

基于模糊小波的图像对比度增强算法

刘国军,唐降龙,黄剑华,刘家峰

(哈尔滨工业大学计算机科学与工程系,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 针对传统的图像对比度增强方法存在的诸多问题,本文提出了一种模糊小波增强算法.首先,将低对比度图像进行规范化,选定一个确定小波对规范化后的图像进行小波变换,得到小波系数.然后,模糊化低通小波系数,再采用全局和局部信息进行调整.对高通小波系数,采用非线性运算进行调整.将调整后的小波系数反变换到空域上,得到增强后的结果.最后,给出几种增强算法实验结果的比较和分析,表明该算法对低对比度图片的增强是非常有效的,并且很好的抑制了噪声,没有出现局部区域过增强或增强不足的现象.

关键词: 小波变换;模糊逻辑;对比度增强

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 04-0643-04

An Image Contrast Enhancement Approach Based On Fuzzy Wavelet

LIU Guo-jun, TANG Xiang-long, HUANG Jian-hua, LIU Jia-feng

(Department of Computer Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To improve conventional methods for contrast enhancement, this paper presents a novel approach based on wavelet transform and fuzzy logic. Firstly, normalize the low contrast image to reduce the effects of different illuminations. Then choose a specific wavelet transform to convert the normalized image and obtain wavelet coefficients. The low-pass coefficients are fuzzified by the linear operator and use both the global and local information to define and enhance the image's global contrast. For high-pass coefficients, utilize nonlinear operator to enhance the details of images. Finally, the inverse wavelet transform is applied to map the result into space domain. Experimental results of the proposed approach and other conventional methods are compared and analyzed to demonstrate that the proposed approach is very effective in enhancing the low contrast image without over-enhancement and under-enhancement.

Key words: wavelet transform; fuzzy logic; contrast enhancement

1 引言

图像增强的目的是采用一系列技术改善图像的视觉效果,或者将图像转换成一种更适合于人或机器进行分析处理的形式.图像增强的方法基本上可以分为空间域处理和频域处理两大类.空间域处理是在原图像上直接进行数据运算,常见的处理方法有:线性拉伸、直方图均衡化^[1],反锐化掩模^[2]等.频域处理是在图像的傅立叶等变换域上进行修改,增强我们感兴趣的频率分量,然后,将修改后的值进行傅立叶等变换的反变换,便得到增强的图像.但这些方法在增强过程中不可避免地会带来噪声的过增强.这些方法应用于低信噪比图像时,会严重影响视觉质量.基于小波变换的方法提供了解决这一问题的新途径.小波的多尺度、空频域分析特性适合于增强处理.

基于小波分析的图像增强方法主要有三种^[3]:1.子带增强法^[4]:是在小波分解与精确重建的基础上,对每个分解层的

图像进行线性运算处理,即图像被分解为不同子带的变换系数,根据需要的子带成份进行增强,然后再经过小波逆变换重建图像.2.反锐化掩模法^[4]:类似空域的反锐化掩模法,只是得到原始图像模糊版本的方法不同.在空域变换中,使用拉普拉斯算子;而在小波变换中,将低频子带图进行滤波处理,成为原始图像的一个模糊版本.3.自适应增益^[5,6]:是对小波的增益进行非线性的自适应控制,在图像增强中,其目的是提高图像的视觉效果,避免伪像产生.

Qin和El-Sakka^[7]对分解后的低频子带小波系数使用了直方图均衡化的方法.但是,直方图均衡化的方法只考虑了全局信息,而忽略了局部细节.

近年来,人们还提出了脊波(Ridgelet)变换^[8]和曲波(Curvelet)变换^[9]等新的多尺度几何分析方法.但是,这些新的方法的实际应用还不多见^[10].焦李成等讨论了这些新的变换方法还存在一些问题^[11].

但是,以上几种方法仍然存在一些问题:由于只是在不同

子带上进行简单的线性或非线性运算,考虑的都是当前子带的全局信息,而忽略了子带的局部信息,尤其是低频子带.因此,增强完的结果必定会在某些局部区域上出现过增强或增强不足的现象.

本文提出了一种新的图像增强算法,可以很好地解决以上问题.该方法在高频子带上利用非线性运算增强图像的细节,同时抑制噪声.在低频子带上,对其小波系数进行模糊化,再利用全局和局部信息进行整体对比度的增强,局部放大系数的选择由原始图像自身的属性所决定.实验证明,通过和几种经典算法

的比较,该算法可有效地增强图像的边缘、细节信息及全局对比度,并且不会出现局部区域过增强和增强不足的现象.图 1 表示模糊小波增强算法的框图.

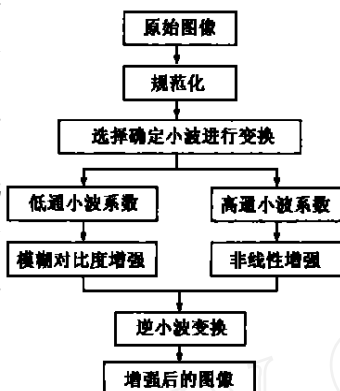


图 1 模糊小波增强算法的框图

2 模糊小波增强算法

2.1 多小波选取

小波变换的种类有很多,包括 Haar、Daubechies、symlets 和 Biorthonal^[12]等.由于每种小波变换的低通和高通滤波器各不相同,所以,增强后的结果是不一样的.在基于小波分析的重构技术中^[13],理想的小波基应该具有如下性质:(1)线性相位特性,以减少或消除重构图像在边缘处的失真.(2)紧支集特性,支集越短,小波计算的复杂度越低,便于快速实现.

正交小波满足: $\int_{jk} f_m = \int_{jl} f_m$ 也就是对小波函数的伸缩和平移构成的基函数完全正交,而双正交小波满足的正交性为: $\int_{jk} f_m = \int_{jl} f_m$ 也就是对不同尺度伸缩下的小波函数之间有正交性,而同尺度之间通过平移得到的小波系数之间没有正交性,所以用分解和重构的小波不是同一个函数,相应的滤波器也不能由同一个小波生成.双正交小波的这种性质在信号的相移之间保留了一部分的冗余,它有着正交小波不具备的优点,可以通过 FIR 滤波器来精确的重构信号^[14].而且由于紧支集的双正交小波及所对应的 FIR 是对称的或反对称的,且有线性相位,因此,可采用对称扩展缓解在图像边界出现的混叠效应^[15].否则,其他的正交小波,不得不采用周期扩展,而这样容易在图像边界处产生块效应.因此,选择具有紧支集的双正交小波 $Bior(Nr=3, Nd=1)$,并且进行 2 级分解,得到了最佳的实验结果.

2.2 低通小波系数的调整

选择了确定的小波变换之后,分别对原始图像的水平垂直方向进行小波变换,可形成三个具有方向选择性的高频带 HL、LH 和 HH,和一个低频带的 LL.低频带的 LL 保存了原始图像的基本信息,将分以下 7 步对其值进行调整,以增强低频信息里保留的部分边缘信息以及全局对比度.

(1) 使用 S 型函数对低通小波系数进行模糊化,公式如下:

$$U_{mn} = \begin{cases} 0, & 0 < W_{a_{mn}} < a \\ \frac{(W_{a_{mn}} - a)^2}{(b - a)(c - a)}, & a < W_{a_{mn}} < b \\ 1 - \frac{(W_{a_{mn}} - c)^2}{(c - b)(c - a)}, & b < W_{a_{mn}} < c \\ 1, & W_{a_{mn}} > c \end{cases} \quad (1)$$

a , b 和 c 是决定 S 型函数形状的参数, $W_{a_{mn}}$ 和 U_{mn} 分别是模糊化前后的值.参数 a , b 和 c 的选择取决于每张图片自身的属性.类似于灰度图像的直方图,低通小波系数的统计频数直方图提供了原图像在小波域上的全局信息.参数 a 和 c 分别为统计频数直方图左右两侧去掉边缘离散点(噪声点)后的端点值.参数 b 的值并非 a 和 c 的中点值,而是通过计算模糊熵得到的, b 的最优值应能使模糊熵取得最大值.计算公式如下:

$$b = \operatorname{argmax} \{ \operatorname{En}(W_{a_{mn}}; a, b, c) \mid W_{a_{\min}} < a < b < c < W_{a_{\max}} \} \quad (2)$$

$$\operatorname{En}(W_{a_{mn}}) = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N (-U_{kl} \log_2 U_{kl} - (1 - U_{kl}) \log_2 (1 - U_{kl}))}{MN} \quad (3)$$

$W_{a_{\min}}$ 和 $W_{a_{\max}}$ 分别是 $W_{a_{mn}}$ 的最小值和最大值.

(2) 以像素点 (m, n) 为中心的局部窗口 W_{mn} 内计算边缘均值 $E_{U_{mn}}$, $K_{U_{mn}}$ 是在模糊域中使用拉普拉斯算子得到的边缘值.

$$E_{U_{mn}} = \frac{\sum_{(m,n) \in W_{mn}} (U_{mn} \times K_{U_{mn}})}{\sum_{(m,n) \in W_{mn}} K_{U_{mn}}} \quad (4)$$

(3) 计算出局部对比度 $C_{U_{mn}}$

$$C_{U_{mn}} = \frac{|U_{mn} - E_{U_{mn}}|}{|U_{mn} + E_{U_{mn}}|} \quad (5)$$

(4) 计算对比度的放大系数 Amp_{mn} , 公式(6)~(9).

$$Amp_a = Amp_{\min} + (Amp_{\max} - Amp_{\min}) \times \left(\frac{U_{\text{low}} - U_{mn}}{U_{\text{low}} - U_{\min}} \right) \quad (6)$$

$$Amp_b = Amp_{\min} + (Amp_{\max} - Amp_{\min}) \times \left(\frac{U_{mn} - U_{\text{low}}}{U_{\text{high}} - U_{\text{low}}} \right) \quad (7)$$

$$Amp_c = Amp_{\min} + (Amp_{\max} - Amp_{\min}) \times \left(\frac{U_{mn} - U_{\text{high}}}{U_{\text{max}} - U_{\text{high}}} \right) \quad (8)$$

$$Amp_{mn} = \begin{cases} Amp_a \times \frac{U_{\text{low}}}{U_{mn}} & \text{if } U_{mn} < U_{\text{low}} \\ Amp_b & \text{if } U_{\text{low}} < U_{mn} < U_{\text{high}} \\ Amp_c \times \frac{U_{mn}}{U_{\text{high}}} & \text{if } U_{mn} > U_{\text{high}} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $Amp_{\max} = 1$, $Amp_{\min} = \frac{c - a}{W_{a_{\max}} - W_{a_{\min}}}$. U_{low} 和 U_{high} 分别是 U_{mn} 为中心的局部窗口内理想直方图两侧的边缘值.在实际计算中,可将局部窗口内的所有数值进行排序, U_{low} 和 U_{high} 分别取排序后左右两侧的第二十个值. U_{\min} 和 U_{\max} 分别是局部窗口内的最小值和最大值.如果 $U_{\text{low}} < U_{mn} < U_{\text{high}}$, $Amp_{\min} < Amp_{mn} < Amp_{\max}$, 此时, $Amp_{mn} < 1$, 该点的小波系数将变大,即原始图像被增强.否则, $U_{mn} \in [U_{\min}, U_{\text{low}}]$ 或 $U_{mn} \in [U_{\text{high}}, U_{\max}]$, 此时, $Amp_{mn} > 1$, 该点的小波系数将变小,即原始图像

变暗.

(5) 计算调整后的局部对比度 $C_{U_{mn}}$

$$C_{U_{mn}} = (C_{U_{mn}})^{Amp_{mn}} \quad (10)$$

(6) 计算调整后的隶属度函数值 U_{mn}

$$U_{mn} = \begin{cases} E_{U_{mn}} \times \frac{(1 - C_{U_{mn}})}{(1 + C_{U_{mn}})} & \text{if } U_{mn} \leq E_{U_{mn}} \\ E_{U_{mn}} \times \frac{(1 + C_{U_{mn}})}{(1 - C_{U_{mn}})} & \text{if } U_{mn} > E_{U_{mn}} \end{cases} \quad (11)$$

(7) 反模糊化, 计算调整后的低通小波系数 Wa

$$Wa = \begin{cases} Wa_{\min} & , U_{mn} = 0 \\ a + \sqrt{U_{mn}(b-a)(c-a)} & , 0 < U_{mn} < \frac{b-a}{c-a} \\ c - \sqrt{(1-U_{mn})(c-b)(c-a)} & , \frac{b-a}{c-a} < U_{mn} < 1 \\ Wa_{\max} & U_{mn} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

注: 对于一个比较平坦的区域, 即区域内灰度值变化不大, 在第 2 步中, 公式 (4) 的分母会为 0, 此时将跳过 3-7 步的计算. 在该点原始图像的灰度值可保持不变或者乘以一个比 1 小的系数因子, 因为大多数的这种区域有可能是背景部分, 所以, 要使它变得更暗一些, 以使前景显得更加突出.

2.3 高通小波系数的调整

使用非线性算子调整高通小波系数, 见公式 (13), Wa_h 和 Wa_l 分别是调整前后的高通小波系数, K 是系数因子 (应该大于 1), T 是阈值^[16]. 合适的阈值可有效的抑制噪声、增强边缘. 在本文算法中, 参数 $K=20, T=0.1$.

$$Wa_h = \begin{cases} Wa_h - (K - 1) \times T & \text{if } Wa_h < -T \\ Wa_h \times K & \text{if } |Wa_h| < T \\ Wa_h + (K - 1) \times T & \text{if } Wa_h > T \end{cases} \quad (13)$$

3 实验结果和比较

像在前文中谈到的一样, 因为基于模糊小波的对比度增强算法既考虑了全局信息 (整体灰度信息) 又考虑到了局部信息 (窗口内的灰度信息), 所以, 增强后的图片不但全局对比度得到了很好地增强, 而且局部区域的纹理信息也得到了较好地增强. 图 2 是原始低对比度图片 (256 级灰度图), 图 3 和图 4 分别是采用直方图均衡化和反锐化掩模两种方法增强后的结果. 图 3 仅仅使用了全局信息, 所以部分区域出现了过增强和增强不足的现象. 在图 3 中, 则很明显地看到前景花瓣花蕊过于明亮, 属于过增强. 而蜜蜂背部的局部区域整体偏亮, 背部条纹分辨不清, 属于对比度增强不足. 在图 4 中, 由于反锐化掩模的方法只是增强高频信息, 图片中的边缘信息和花瓣等的轮廓被增强了, 但是, 也伴有部分噪声点的出现 (在花蕊处), 同时, 图片丢失了一些低频信息, 因此, 增强后的图片有一些模糊. 应用以上的传统方法, 我们并没有得到很好的和令人满意的增强结果. 图 5 图 6 和图 7 分别选用了 Haar、CDF9.7^[17] 和 Bior3.1 小波进行增强处理后得到的结果. 在图 5 中, 可见到图像中产生了块化效应. 图 6 与图 7 都选用了双正



图 2 原始低对比度图片 (256 级灰度图) 图 3 直方图均衡化算法的增强结果
图 4 反锐化掩模算法的增强结果 图 5 模糊小波增强算法的增强结果 (Haar)
图 6 模糊小波增强算法的增强结果 (CDF 9.7) 图 7 模糊小波增强算法的增强结果 (Bior 3.1)

4 结论

本文提出了一种模糊小波的对比度增强算法, 实验结果表明该方法优于传统的对比度增强算法, 能有效的增强图像中的边缘以及细节信息和全局对比度, 并且没有出现过增强或增强不足的现象. 该算法可以有效的增强图像主要有三方面原因: (1) 放大系数 Amp_{mn} 的选择由原始图像自身的属性所决定; (2) 该算法不同于以往的小波增强算法, 不仅在高频上增强, 而且对低通小波系数使用了全局和局部信息进行调整; (3) 选择具有紧支集的双正交小波, 具有线性相位特性, 以减少或消除重构图像在边缘处的失真. 该算法可被广泛的应用到图像处理、模式识别和计算机视觉等领域中. 进一步的研究

重点在于如何对各参数进行自适应优化选取,已达到更好地增强效果。

参考文献:

- [1] R hummel. Image enhancement by histogram transformation[J]. Computer Graphics and Image Processing 6,1977. 184 - 195.
- [2] H P Chan,CJ Vyborny. Digital mammography:ROC studies of the effects of pixel size and unsharp-mask filtering on the detection of subtle microcalcifications[J]. Invest. Radiol,1987,22(7):581 - 589.
- [3] 陈武凡,杨丰,等.小波分析及其在图像处理中的应用[M].北京:科学出版社,2002.166 - 175.
- [4] 董汉丽.基于小波变换的图像增强方法研究[J].郑州纺织工学院学报,1999,10(3):40 - 43.
- [5] 许雷,郑筱祥,等.一种基于小波相位滤波即视觉非线性的医学图像自适应增强新方法[J].电子学报,1999,27(9):121 - 123.
XU Lei,ZHENG Xiaoxiang. A novel method for image enhancement of medical images based on wavelet phase filter and nonlinear human visual properties[J]. Acta Electronica Sinica,1999,27(9):121 - 123.
- [6] 吴颖谦,施鹏飞.基于小波变换的低对比度图像增强[J].红外与激光工程,2003,32(1):4 - 7.
- [7] Jinhui Qin,E-Sakka M R. A new wavelet-based method for contrast/edge enhancement[A]. Proc of IEEE Inter Conf on Image Proc[C]. Barcelona,Spain:IEEE,2003.397 - 400.
- [8] E J Candès. Ridgelets: Theory and Application[R]. USA:Department of Statistics,Stanford University,1998.
- [9] E J Candès,D L Donoho. Curvelets[R]. USA:Department of Statistics,Stanford University,1999.
- [10] J L Starck,Fionn Murtagh,E J Candès,D L Donoho. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform[J]. IEEE Trans, Image Processing,2003,12(6):706 - 717.
- [11] 焦李成,谭山.图像的多尺度几何分析:回顾和展望[J].电子学报,2003,31(12A):1975 - 1981.
JIAO Licheng,TAN Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. Acta Electronica Sinica,2003,31(12A):1975 - 1981.
- [12] Gonzalez R C,R E Woods. Digital Image Processing[M]. Upper saddle River,New Jersey:07458,Prentice-hall,Inc,2000.
- [13] 张义荣,鲜明,肖顺平.根据时-频分辨特性的B样条双正交小波的选择[J].计算机学报,2002,25(4):430 - 437.
- [14] 董长虹,等. Matlab小波分析工具箱原理与应用[M].北京:国防工业出版社,2004.10 - 29.
- [15] 乔世杰.小波图像编码中的对称边界延拓法[J].中国图像图形学报,2000,5(9):725 - 729.
- [16] Iztok Koren,Andrew Laine. Interactive wavelet processing and techniques applied to digital mammography[A]. Proc of IEEE Inter Conf on Acoustics,Speech and Signal Processing[C]. Atlanta,GA:IEEE,May,1996.1415 - 1418.
- [17] Cohen A,Daubchies I,Feauvean J. Biorthogonal base of compactly supported wavelets[J]. Commu Pure and Appl Math,1992,45(5):485 - 560.

作者简介:



刘国军 男,1979年出生于哈尔滨市,现为哈尔滨工业大学计算机科学与工程系博士研究生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉、人体运动分析等. E-mail:hitliu@hit.edu.cn.

唐降龙 男,1960年出生于江苏省六合县,哈尔滨工业大学计算机科学与工程系教授、博士生导师,主要研究方向为模式识别、中文信息处理、人工智能、图像处理、计算机视觉等,已在国内外著名刊物上发表论文数十篇.