

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)12-1733-05

论文索引信息: 张金泉, 杨进华, 王晓坤. 图像烟雾弱化方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(12): 1733-1737

图像烟雾弱化方法研究

张金泉, 杨进华, 王晓坤

(长春理工大学光电工程学院, 长春 130022)

摘要: 在火箭/导弹发射时, 地面试验图像受烟雾干扰严重, 在地面试验图像预处理中, 烟雾弱化研究非常重要。首先对频域滤波法进行了探讨, 提出了一种新的同态滤波方法, 然后根据小波变换能兼顾空-频域和多分辨率分析的特性提出了加权小波系数的烟雾弱化方法。最后采用5种不同的客观评价方法对处理后的图像进行评价。实验结果表明, 所提出的两种烟雾弱化处理方法更有效。

关键词: 烟雾弱化; 烟雾图像; 同态滤波; 小波变换

Research on the weakening of smoke in images

ZHANG Jinquan, YANG Jinhua, WANG Xiaokun

(College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: When the rocket or missile launches, the ground testing images are interfered seriously by smoke. The research on the weakening of smoke in images is very important in the ground testing image preprocessing. This paper firstly discusses smog removing in the frequency domain, and it proposes a new homomorphic filtering method. Then it proposes Weighing Wavelet Coefficient approach weakening smoke on account of the multi-resolution and space-frequency nature of the Wavelet Transform. Finally it adopts five different objective appraisal methods to evaluate the disposed images. Experimental results show that the two proposed approaches are more effective on smog weakening than the other three.

Keywords: smoke weakening; smoke image; homomorphic filtering; Wavelet Transform

0 引言

在火箭/导弹发射时, 发动机点火以后由于推进剂的燃烧产生了很多烟; 同时, 在发射现场地板上, 灌注了大量的水, 由于发动机的尾焰温度很高, 从而导致试验现场的水汽化, 产生了大量的雾。由于上述原因, 所获取的实验图像几乎都受到了烟雾的干扰。因此, 如果要对所发射的火箭/导弹进行检测或测量的话, 烟雾弱化就显得很重要。在雾处理方面, Wang 等人^[1]提出了一种自动检测和消除云及其阴影的图像融合方法, 王惠等人^[2]提出了一种利用多项式改正的方法消除云的覆盖, 方勇等人^[3]提出了

一种基于概率松弛的图像匹配方法来消除云层遮挡的影响, 阎冬梅等人^[4]在分析图像含云区域空间特征和频率域特征的基础上, 对图像进行小波多分辨率分解和单支重构, 建立云层信息属性空间模型, 确定图像含云区域, 为遮挡信息的恢复提供了良好的分析基础, Li 等人^[5]提出了一个利用阈值法检测云区然后进行融合的方法, Wisetphanichkij^[6-7]提出了一种利用小波变换的融合方法, Liew 等人^[8]提出了一种按“云量”对像素分级来检测云区的方法。

本文首先从频域滤波的角度讨论了实验图像的烟雾弱化方法, 提出了一种新的同态滤波方法, 然后针对小波变换有兼顾空-频域和多分辨率分析的优良特性提出了加权小波系数的图像烟雾弱化方法。

收稿日期: 2008-10-15; 改回日期: 2009-11-07

第一作者简介: 张金泉(1982—), 男。长春理工大学测试计量技术及仪器专业硕士研究生。主要研究方向是数字图像处理、计算机视觉。E-mail: jackie_zhangjq@sina.com。

1 图像烟雾弱化方法处理

1.1 同态滤波

传统的同态滤波^[9]是一种基于特征的对比度增强方法。主要用于减少光照不均匀引起的图像降质,并对感兴趣的景物进行有效增强。如图 1 所示。

图 1 中 $\ln$ 代表对数运算, DFT 代表傅里叶变换, $H(u, v)$ 代表线性高通滤波器, $(DFT)^{-1}$ 代表傅里叶逆变换, $\exp$ 代表取指数运算, $f(x, y)$ 表示初始亮度图像, $g(x, y)$ 表示处理后的亮度图像。这里主要说明高通滤波器的设计, 当滤波器为理想滤波器时, 其脉冲响应将呈振荡特征, 用它对图像进行滤波

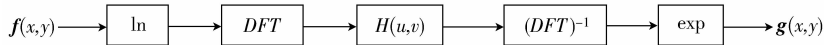


图 1 同态滤波

Fig. 1 Homomorphic filtering

1.2 改进的同态滤波

在方法 1 中, 仅用巴特沃思高通滤波器作为频域滤波的滤波器, 实验结果表明其滤波后的图像并不十分满意, 因此提出巴特沃思与相角滤波相结合的高通滤波方法(方法 2), 其高通滤波器的传递函数如下

$$H'(u, v) = H(u, v) \cdot e^{i\theta} \quad (2)$$

式中, $\theta = \arctan(\text{imag}(f)/\text{real}(f))$, imag 和 real 分别为图像 f 经傅里叶变换后的虚部和实部, $H(u, v)$ 为式(1)中的巴特沃思高通滤波器传递函数。

方法 1 和方法 2 最大的不足就是仅在一个频域上对图像进行处理, 在烟雾弱化处理覆盖这种低频成分的同时, 图像背景的低频成分也被滤除了。表现在视觉上, 就是白色的烟雾被去掉的同时, 背景也被削弱了, 因此, 提出加权小波系数的方法烟雾弱化处理。

1.3 加权小波系数方法

小波变换^[10]具有多分辨率分析的特点, 在时间、频率域都具有局部分析的能力。图像经多层小波变换, 得到最高层的低频系数和每一层的高频系数。低频系数代表图片的背景, 频率最低, 高频系数代表了图像的高频信息, 层数大的高频系数频率较低。

基于小波变换的特点, 将图片进行适当层次的

时, 便会产生振铃效应, 这是因为理想滤波器频率响应具有垂直的锐截至边的缘故。烟雾的弱化效果取决于高通滤波时滤波函数 $H(u, v)$ 的选择, 为了减少乃至消除振铃效应, 滤波器频率响应应该具有光滑的、缓慢变化的特性, 因此选用巴特沃思滤波器, 其传递函数为

$$H(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{1 + k [D_0/D(u, v)]^{2n}} & D(u, v) \neq 0 \\ 1 & D(u, v) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, D_0 为截止频率, k 的选取是当 $D(u, v) = D_0$, $H(u, v) = \sqrt{2}/2$ 时的值, 即 $k = 0.414$, n 为滤波器的阶数, $D(u, v)$ 是 (u, v) 点距频率矩形原点的距离。本文将该方法称为方法 1。

小波变换, 增大低层高频系数, 突出景物信息, 减小高层高频系数, 适当减小低频系数, 烟雾弱化处理。实验结果表明, 该方法明显优于同态滤波, 烟雾弱化处理取得了满意的效果。

1.3.1 小波基本原理

设中 $\phi(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别为 $L^2(\mathbf{R})$ 空间的尺度函数和小波函数, 将它们进行尺度伸缩和位移得到函数集合:

$$\Phi = \{\phi_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}}\phi(2^{-j}t - k), j, k \in \mathbf{Z}\} \quad (3)$$

$$\Psi = \{\varphi_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}}\varphi(2^{-j}t - k), j, k \in \mathbf{Z}\} \quad (4)$$

如果由相同 j 的所有 $\phi_{j,k}$ 构成 V_j 尺度空间的一组标准化正交基, 由相同 j 的所有 $\varphi_{j,k}$ 构成 W_j 小波空间的一组标准化正交基, 则由多分辨率分析的理论可知, 各个尺度空间、小波空间满足以下关系:

$$\cdots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \subset \cdots \quad (5)$$

$$V_{m-1} = V_m \oplus W_m, \text{ 且 } W_m \perp V_m \quad (6)$$

由式(5)(6)得到:

$$\phi_{m,0} \in V_{m-1}, \varphi_{m,0} \in V_{m-1} \quad (7)$$

对于 $\forall f(t) \in V_{m-1}$, 有

$$f(t) = \sum_k C_{m-1,k} \phi_{m-1,k} \quad (8)$$

或者

$$f(t) = \sum_k C_{m,k} \phi_{m,k} + \sum_k D_{m,k} \varphi_{m,k} \quad (9)$$

式中, $C_{m-1,k}$ 称为 $f(t)$ 在 V_{m-1} 尺度空间的低频系数, $C_{m,k}$ 和 $D_{m,k}$ 称为 $f(t)$ 在 V_m 尺度空间的低频系数和高频系数。

数字图像是 2 维离散的, 具有有限分辨率。若 $f(x, y) \in V_{m-1}$, $f(x, y)$ 表示图像在 V_{m-1} 空间的低频系数。小波变换时需分别进行行和列方向的滤波, 首先将 $f(x, y)$ 沿行方向滤波, 然后再沿列方向滤波。可见得到的 C_m 是两次低通滤波的结果, 是 V_m 空间的低频系数, 其余结果 D_m^H, D_m^V, D_m^D 分别称为水平高频系数、垂直高频系数和对角高频系数。第 2 层小波变换, 用同样的方法对 C_m 滤波^[11]。

1.3.2 加权小波系数的烟雾弱化方法

由以上分析可知, 2 维图像作多层小波变换后, 同一层的高频系数比低频系数频率高, 低层的低频系数比高层的低频系数频率高, 最高层的低频系数频率最低。某一层的高频系数是低一层低频系数高通滤波的结果, 而该层的低频系数通过高通滤波得到高一层的高频系数, 因此高一层的高频系数比这层的高频系数频率低。由此可推出, 高层的高频系数频率低于低层高频系数。

设实验图像处于 V_{m-1} 空间, 对图像进行层数为 n 的小波变换。如果取 $m=1$, 并不影响分析结果, 此时最高层代表 V_n 空间。低频系数 C_n 部分以及较高层的高频系数频率较低, 可能包含了图像的烟雾特征。而低层的高频系数代表图像的景物信息, 是

高频部分。因此以某一层为分界, 令该层为 l 层, 设置权重因子, 对于层数不大于 l 的层, 增大其高频系数, 使图像轮廓突出, 而层数大于 l 的层, 减小其高频系数, 减弱烟雾的影响。图像的能量主要集中在低频系数 C_n 部分, 如果 C_n 的权重因子设得过小, 图像能量损失太多, 信息丢失的就多。研究发现, 对于烟雾均匀覆盖的图片, 小波分解层数适当, C_n 部分包含的烟雾信息相当少, 可以保留 C_n 不变。而烟雾非均匀覆盖的图片, C_n 总包含大量的烟雾信息, 此时为保证能量损失较少, 设置小于 1 大于 0.5 的权重因子。该算法(方法 3)如下所示:

$$\begin{cases} g_i^H(x, y) > 1 \\ g_i^V(x, y) > 1 \\ g_i^D(x, y) > 1 \end{cases} \quad 1 \leq i \leq l$$

$$\begin{cases} g_i^H(x, y) < 1 \\ g_i^V(x, y) < 1 \\ g_i^D(x, y) < 1 \end{cases} \quad l+1 \leq i \leq n \quad (10)$$

$$g_n^C(x, y) \leq 1$$

式中, $g_i^H(x, y), g_i^V(x, y), g_i^D(x, y)$ 和 $g_n^C(x, y)$ 分别为第 i 层 (x, y) 处水平、垂直、对角高频系数以及第 n 层低频系数的权重因子。最后将所有系数重构, 得到处理结果。整个过程如图 2 所示。

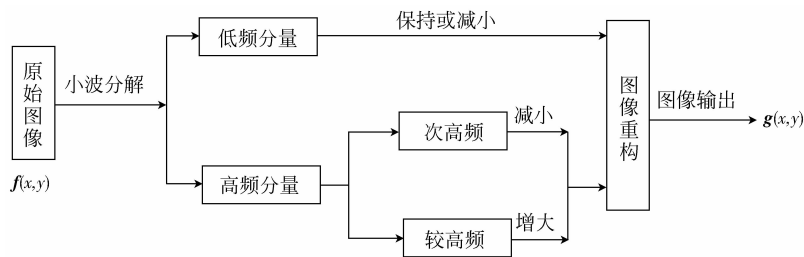


图 2 小波处理流程图

Fig. 2 The flowchart of wavelet transform

对每个系数设置权重因子, 随着图像尺寸和分解层数的增加, 变得很复杂, 并且每个系数设置多大的因子合适也是很难考虑的。因此具体处理时, $1-l$ 层、 $l+1-n$ 层的所有高频系数、低频系数 C_n 的权重因子分别设为同一个值。不断调整分界层数 l 的值, 使得景物和烟雾的信息能尽可能分别分布在 $1-l$ 层、 $l+1-n$ 层, 以取得最佳处理结果。

2 实验结果及分析

针对以上 3 种方法, 做了相应的实验, 在方法 1 中, 我们选取了截止频率 $D_0=0.8$, 巴特沃思滤波器的阶数 $n=3$; 在方法 2 中我们选取 $D_0=0.9, n=3$; 在方法 3 中我们选用 ‘Daubechies’ 小波系列里的 ‘db8’ 小波对原图像进行 8 层小波分解, 先选取

$l=6$, 各层小波系数的权重因子(系数 1)分别为 $g_1^H = g_1^V = g_1^D = 2, g_2^H = g_2^V = g_2^D = 3, g_3^H = g_3^V = g_3^D = 4, g_4^H = g_4^V = g_4^D = 5, g_5^H = g_5^V = g_5^D = 6, g_6^H = g_6^V = g_6^D = 8, g_7^H = g_7^V = g_7^D = 0.7, g_8^H = g_8^V = g_8^D = 0.6, g_8^C = 0.95$, 再选取 $l=7$, 各层小波系数的权重因子(系数 2)分别为

$g_1^H = g_1^V = g_1^D = 3, g_2^H = g_2^V = g_2^D = 4, g_3^H = g_3^V = g_3^D = 4, g_4^H = g_4^V = g_4^D = 5, g_5^H = g_5^V = g_5^D = 6, g_6^H = g_6^V = g_6^D = 7, g_7^H = g_7^V = g_7^D = 8, g_8^H = g_8^V = g_8^D = 0.7, g_8^C = 0.9$, 用以上这些参数对含有烟雾的原图(图 3(a))烟雾弱化处理, 其结果如图 3(d)(e)所示。



(a) 含有烟雾原图



(b) 方法 1



(c) 方法 2



(d) 方法 3 (系数 1)



(e) 方法 3 (系数 2)

图 3 烟雾图像及处理后图像

Fig. 3 Smoke image and images after enhancement

从视觉上来看, 3 种方法对烟雾弱化处理都有一定的效果, 尤其方法 3 最为明显, 由于视觉评价图像处理结果带有主观性, 本文采用均值、标准差、熵、平均梯度和边缘强度等 5 种方法客观地评价图像处理效果, 这 5 种方法的定义如下:

均值:
$$\overline{G(X)} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} G(X_{ij})$$

标准差:

$$Std = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (G(X_{ij}) - \overline{G(X)})^2}$$

熵:
$$H[g(x, y)] = - \sum_{i=0}^{A-1} p_i \cdot \log_2(p_i)$$

平均梯度:
$$g = \frac{1}{(M-1) \times (N-1)} \cdot$$

$$\sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \sqrt{\left[\left(\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial g(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] / 2}$$

边缘强度:

$$ei = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sqrt{g_a(x, y)^2 + g_b(x, y)^2}$$

以上 5 个公式中, $g(x, y)$ 表示处理后的图像, $g_a(x, y)^2$ 和 $g_b(x, y)^2$ 是 $g(x, y)$ 经过 'sobel' 算子边缘检测后得到的检测图像, M, N 分别为图像的行数和列数, p_i 表示像素值为 i 的像素出现的概率。经计算后得到的结果如表 1 所示。

表 1 各图像客观评价结果

Tab.1 The result of objective appraisal of every image

	原图	方法 1	方法 2	方法 3	
				系数 1	系数 2
均值	138.648 9	99.215 9	107.219 4	131.238 3	123.641 1
标准差	23.102 8	41.832 5	45.920 2	26.368 1	28.341 9
熵	6.446 0	6.305 5	6.429 7	6.434 2	6.430 7
平均梯度	0.956 5	1.777 9	1.862 1	2.437 3	3.241 9
边缘强度	8.081 6	14.975 8	15.602 8	22.011 1	28.299 9

从上表可以看出,3 种方法处理后的平均灰度都比原图要小,在统计意义上达到了我们的要求,达到了理想的预期结果;处理后图像的标准差都比原图大,说明了处理后的图像比原图像有更多的细节信息,达到了烟雾弱化处理的目的;方法 3 结果的熵值与原图最接近,说明了小波变换烟雾弱化处理损失的信息量最少;在平均梯度和边缘强度方面,处理后的值都比原图的值大很多,尤其方法 3 更明显,说明在图像清晰度和边缘清晰度方面得到了很大的改善。

在方法 3 中,从两个不同的加权系数增强后的结果可以看出,系数 2 增强后图像的熵比系数 1 增强后的熵小,说明在小波分解的第 7 层频率上所含的烟雾较少,但从标准差、平均梯度及边缘强度值可以看出,系数 2 烟雾弱化后的图像对比度比系数 1 烟雾弱化后的图像对比度大,这正是由于在系数 2 中选取 $l=7$,即增大前 7 层小波系数值造成的。

3 结 论

从各项数据及处理后的图像可以看出,在这 3 种方法中,加权小波系数法对烟雾弱化最有效,改进的同态滤波比传统的同态滤波在烟雾弱化方面更有效。

加权小波系数法在图像处理过程中,不同图像分解层数、权重因子未必一样,对这些参数的选择较多地依赖于主观经验,需要人过多的干预。因此如何自动寻找合适参数将成为下一步研究的主要内容之一。

参考文献 (References)

[1] Wang B, One A, Muramatsu K, et al. Automated detection and

removal of clouds and their shadows from Land sat TM images [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 1999, E82 - D(2) :453-460.

[2] Wang Hui, Tan Bin, Shen Zhiyun. The processing technology of removing clouds image based on the multi-resource RS image [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2001, 18(3) :195-198. [王惠, 谭兵, 沈志云. 多源遥感影像的去云层处理 [J]. 测绘学院学报, 2001, 8(3) :195-198.]

[3] Fang Yong, Chang Benyi. The research of removing the affect of clouds cover by combining the multi sensor images [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(A2) :138 - 141. [方勇, 常本义. 联合应用多传感器影像消除云层遮挡影响的研究 [J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(A2) :138-141.]

[4] Yan Dongmei, Zhao Zhongming. Cloud-covered segment extraction based on the image reconstruction form the low frequency branch of wavelet decomposition [J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2001, 12(4) :6-10. [阎冬梅, 赵忠明. 基于小波单支重构的遥感影像云区提取 [J]. 指挥技术学院学报, 2001. 12(4) :6-10.]

[5] Li Z R, McDonnell M J. Using dual thresholds for cloud and mosaicking [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(10) :1349-1358.

[6] Wisetphanichkij S, Dejhan K, Cheevasuvit F, et al. Multi-temporal cloud removing based on image fusion with additive wavelet decomposition [EB/OL]. [2008-02-01]. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1999/ps5/ps5071.asp>.

[7] Nunez J, Otazu X, Fors O, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3) :1204-1211.

[8] Li M, Liew S C, Kwoh L K, et al. Improved Cloud-free multi-scene mosaics of spot images [J]. IEEE International, 1998, 2: 1083-1085.

[9] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. Translation by Ruan Qiuqi et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003 :144-153. [Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦等译. 北京:电子工业出版社, 2003 :144-153.]

[10] Cheng Lizhi, Wang Hongxia, Luo Yong. Wavelet theory and applications [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2004 :75 - 132. [成礼智, 王红霞, 罗永著. 小波的理论与应用 [M]. 北京:科学出版社, 2004 :75-132.]

[11] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7) : 674-693.