

# 一种自适应的多聚焦图像融合方法

狄红卫 韩耀东 陈木生

(暨南大学光电工程研究所, 广州 510632)

**摘要** 为了对不同的多聚焦图像进行有效融合, 提出了一种小波域中基于区域特征的自适应多聚焦图像融合方法。该方法首先对参加融合的两幅图像进行小波分解, 然后针对低频部分, 在保留源图像共同特征的基础上, 将待融合的两图像各自所具有的特征添加到融合图像中, 而对于高频部分, 则根据区域的小波能量进行融合; 最后通过小波逆变换来重构融合图像。该方法不仅能够完全自适应地对多聚焦图像进行有效的融合, 而且对于各种不同的源图像具有通用性。实验表明, 该算法能够得到良好的融合效果, 是一种有效的多聚焦图像融合方法。

**关键词** 图像融合 自适应 小波变换 多聚焦

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)03-0353-04

## An Adaptive Fusion Method of Multi-focus Images

DI Hong-wei, HAN Yao-dong, CHEN Mu-sheng

(Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632)

**Abstract** To fuse different multi-focus images effectively, an adaptive fusion method of multi-focus images based on regional features in wavelet domain is proposed. First, images involved in fusion are decomposed by wavelet transform. For the fusion of low frequency coefficient, it adds different feature to the result image based on reserving the common feature of fusing images. High frequency coefficient is fused according to the wavelet energy of its region. Finally, the fused image is reconstructed. This method can not only fuse multi-focus images adaptively, but also have versatility in multi-focus images. The results show that this algorithm has good fusion effects, so it is an effective method in multi-focus images fusion.

**Keywords** image fusion, adaptive, wavelet transform, multi-focus

## 1 引言

众所周知, 图像融合是数据融合的一个重要分支, 它在遥感图像处理、目标识别、医学、机器人视觉等方面具有广阔的应用前景。所谓多聚焦图像融合就是先通过成像设备对某一场景中的两个(或多个)目标进行两次(或多次)成像, 然后将这些成像中清晰部分组成一幅新的图像来得到一个多目标都聚焦清晰的融合图像的技术, 这种融合图像更便于人眼观察或计算机的后续处理。这种多聚焦图像融合技术现在已被广泛应用。

图像融合的方法较多, 其中最为简单的方法是加权平均法, 即将源图像对应像素的灰度值通过加权平均来生成新的图像, 这种方法虽最为简单, 但效果较差。自从 Burt 提出 Laplacian 金字塔融合方法以后, 基于 Laplacian 金字塔、比率低通金字塔、梯度金字塔等的融合方法不断出现。随着 20 世纪 90 年代小波变换在图像处理中的广泛应用, 它也被成功地应用于图像融合。虽然小波变换的融合效果相对比较理想, 但在融合的过程中仍存在一些问题, 其中一个主要问题是小波系数的融合处理<sup>[1]</sup>。小波系数融合方法有加权平均、最大值选择方法等<sup>[2]</sup>, 这些小波系数融合方法虽然能够提高图像融合的效率

基金项目: 广东省自然科学基金项目(04010465)

收稿日期: 2004-04-02; 改回日期: 2005-07-05

第一作者简介: 狄红卫(1969 - ), 男, 1999 年获华南理工大学博士学位, 现为暨南大学副教授。目前主要研究方向为图像处理与分析。

E-mail: tdhw@jnu.edu.cn

果,但算法过于简单,不仅融合结果平均化,且易出现模糊现象。由于每幅图像的信息不同,而且对于不同的源图像要采取哪种算法要根据具体情况而定,因此实验者只能通过不断地尝试来决定融合算法和加权值的选取,这样就给实验者带来一些困难。本文在同时考虑增强图像的细节信息、分辨率和清晰度的基础上,提出一种新的自适应融合方法。实验结果表明,该方法不仅具有较好的通用性,而且能够取得较好的融合效果。

## 2 基于小波变换的图像融合原理

大家知道,对 2 维图像进行  $N$  层的小波分解,可得  $3N+1$  个不同的频带,其中包含  $3N$  个高频带

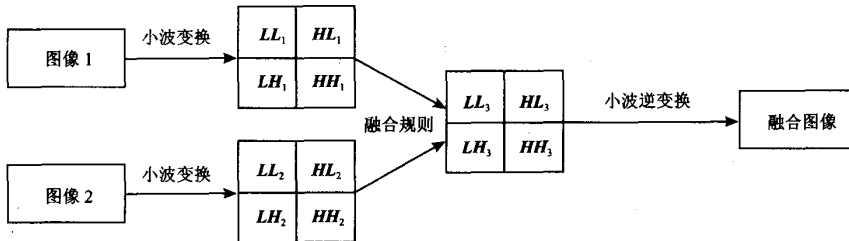


图 1 基于小波变换的图像融合原理

Fig. 1 The principle of image fusion based on wavelet transform

## 3 多聚焦图像自适应融合算法

在图像融合的过程中,融合算子的选择对于融合的质量是非常重要的,这也是图像融合至今还没很好解决的难点问题。本文根据多聚焦图像小波变换的特点,提出一种基于区域的自适应图像融合算法。多聚焦图像小波变换的特点是:图像经小波变换后,清晰图像的高频系数要远大于模糊图像的高频系数,即清晰图像的高频部分的小波能量要远大于模糊图像;而低频部分小波系数则比较接近。图像经小波变换后,源图像与小波变换后所得到的系数之间并不是一一对应的关系,由于源图像中的一个像素点可以分解成多个小波系数,且一个小波系数与多个像素点有关,因而在图像融合中,低频和高频部分的小波系数应采用与区域相关的不同融合算法,才能够得到较好的融合效果。

融合时,首先对待融合的图像进行小波分解,进行低频部分融合的主要目的是增加融合图像的特

和一个低频带。下面以两幅图像的融合为例来说明基于小波变换的图像融合原理。

融合的过程如图 1 所示,首先对原始图像 1、2 进行分解,即先对原始图像分别进行低、高通滤波,使原始图像分解为含有不同频率成分的 4 个子图像,再根据需要对低频子图像重复上面的过程,也就是进行各图像的小波塔形分解;然后对各个分解层进行融合处理,即对不同频率的各层根据不同的要求采用不同的融合算子进行融合处理,最终即可得到融合后的小波金字塔图像。对融合后的小波金字塔图像进行小波逆变换(图像重构),所得的重构图像即为融合图像,这样不但可有效地将来自不同的图像的细节融合在一起,以满足实际要求,同时可获得较好的视觉效果。

征,其算法如下:

① 求出两源图像  $I_1$ 、 $I_2$  的低频部分  $I_1^L$ 、 $I_2^L$  的共同特征(左上角 L 代表低频 low)

$$I_{\text{共同}}^L(i, j) = \min \{ I_1^L(i, j), I_2^L(i, j) \} \quad (1)$$

② 求出两幅源图像  $I_1$ 、 $I_2$  低频部分各自所具有的特征

$$\left. \begin{aligned} I_{1, \text{特征}}^L &= I_1^L - I_{\text{共同}}^L \\ I_{2, \text{特征}}^L &= I_2^L - I_{\text{共同}}^L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

③ 利用小波树的性质来判断  $I_{1, \text{特征}}^L$ 、 $I_{2, \text{特征}}^L$  上各点所表示的是噪声还是图像的特征,如果是噪声,则将该点的小波系数置为零,最后得到的是两图像低频部分的新特征  $\hat{I}_{1, \text{特征}}^L$  和  $\hat{I}_{2, \text{特征}}^L$ 。

④ 生成融合图像的低频部分

$$I^L = I_{\text{共同}}^L + \hat{I}_{1, \text{特征}}^L + \hat{I}_{2, \text{特征}}^L \quad (3)$$

这样不但能够使融合图像的低频信息更丰富,同时还能增强图像的特征。

对于高频部分采用的融合算法如下:先把小波系数分解为一些互不重叠的大小为  $3 \times 3$  的方块(块 A, 块 B),然后根据式(4)计算这些方块的小波

平均能量,最后在此基础上再根据式(5)进行自适应的小波系数融合。

$$E_A = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A^2(i, j)}{3 \times 3}, E_B = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 B^2(i, j)}{3 \times 3} \quad (4)$$

$$C(i, j) = \frac{E_B}{E_A + E_B} \times A(i, j) + \frac{E_A}{E_A + E_B} \times B(i, j) \quad (5)$$

其中,  $A(i, j)$ 、 $B(i, j)$ 、 $C(i, j)$  分别表示原始图像  $I_1$ 、原始图像  $I_2$  和融合后图像  $F$  中某一对应的大小为  $3 \times 3$  的方块  $A$ 、 $B$ 、 $C$  中点  $(i, j)$  的小波系数,  $E_A$ 、 $E_B$  分别表示相应的图像块小波系数平均能量。

### 4 图像融合效果的评价

图像融合效果的评价对于图像融合是很重要的。本文主要采用以下一些评价指标来评价融合图像的质量。在下面的式中,  $F$  和  $G$  分别表示融合后图像和理想图像,  $M$  和  $N$  分别表示图像的行数和列数。

#### 4.1 谱信息的继承: 偏差度

Costantin 等人用偏差指数 (difference Index) 来反映融合后图像与原始图像在光谱信息上的匹配程度。偏差指数  $D$  定义为

$$D = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|F(i, j) - G(i, j)|}{G(i, j)} \quad (6)$$

如果偏差指数  $D$  较小, 则说明融合后的图像  $F$  在提高空间分辨率的同时, 较好地保留了图像  $G$  的光谱信息。

#### 4.2 峰值信噪比

峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR) 定义为

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i, j) - G(i, j)]^2} \quad (7)$$

用此指标评价时, 峰值信噪比越大, 说明图像融合效果和图像质量越好。

#### 4.3 均方根误差

均方根误差 (root mean square error, RMSE) 定义为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [G(i, j) - F(i, j)]^2}{M \times N}} \quad (8)$$

此指标表示, 均方根误差越小, 融合效果越好。

#### 4.4 相似性度量

相似性度量表示融合后图像  $F$  和理想图像  $G$  的相关性, 其定义为

$$S = 2 \times \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F(i, j) \times G(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(i, j)^2 + G(i, j)^2]} \quad (9)$$

如果  $S$  越接近 1, 则说明融合图像与理想图像更接近, 也就是融合效果更好。

#### 4.5 熵差 ( $\Delta H$ )

熵定义为

$$H = - \sum p_i \lg p_i \quad (10)$$

$$\Delta H = H_F - H_G \quad (11)$$

其中,  $p_i$  为图像第  $i$  灰度级的概率。熵差为融合图像和理想图像熵的差, 它反映了两图像所含信息量差异, 熵差越小, 说明图像的融合效果越好。

## 5 实验结果与分析

图 2(a) 是一幅清晰的图像 (理想图像), 大小为  $256 \times 256$ , 利用 Photoshop 对图像进行处理, 即通过模拟摄像时的离焦现象来得到远景清晰、前景模糊的源图像 (图 2(b)) 以及远景模糊、前景清晰的源图像 (图 2(c))。本文算法小波分解选用的小波基为 'sym4', 分解层数为最佳小波分解层数 5 层, 高低频部分小波子块的大小为  $3 \times 3$ 。

为了解本文算法的优点, 还进行了本文算法与其他算法的实验仿真比较, 图 2(d) 为本文提出的算法所得到的融合结果, 图 2(e) 为加权平均算法所得到的融合结果, 图 2(f) 为小波系数最大值选取的融合结果, 图 2(g) 为文献 [3] 方法的融合结果, 图 2(h) 为文献 [4] 方法的融合结果。表 1 是各种算法的融

表 1 实验结果比较

Tab. 1 Compared to experimental results

融合算法	偏差度	均方根误差	相似性度量	峰值信噪比 (dB)	熵差
本文方法	0.4322	54.3690	0.9083	21.9977	0.0531
加权均值法	0.4858	58.5757	0.8995	18.9516	0.0680
最大值法	0.4738	69.7996	0.8531	13.3467	0.3397
文献 [3] 算法	0.4830	58.3745	0.9001	19.0825	0.1169
文献 [4] 算法	0.5159	58.2823	0.8985	19.1428	0.0897

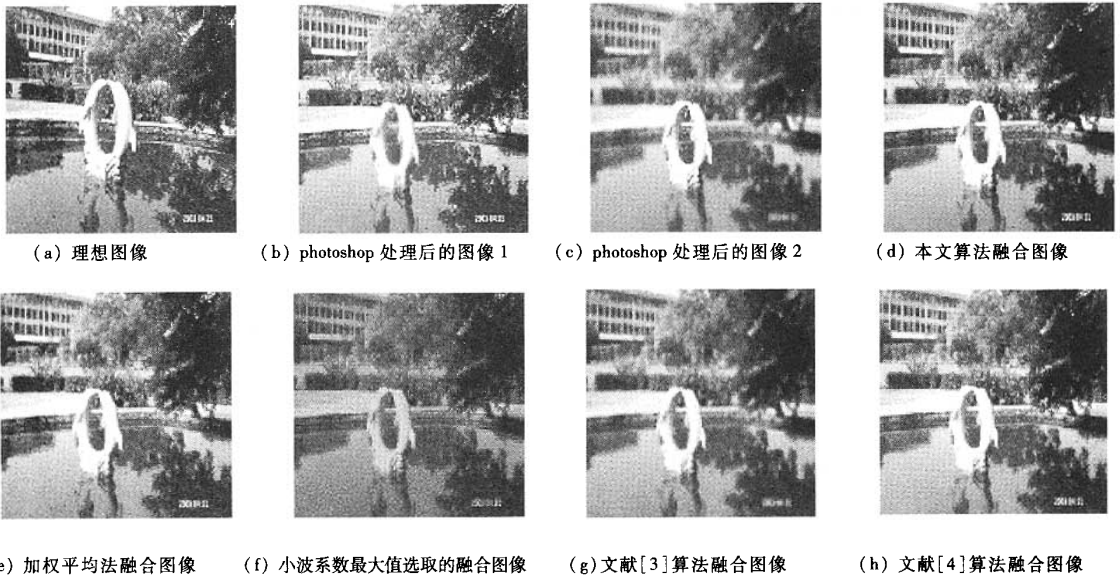


图 2 实验结果

Fig.2 Experimental results

合结果几个度量指标的比较,从表 1 可以看出,在峰值信噪比、均方根误差、相似性量度、偏差度、熵差这几方面,本文的融合算法都较其他算法为优。从融合图像也可看出,本文算法融合的效果较好。从实验结果可看出,本文所提出的算法是一种稳定的、有效的、可行的融合方法。

## 6 结 论

本文在小波分解的基础上,提出了一种自适应的多聚焦图像融合方法。这种方法对于不同的源图像,小波分解后的低频部分在保留源图像共同特征的基础上,能将待融合两图像各自所具有的特征添加到融合图像中,这样可使融合图像具有更丰富的特征;对于高频部分,每个小波区域可自适应地乘以一个与该区域小波能量大小相关的系数,这样就能充分利用两图像的高频信息。实验结果表明,该方法不仅能够得到较好的融合图像,并具有通用性,因此是一种有效可行的融合方法。

## 参考文献 (References)

- 1 ZHANG Zhong, Blum R S. A categorization of multiscale decomposition based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. Proceedings of IEEE, 1999, 87(8):315 ~ 1326.
- 2 MAO Shi-yi, ZHAO Wei. Comments on multisensor image fusion techniques [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 512 ~ 518. [毛士艺, 赵巍. 多传感器图像融合技术综述 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 512 ~ 518.]
- 3 CUI Yan-mei, NI Guo-qiang, WANG Yi, et al. One multiscale and multioperator image fusion algorithm based on wavelet transform [J]. Optical Technique, 1999, (4): 37 ~ 39. [崔岩梅, 倪国强, 王毅等. 一种基于小波变换的多尺度多算子图像融合方法 [J]. 光学技术, 1999, (4): 37 ~ 39.]
- 4 LI Xiao-chun, CHEN Jing. The research of multispectral image fusion algorithm using wavelet transform [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(2): 55 ~ 58. [李晓春, 陈鲸. 一种基于小波变换的图像融合新方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 55 ~ 58.]