

一种基于小波变换边缘保护的图像融合算法

刘 鹏¹, 张 岩², 毛志刚¹

(1. 哈尔滨工业大学 微电子中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

(pengliu@hit.edu.cn)

摘 要:提出一种基于小波变换的像素级图像融合算法。采用小波系数局部模极大和加权局部能量分析相结合的方法融合高频成分;用加权局部能量分析融合尺度系数。算法获得的融合图像具有很强的视觉表现能力。此算法不需要设置阈值,具有较强的泛化能力。对多聚焦图像进行的融合实验结果表明,基于小波系数局部模极大和局部能量分析相结合的高频融合策略较好地再现了图像中各种边缘信息;基于加权局部能量估计的低频融合策略有效地去除了原图像的模糊。融合后的图像在客观评价和主观视觉效果上均有显著提高。

关键词:小波变换;局部模极大;局部能量分析;图像融合

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

An edge-preserving image fusion algorithm based on wavelet transform

LIU Peng¹, ZHANG Yan², MAO Zhi-gang¹

(1. Microelectronics Center, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilong Jiang 150001, China;

2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518055, China)

Abstract: An image fusion algorithm based on wavelet transform was proposed. The wavelet coefficient local model maximum method and local energy analysis method is used to fuse the high-frequency component, and local energy analysis method was also used to fuse scale coefficient. The result image had good vision representation capability. It did not need to set threshold, so it had effective generalization. The experiment results on several multi-focused images show that the incorporation of the wavelet coefficient local model maximum method and local energy analysis method can emersion and protect the edges, and local energy analysis method used in the low-frequency component fusion, can eliminate the blur in the multi-focused images. This algorithm can improve the quality of the fused image in both objective effect and subjective effect evidently.

Key words: wavelet transform; local model maximum; local energy analysis; image fusion

0 引言

图像融合是数据融合技术的一个典型研究领域,用于改善图像的视觉效果。图像融合可以在三个不同层次上进行:像素级、特征级和决策级,像素级图像融合是特征级和决策级图像融合的基础^[1]。同一场景的多幅图像具有冗余性和互补性,经过图像融合技术得到的合成图像可以更清晰、更全面地再现对象^[2],为进一步图像处理和分析(如目标分割、识别和理解等)提供高质量数据。图像融合技术在医学图像处理、卫星遥感图像处理、计算机视觉、视频处理等领域应用广泛。

在图像融合中,算术平均法是最简单的融合方法,但这种方法对低质量的原始图像往往产生病态的融合结果。尽管一些基于金字塔分解的图像融合算法在一定程度上克服了算术平均法的缺点,但也不能得到令人满意的视觉效果^[3]。小波变换快速算法的开发使小波变换应用到实时信号处理领域,基于小波变换的图像融合算法被广泛报道^[4-6],但在这些方法中,需要根据经验选取融合阈值,降低了算法的泛化能力。

本文使用小波变换在像素级上对小波系数和尺度系数进行分析处理,进行图像融合。小波变换是图像融合的有效手段,可以聚焦于图像的局部结构;图像的奇异性和物体的边缘可以通过小波系数表现出来;图像中物体的轮廓信息通过尺度系数反映出来。如何设计合理的融合策略,得到融合图像的尺度系数和小波系数,从而控制融合图像的品质是基于小波变换的图像融合算法设计的关键^[7]。

本文对小波系数和尺度系数分别设计两个不同的数据融合策略:对小波系数(高频成分)采用局部模极大和局部能量分析相结合的融合方法,这种方法有利于保护图像的细节,不需要根据经验人为设置阈值,有效地提高了算法的泛化能力;对尺度系数(低频成分)采用加权局部能量的融合方法,可以有效反映出图像的轮廓信息,克服原图像的模糊。

实验结果表明,本文提出的图像融合算法明显改善了融合图像的客观评价和主观视觉效果,并对处理对象具有广泛的适应能力。

收稿日期:2005-01-24;修订日期:2005-04-12

作者简介:刘鹏(1973-),男,吉林人,博士研究生,主要研究方向:数字视频处理、数字图像处理、VLSI 设计;张岩(1968-),男,河南信阳人,教授,博士,主要研究方向:数字视频处理、SoC、VLSI 设计;毛志刚(1962-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要研究方向:数字视频处理、可编程、可重构硬件设计。

1 小波变换图像融合的流程

小波变换将信号分解为低频近似信息和高频细节信息。参考文献[8]详细描述了 Mallat 快速小波变换在二维情形中的运算过程:令 A_j 表示在 2^j 尺度上的尺度系数, H_r 和 H_c 分别表示行方向和列方向的低通滤波器; G_r 和 G_c 分别表示行方向和列方向的高通滤波器。二维小波分解为:

$$\begin{aligned} A_{j+1} &= A_j H_r H_c, & D_{j+1}^1 &= A_j H_r G_c \\ D_{j+1}^2 &= A_j G_r H_c, & D_{j+1}^3 &= A_j G_r G_c \end{aligned} \quad (1)$$

其中 A^{j+1} 为 2^{j+1} 尺度上的尺度系数; D_{j+1}^1, D_{j+1}^2 和 D_{j+1}^3 分别是 2^{j+1} 尺度上的水平、垂直和对角线方向上的小波系数。

二维小波重构是分解的逆过程:

$$A_j = A_{j+1} H_r^* H_c^* + D_{j+1}^1 H_r^* G_c^* + D_{j+1}^2 G_r^* H_c^* + D_{j+1}^3 G_r^* G_c^* \quad (2)$$

其中 H^* 和 G^* 分别是 H 和 G 的对偶滤波器。

根据小波分解和重构的基本原理和公式(1),(2),基于小波的图像融合过程通过下面三个步骤完成:

- 1) 使用公式(1)对两个或多幅原图像进行小波分解,得到尺度系数和三个方向上的小波系数;
- 2) 在变换域对尺度系数和小波系数应用融合策略,经计算得到融合图像的尺度系数和小波系数(本文对尺度系数和小波系数分别采用不同的数据融合策略);
- 3) 使用(2)式进行小波逆变换,得到重构后的融合图像。

以两个待融合的原图像 I_1 和 I_2 为例,基于小波变换的图像融合流程如图1所示, F 为融合结果图像。

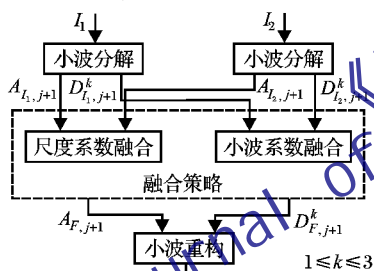


图1 基于小波变换的图像融合流程

2 图像融合策略

设计合理的数据融合策略是获得高品质的融合图像的关键。假设原图像 I_1 的尺度和小波系数为 $\{(A_{I_1}, D_{I_1}^k) | 1 \leq k \leq 3\}$, 原图像 I_2 的尺度和小波系数为 $\{(A_{I_2}, D_{I_2}^k) | 1 \leq k \leq 3\}$ 。小波变换的尺度系数和小波系数分别对应着图像的轮廓和边缘。本文提出的融合策略在去除原图像的冗余信息的同时,更注重保持和恢复原图像的细节特征。下面对尺度系数 A_{I_1}, A_{I_2} 和小波系数 $D_{I_1}^k, D_{I_2}^k (1 \leq k \leq 3)$ 用不同的融合策略进行数据融合,得到融合图像的尺度系数和小波系数 $\{(A_F, D_F^k) | 1 \leq k \leq 3\}$ 的算法进行详细阐述。

2.1 小波系数融合

本文采用小波局部模极大和局部能量分析相结合的方法构造融合图像的小波系数 $D_F^k (1 \leq k \leq 3)$ 。图像中物体的边缘对应着图像的奇异性,在尺度 2^j 下,对小波系数的幅值进行观测可以反映出图像奇异点的位置,设 $I(x_1, x_2)$ 为一幅图像, $I \in L^2(R^2)$, 图像 $I(x_1, x_2)$ 中边缘的梯度向量为:

$$\vec{\nabla} I(x_1, x_2) = (\partial I / \partial x_1, \partial I / \partial x_2)^T \quad (3)$$

$\vec{\nabla} I(x_1, x_2)$ 的局部极值点(峰变点)通过小波变换水平

方向和垂直方向的模取局部极大值反映出来。小波变换的模用下式计算^[8]:

$$M(I) = \sqrt{|D_I^1|^2 + |D_I^2|^2} \quad (4)$$

它的方向为:

$$\alpha = \begin{cases} \tan^{-1}(D_I^2/D_I^1), & D_I^1 \geq 0 \\ \pi - \tan^{-1}(D_I^2/D_I^1), & D_I^1 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

依据局部模极大恢复图像的边缘能够有效地抑制在奇异点出现的振铃现象。在某一区域 Q 内,如果图像 I 的小波变换模为极大值,则该位置对应着图像中物体的边缘,从而对局部模极大点的检测等价于对图像的奇异性(边缘)进行检测;保留局部模加大点的小波系数等价于对图像的边缘的保护。因此不需要像其他图像融合算法那样人为设置阈值来检测和处理图像的奇异性,避免了设置阈值对图像融合算法鲁棒性的不利影响,显著提高了算法的泛化能力。假设待融合的两幅原图像分别是 I_1 和 I_2 , 它们在位置 $u = (u_1, u_2)$ 的小波变换模是:

$$M[I_p(u)] = \sqrt{|D_{I_p}^1(u)|^2 + |D_{I_p}^2(u)|^2}, p = 1, 2 \quad (6)$$

在区域 Q 内的局部模极大值为 u_{\max} 为:

$$u_{\max, I_p} = \arg \{ \text{MAX}_{u \in Q} [M(I_p(u))] \}, p = 1, 2 \quad (7)$$

对于在待融合图像没有取得局部模极大的点用加权局部能量分析的方法进行数据融合^[9]。用区域 Q 内的加权局部能量 E 表示图像内容的显著性。假设 $E_D(I, u)$ 为图像 I 在 $u = (u_1, u_2)$ 处的小波系数的显著性:

$$E_{D^k}(I, u) = \sum_{v \in Q} \lambda(v) |D_I^k(v)|^2, 1 \leq k \leq 3 \quad (8)$$

其中 $\lambda(v)$ 为能量加权系数,表示点 $v = (v_1, v_2)$ 到点 $u = (u_1, u_2)$ 的相离程度, v 与 u 的距离越近, $\lambda(v)$ 越大。对于在待融合图像没有取得局部模极大的点用下式进行小波系数融合:

$$F[D^k(u)] = \frac{\sum_{p=1}^N E_{D^k}(I_p, u) \times D_{I_p}^k(u)}{\sum_{p=1}^N E_{D^k}(I_p, u)} \quad (9)$$

其中 N 为待融合的原图像的数量。

综合上述内容,在对待融合的原图像 I_1 和 I_2 进行局部模极大分析和局部能量加权分析后,最终用下面公式对图像 I_1 和 I_2 的小波系数进行融合,得到融合图像的小波系数:

$$D_F^k(u) = \begin{cases} \text{MAX}(|D_{I_1}^k(u)|, |D_{I_2}^k(u)|), & u = u_{\max, I_1} = u_{\max, I_2} \\ D_{I_1}^k(u), & u = u_{\max, I_1}, u \neq u_{\max, I_2} \\ D_{I_2}^k(u), & u \neq u_{\max, I_1}, u = u_{\max, I_2} \\ F[D^k(u)], & u \neq u_{\max, I_1}, u \neq u_{\max, I_2} \end{cases} \quad (10)$$

($1 \leq k \leq 3, N = 2$)

对三个方向上的小波系数的融合算法为:

- 1) 用公式(7)计算图像 I_1, I_2 的局部模极大点 $\{u_{\max, I_1}\}$ 和 $\{u_{\max, I_2}\}$;
- 2) 如果点 u 同时是 I_1 和 I_2 的局部模极大点,则取绝对值极大的小波系数作为融合图像的小波系数;
- 3) 如果点 u 是 I_1 和 I_2 之一的局部模极大点,则取对应的小波系数作为融合图像的小波系数;
- 4) 如果点 u 既不是 I_1 ,也不是 I_2 的局部模极大点,则用公式(9)计算加权局部分析的小波系数作为融合图像的小波系数。

用局部模极大的方法选择融合图像的小波系数是一种边缘保护的图像恢复方法,它有效地保护了图像的奇异性,图像的边缘得到了清晰的再现;局部能量反映了图像内容的丰富程度,即使在局部区域内没有清晰的边缘(没有取得局部模极大值)时,图像内容越丰富,对应的局部能量就越大,公式(9)的融合方法有利于突出待融合的原图像中具有显著性的细节信息。

2.2 尺度系数融合

尺度系数对应着图像的轮廓信息。为降低计算的复杂度,本文仍然用局部能量分析的方法融合尺度系数,将局部能量计算公式(8)修改为:

$$E_A(I_p, u) = \sum_{v \in Q} \lambda(v) |A_{I_p}(v)|^2 \quad (11)$$

将公式(9)修改为:

$$A_F(u) = \frac{\sum_{p=1}^N E_A(I_p, u) \times A_{I_p}(u)}{\sum_{p=1}^N E_A(I_p, u)} \quad (12)$$

公式(12)作为尺度系数的融合计算公式。

将上述方法获得的尺度系数和小波系数 $\{(A_F, D_F^k) | 1 \leq k \leq 3\}$ 作为融合图像小波分解结果,用公式(2)进行小波逆变换,得到融合图像 F 。本文提出的方法不需要根据经验设置阈值,而且得到的融合图像物体的边缘比较清晰,图像的细节信息也很丰富。

3 实验结果

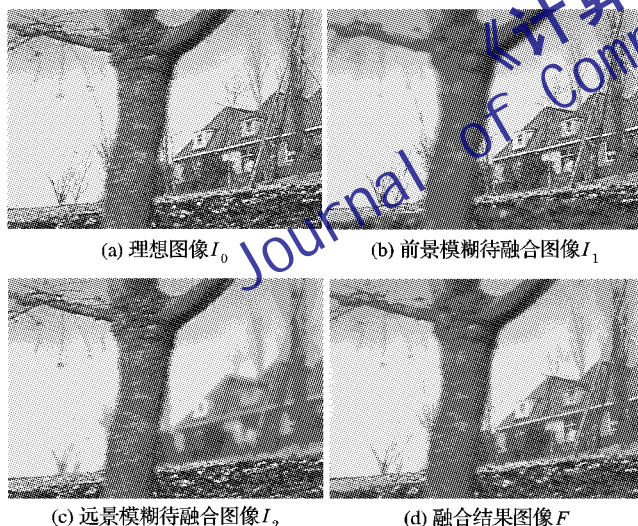


图2 实验结果

用本文提出的算法与其他已报道的算法对多聚焦图像进行对比实验。图2(a)为理想图像 I_0 ,用于实验数据的对比分析;图2(b)为待融合原图像 I_1 ,聚焦于远景,前景较为模糊,图2(c)为待融合原图像 I_2 ,聚焦于近景,远景物体较为模糊。图2(d)是经本文算法进行融合后,得到的融合图像 F 。通过观察,可以发现融合图像 F 消除了图像 I_1 和 I_2 的模糊,保持了图像的细节信息,具有与理想图像 I_0 相似的清晰度,明显改善了视觉效果。

为客观评价本文提出的算法的性能,采用彩色图像的R, G, B分量计算与理想图像的平均偏差 $Biais$ 和相关系数 $Corr^{[10]}$ 与参考文献[4、6]的相同数值指标进行对比,比较结果见表1和表2。

$$Biais = \text{mean}(|I_0 - F|) \quad (13)$$

$$Corr = \frac{\text{Covariance}(I_0, F)}{\sqrt{\text{Variance}(I_0) \times \text{Variance}(F)}} \quad (14)$$

表1 与理想图像平均偏差

算法	$Biais$		
	R	G	B
参考文献[4]	6.4665	6.5573	6.7957
参考文献[6]	6.7313	6.8692	6.9670
本文算法	5.8013	5.9454	5.9812

表2 与理想图像相关系数

算法	$Corr$		
	R	G	B
参考文献[4]	0.9686	0.9720	0.9810
参考文献[6]	0.9589	0.9632	0.9742
本文算法	0.9765	0.9814	0.9874

4 结语

本文提出了基于小波变换,注重边缘保护的像素级图像融合算法。采用局部模极大和加权局部能量分析相结合的方法处理反映图像细节特征的小波系数;对反映图像轮廓特征的尺度系数用加权局部能量的方法进行处理,取得了良好的客观评价和主观视觉效果。更重要的是,本文提出的图像融合算法不需要根据经验人为设定数据融合阈值,明显提高了算法的泛化能力。本文提出的算法可以容易地推广到两幅以上图像融合应用中去。实验结果表明,本文提出的算法可以获得边缘清晰,细节丰富的融合图像。

参考文献:

- [1] POHL LC. Multisensor image fusion in remote sensing: concept, methods and application[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823-854.
- [2] VARSHNEY PK. Multisensor data fusion[J]. Electronics and Communication Engineering Journal, 1997, 9(12): 245-253.
- [3] TOET A. Hierarchical image fusion[J]. Machine Vision and Application, 1990, 3(1): 1-11.
- [4] HUANG X, CHEN Z. A wavelet-based scene image fusion algorithm [A]. Proceeding of IEEE TENCON'02[C], 2002. 602-605.
- [5] WU XQ, ZHOU R, XU YX. A method of wave-based edge detection with data fusion for multiple images [A]. Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation[C]. IEEE, 2000. 2691-3694.
- [6] KIU QF, SHENG GF. Image fusion scheme based on the biorthogonal wavelet transform [A]. Geoscience & Remote Sensing Symposium, IEEE[C]. IEEE, 2002. 66-68.
- [7] GARZELL A. Possibilities and limitation of the using of wavelet in image fusion[J]. IEEE, 2002, 66-68.
- [8] MALLAT S. A Wavelet Tour of Signal Processing(Second Edition) [M]. Academic Press, 1999. 42-150.
- [9] BURT PJ, KOLCZYNSKI RJ. Enhanced image capture through fusion [A]. Proceeding the 4th International Conference on Computer Vision[C]. IEEE, 1993. 173-182.
- [10] OUARAB N, ACHIR M, KHETTAL N, et al. Spatial enhancement of satellite images using data fusion algorithm in the wavelet domain [A]. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas[C], 2001. 293-298.