

基于小波分解的不同聚焦点图像融合方法

杨 杨, 杨万海, 裴继红

(西安电子科技大学电子工程学院 210 室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一种基于小波分解的多聚焦图像融合方法. 该方法首先建立一个 PSF 模型来描述目标聚焦的情况, 然后利用小波分解分析不同聚焦图像在高斯平滑前后其高频分量的差异, 进而判断图像中聚焦清晰的目标, 并进行融合. 实验结果表明, 本文提出的方法可以得到目标都清晰的融合图像, 其融合结果优于小波变换法和 Laplacian 塔型方法.

关键词: 图像融合; 小波分解

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 06-0846-03

Fusion Multifocus Images Using Wavelet Decomposition

YANG Xuan, YANG Wan-hai, PEI Ji-hong

(School of Electronics and Engineering, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A new method is developed for fusion of two spatially registered images with differing focus points. At first, a point spread function is defined to describe the blurring degree of objects in an image. The clear object is decided by comparison of the wavelet decomposition components of two original images and two blurred images. Experiments show that this method performs better in preserving edge information for the test images than that of the other image fusion methods.

Key words: image fusion; wavelet decomposition

1 引言

图像融合是将不同传感器得到的多个图像根据某个算法进行综合处理, 以得到一个新的、满足某种需求的新图像^[1]. 多聚焦图像融合是图像融合的研究内容之一. 多聚焦图像指的是成像条件相同, 而镜头聚焦目标不同的多个图像. 通过图像融合技术, 可以得到一个目标都聚焦清晰的融合图像. 多聚焦图像融合方法中具有代表性的方法包括: 小波变换方法^[2~5]和 Laplacian 塔型方法^[6]. Laplacian 塔型方法的缺点层间分解量之间具有相关性, 导致融合结果不够理想. 小波变换法具有良好的空域和频域的局域性, 可以较好地保留多聚焦图像的高频信息, 其融合效果优于 Laplacian 塔型方法. 尽管小波变换法的融合效果相对比较理想, 但仍在一定程度上会丢失原始图像中的一些边缘信息, 为了有效地保留图像中的边缘信息, 本文提出了一种新的图像融合方法. 该方法将利用小波分解来分析多聚焦图像在高斯平滑前后的高频信息变化, 以高频信息为判定依据, 判定原始图像中的模糊目标和清晰目标, 将两幅原始图像进行合并, 得到一幅目标都清晰的融合图像. 该方法中没有小波反变换的过程, 相对于小波变换的图像融合方法, 图像边缘信息损失的情况较少, 其融合结果更接近于理想的融合结果.

2 图像小波分解

我们对图像进行小波分解, 以得到图像的高频信息, 作为后期目标判决的依据. 任意一个平方可积的二维信号在分辨率为 2^j 时的近似可以表示为 $A_2^j f$, 信号在 2^j 分辨率下的近似 $A_2^j f$ 和 2^{j-1} 分辨率下的近似 $A_2^{j-1} f$ 之间的差值可以用 $D_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 表示. 可以用 $A_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 完全恢复 $A_2^j f$. $A_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 、 $D_2^{j-1} f$ 可以使用 Mallat 的快速分解算法方便地得到, 具体算法见文献^[7].

假设原始图像表示为 $A_1 f$, 则 $A_1 f$ 可以分解到分辨率 2^{-J} 下, 也就是说, $A_1 f$ 可以用分辨率 2^{-J} 下的近似 $A_2^{-J} f$ 和 $3J$ 个差值来表示

$$(A_2^{-J} f, (D_2^1 f) - J \leq j \leq -1, (D_2^2 f) - J \leq j \leq -1, (D_2^3 f) - J \leq j \leq -1)$$

由于小波基的正交性, 图像的小波分解过程中不会产生冗余数据, 小波分解过程也就是将信号分解到面向空域的相互独立的频率通道上, 这样, 我们就可以方便地分析信号在各个频带上的频域特性. 在图像的小波分解中, $A_2^j f$ 是图像的低频部分, $D_2^j f$ 是图像在垂直方向上的高频部分, $D_2^j f$ 是图像在水平方向上的高频部分, $D_2^j f$ 是图像在对角线方向上的高频部分.

3 不同聚焦点图像融合方法

3.1 点扩展函数 PSF

在对不同聚焦点图像进行融合之前,我们需要分析一下光学系统对某个目标成像的冲激响应函数,又称点扩展函数(PSF),以帮助我们分析目标聚焦模糊与目标聚焦清晰之间的成像差异.令输入目标为 $f(x, y)$,光学系统成像后的输出目标为 $g(x, y)$,光学系统对目标成像的作用可表达为一个二维线性移不变系统,其冲激响应函数为 $h(x, y)$,则

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y)$$

$h(x, y)$ 称为点扩展函数 PSF,它表示了一个线性移不变的光学系统对某个特定目标的成像效果.对于成像的某个特定目标而言, $h(x, y)$ 可以用一个高斯函数 $G(x, y)$ 近似,高斯函数的方差决定了光学系统对该目标成像的模糊程度.如果很小,则目标成像清晰,此时 PSF 相当于一个冲激函数 $\delta(x, y)$;如果较大,则目标成像模糊,此时 PSF 相当于一个平滑函数.如果一个场景中存在多个目标,目标聚焦成像的效果各不相同,每个目标的成像效果可以用方差不同的高斯函数来表征,即,聚焦清晰的目标可以用原始目标与一个方差很小的高斯函数卷积来表示;聚焦模糊的目标可以用原始目标与一个方差较大的高斯函数卷积来表示.

3.2 判定清晰目标和模糊目标

由前面分析的目标成像效果与点扩展函数之间的关系可以知道,聚焦清晰的目标与聚焦模糊的目标之间的差异反映在高斯型点扩展函数的方差上.假设两幅聚焦点不同的原始图像分别为 f_1 和 f_2 ,用一个方差为 σ_0 的高斯函数对 f_1 和 f_2 分别进行平滑处理,得到钝化图像 f_{11} 和 f_{21} .下面分析每一个像素所处的邻域内其高频分量的特点,来确定该像素是属于一个清晰的目标还是一个模糊的目标.存在以下三种情况:

- (1) 若目标在 f_1 中清晰,在 f_2 中模糊,则在 f_2 中更加模糊,此时 f_1 和 f_2 的高频差异大于 f_{11} 和 f_{21} 的高频差异,而 f_1 和 f_2 的高频差异小于 f_{11} 和 f_{21} 的高频差异;
- (2) 若目标在 f_1 中模糊,在 f_2 中清晰,则在 f_1 中更加模糊,此时 f_1 和 f_2 的高频差异大于 f_{11} 和 f_{21} 的高频差异,而 f_1 和 f_2 的高频差异小于 f_{11} 和 f_{21} 的高频差异;
- (3) 若目标在 f_1 和 f_2 中都是清晰的,或都是模糊的.那么 f_1 和 f_2 的高频差异大于 f_{11} 和 f_{21} 的高频差异,同时 f_1 和 f_2 的高频差异也大于 f_{11} 和 f_{21} 的高频差异.

由以上分析,我们可以给出一个判定当前像素属于清晰目标和模糊目标的表达形式.假设 f_1 和 f_2 在邻域内的高频分量分别为 Df_1 和 Df_2 , f_{11} 和 f_{21} 在邻域内的高频分量分别为 Df_{11} 和 Df_{21} .则有

若 $|Df_1 - Df_2| - |Df_{11} - Df_{21}| \geq T$ 且 $|Df_1 - Df_2| - |Df_{11} - Df_{21}| \geq T$,则目标在 f_1 中;

若 $|Df_1 - Df_2| - |Df_{11} - Df_{21}| \geq T$ 且 $|Df_1 - Df_2| - |Df_{11} - Df_{21}| \geq T$,则目标在 f_2 中;

若 $|Df_1 - Df_2| - |Df_{11} - Df_{21}| < T$ 且 $|Df_1 - Df_2| - |Df_{11} - Df_{21}| < T$,则目标在 f_1 或 f_2 中;

下面,讨论图像在邻域内的高频分量的表达和阈值 T 的取法.利用小波分解来表达图像在邻域内的高频分量.假设图像 f 小波分解的分辨率为 2^{-J} ,这里取 $J=1$,则图像 f 可以分解为四个分量 $A_2^{-1}f$ 、 $D_2^{-1}f$ 、 $D_2^{-1}f$ 、 $D_2^{-1}f$,分别表示图像的低频分量、垂直方向的高频分量、水平方向的高频分量、对角线方向的高频分量.为了方便起见,这四个分量都没有进行下采样,以保持分解的分量与原图像大小相同.图像在邻域内的高频分量 Df 可以定义为

$$Df = \sum_{(m,n) \in A} |(D_2^{-1}f)(m,n)| + \sum_{(m,n) \in A} |(D_2^{-1}f)(m,n)| + \sum_{(m,n) \in A} |(D_2^{-1}f)(m,n)|$$

其中 A 是当前像素所处的邻域.这里利用边缘的一维模型来讨论阈值 T 的取法.假设理想的一维边缘是阶跃函数 $u(x)$,经过光学成像系统,该边缘的清晰成像的高斯型点扩展函数的方差为 σ_1 ,模糊成像的高斯型点扩展函数的方差为 σ_2 ,则清晰成像边缘模型 $e_1(x) = u(x) \cdot G(x, \sigma_1)$ 和模糊成像边缘模型 $e_2(x) = u(x) \cdot G(x, \sigma_2)$,其中 $G(x, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$.利用 Harr 小波进行小波分解,则 $e_1(x)$ 在 $[-1, 1]$

区间的高频分量 $De_1 = 2 \int_0^1 \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_1^2}\right) dt$,利用柯特斯公式求该积分的近似值,上式可以表达为

$$De_1 = 2 \left[\frac{1}{8} + \frac{3}{8} \exp\left(-\frac{(1/3)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{3}{8} \exp\left(-\frac{(2/3)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{1}{8} \exp\left(-\frac{1^2}{2\sigma_1^2}\right) \right]$$

当 $x \ll 1$ 时,利用近似公式 $\exp(-x) \approx 1 - x$,可以将上式近似为

$$De_1 = 2 \left[\frac{1}{8} + \frac{3}{8} \left(1 - \frac{(1/3)^2}{2\sigma_1^2} \right) + \frac{3}{8} \left(1 - \frac{(2/3)^2}{2\sigma_1^2} \right) + \frac{1}{8} \left(1 - \frac{1^2}{2\sigma_1^2} \right) \right] = 2 - \frac{1}{3\sigma_1^2}$$

类似地,可以得到 $e_2(x)$ 在 $[-1, 1]$ 区间的高频分量 De_2

$$2 - \frac{1}{3\sigma_2^2}. \text{ 将 } e_1(x) \text{ 和 } e_2(x) \text{ 分别用方差为 } \sigma_0 \text{ 的高斯函数进行平滑,平滑后分别为 } e_{11}(x) \text{ 和 } e_{21}(x), \text{ 利用前面的方法,可}$$

以得到 $e_{11}(x)$ 在 $[-1, 1]$ 区间的高频分量 $De_{11} = 2 - \frac{1}{3\sigma_{11}^2}$,

$e_{21}(x)$ 在 $[-1, 1]$ 区间的高频分量 $De_{21} = 2 - \frac{1}{3\sigma_{21}^2}$.其中, $\sigma_1 =$

$\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}$, $\sigma_2 = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_2^2}$.分析清晰边缘和模糊边缘其高频分量在高斯平滑前后的差,可以确定阈值 T 为

$$T = k \max \left\{ \frac{1}{6} \left[\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2 + \sigma_0^2} \right], \frac{1}{6} \left[\frac{1}{\sigma_2^2} - \frac{1}{\sigma_{21}^2 + \sigma_0^2} \right] \right\}$$

其中, k 为一个调整系数.

我们在进行图像融合之前假设图像已经经过校准,图像大小相同,相应地,目标成像的大小也基本相同.如果同一个目标在两幅图像上成像的大小相差过大,则融合的图像中目标会产生一个假轮廓.考虑到多聚焦图像的成像条件,两幅图像上成像的效果差异不会太大,因此可以认为这种情况不会

出现.

4 实验结果

将本文提出的方法应用到多聚焦图像 Clock1 图和 Clock2 图中. Clock1 图中前面的目标聚焦清晰,后面的目标聚焦模糊;Clock2 图中前面的目标聚焦模糊,后面的目标聚焦清晰. 可以通过人工剪切的方法得到 Clock1 和 Clock2 的标准融合图像(Clock 图). 有了标准融合结果图,我们可以对融合的结果图像进行评价,以确定其融合结果是否最优.

$$\text{图像融合结果的评价度量} M_F = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (g_{ij} - g_{ij}^s)^2,$$

其中, $n = M \times N$, M, N 分别是图像的行数和列数. g_{ij} 是融合结果图像在坐标 (i, j) 处的像素值, g_{ij}^s 是标准融合图像在坐标 (i, j) 处的像素值. 评价度量 M_F 值越小,融合结果越好;评价度量 M_F 值越大,融合结果越差.

我们对两组图像分别使用 Laplacian 塔型方法^[6]、小波变换方法^[4]和本文提出的方法进行图像融合. 图 1 是 Clock 组图像的原始图像、融合的结果图像以及融合结果与标准图的差(进行了 128 灰度级补偿). 图像融合结果的评价度量见表 1. 从比较结果可以看出,本文提出了方法较好地保留了原始图像中的边缘信息,与标准融合图像比较是最优的.

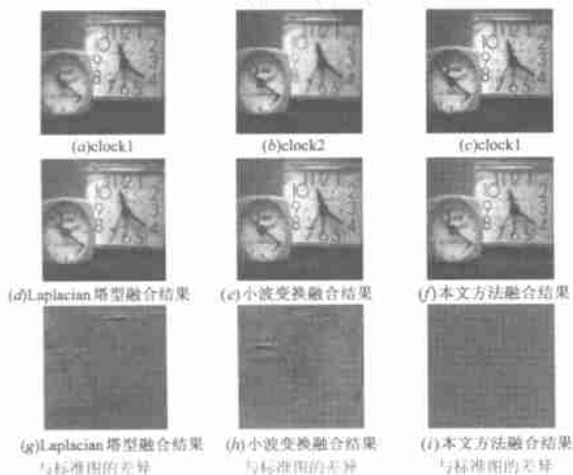


图 1 Clock 组图像融合结果

表 1 融合图像与标准图像的差异

	Laplacian 塔型	小波变换	本文方法
Clock	17.32	11.42	7.15

5 结论

本文针对不同聚焦点的同一景物图像,提出了一种基于小波分解的图像融合方法. 该方法首先建立了高斯模糊的聚焦模型,利用小波分解确定图像的高频分量. 针对该聚焦模型,分析了不同聚焦情况的目标高斯平滑前后高频分量的差异,以确定选用原始图像中的哪个目标进行合并. 该方法得到的融合图像可以同时得到聚焦情况都清晰的目标,同时最大可能地保留了图像中的边缘信息. 从实验比较结果分析,该图像融合方法优于小波变换图像融合方法和 Laplacian 塔型融合方法.

参考文献:

- [1] J L VAN G, POHL C. Image fusion: Issues, techniques and applications. Intelligent Image Fusion [A]. Proceedings EARSel Workshop [C], Strasbourg, 1994: 18 - 26.
- [2] Núñez J, Otazu X, et al. Image fusion with additive multiresolution wavelet decomposition Applications to SPOT + Landsat images [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1999, 16(3): 467 - 474.
- [3] Yocky D A. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1995, 12(9): 1834 - 1841.
- [4] Zhou J, Civco D L, et al. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19(4): 743 - 757.
- [5] Sunar F, Musaoglu N. Merging multiresolution SPOT P and Landsat TM data: the effects and advantages [J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19(2): 219 - 224.
- [6] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. IEEE Trans., 1983, COM-31: 532 - 540.
- [7] Mallat S G. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models [J]. IEEE Trans., 1989, ASSP-37: 2091 - 2110.

作者简介:



杨 燕 女. 1969 年生于陕西西安, 博士后, 1998 年在西安交通大学获博士学位, 现在西安电子科技大学博士后流动站工作. 长期从事模式识别、图像处理、数据融合等方面的研究工作.

杨万海 男. 1939 年生于吉林榆树, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 长期从事图像融合、C³I 系统数据融合、雷达系统建模、仿真和设计技术等方面的研究.