:86-89.

[3] N Kingsbury. The dual-tree complex wavelet transform: a new efficient tool for image restoration and enhancement[C]//Processing of EUSIPCO, 1998:319-322.

[4] N Kingsbury. Image processing with complex wavelets [J]. Philosophical Transactions: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1999, 357: 2543-2560.

[5] N Kingsbury. Shift invariant properties of the dual-tree complex wavelet transform[J]. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal, 1999(3):1221-1224.

[6] 杨晓慧,金海燕,焦李成.基于 DT-CWT 的红外与可见光图像自适应融合[J].红外与毫米波学报,2007,26(6):419-421.

[7] 李玲玲.像素级图像融合方法研究与应用[D].武汉:华中科技大学,2005.

[8] 蒲恬,方庆,倪国强.基于对比度的多分辨率图像融合[J].电子学报,2000,28(12):116-118.

[9] 王亚杰,付萍,李殿起,等.基于多策略的多聚焦图像融合方法[J].光电工程,2007,34(8):93-96.

[10] Eltoukhy Helmy A, Kayusi Sam. A Computationally Efficient Algorithm for Multi-focus Image Reconstruction[J]. SPIE,2003, 5017: 332-341.

统提出的新要求,提出了基于智能数字温度传感器 DS1820 的高精度、多点温度测量系统设计方案.该方案具有安装方便、数字化程度高、精度高、适应性强等特点,在多种温度检测中具有广阔的应用前景.

参考文献

[1] 蒋鸿宇. DS18B20 构成的多点温度测量系统的设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用,2004.

[2] 聂毅. 单片机定时器中断时间误差的分析及补偿 [J]. 在微计算机信息,2002,18(4):37-38.

[3] 求是科技. 单片机典型模块设计实例导航 [M]. 北京: 电子工业出版社,2005:166-176.

1974,79(6):745-754.

[10] Holmes, T. J., et al. Light Microscopy Images Reconstructed by Maximum Likelihood Deconvolution, in Handbook of Biological and Confocal Microscopy [M]. 2nd ed. J. B. Pawley, ed.: Plenum Press, Ny, 1995:389-402.