

一种新的基于迭代模糊控制的图像滤波方法^{*})

鲁瑞华 刘光远

(西南大学电子信息工程学院 重庆 400715)

摘要 本文提出一种新的基于迭代模糊控制的滤波方法,该方法具有消除脉冲噪声、平滑高斯噪声而同时又有效地保持边缘和图像细节的特性。它主要基于这样一个思想,即不让相关区域的每个点被每个基本的模糊规则同样地激活。此法的种种改进均大大增强了本文提出的滤波方法的性能。

关键词 迭代模糊控制,图像滤波,模糊规则,隶属函数,均方误差

A Novel Image Filtering Method Based on Iterative Fuzzy Control

LU Rui-Hua LIU Guang-Yuan

(School of Electronic Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract A novel iterative fuzzy control-based method of image filtering is proposed in this paper. The method has distinguishing properties of removing impulsive noise and smoothing out Gaussian noise while preserving edges and image details effectively. The proposed filtering approach is mainly based on the idea of not letting each point in the area of concern being uniformly fired by each of the basic fuzzy rules. Different modifications of the proposed filtering method improve its performance greatly.

Keywords Iterative fuzzy control, Image filtering, Fuzzy rules, Membership function, Mean square error

1 引言

任何一个在有噪声干扰的频道传输的数字化图像都会退化,因此在图像处理中消除此种退化而同时保持原始图像的完整性便成为十分重要的问题。解决此问题的关键步骤是对图像进行滤波。图像滤波的目的是消除脉冲噪声、平滑非脉冲噪声和增强输入图像的边缘或某些突出结构。

噪声滤波是指用与局部设备场境相关的新值取代图像中每个像素的灰度级值。理想的滤波算法应因基于局部设备场境的像素而异。例如,如果局部区域相对平滑,则像素的新值由几个相邻像素的平均值决定。另一方面,如果局部区域包含边缘或脉冲噪声像素,则应使用不同类型的滤波器。但设置选择适当滤波器的条件极为困难,因为局部条件只有在图像某些部分才能被模糊地评估。因此,滤波系统需要能够用含糊而不确定的信息进行推理,这恰是模糊逻辑共同的习惯用法。

噪声平滑和边缘增强一直就是两种相互冲突的处理方法,因为平滑一个区域可能破坏一个边缘,而增强边缘的清晰度则可能导致产生不必要的噪声。为解决此问题,已提出了多种技术^[1,2]。本文则提出一种新的基于迭代模糊控制的滤波(iterative fuzzy control-based filtering, IFCF)方法,该法可以消除脉冲噪声,平滑高斯噪声,而同时又有效地保持边缘和图像细节。

2 模糊控制与图像处理

模糊控制以模糊逻辑为基础,是一种基于模糊数学理论的新型控制方法。它的理论和实现技术与传统的控制理论和

技术大不相同。模糊集理论在有效表示动态系统的输入/输出关系方面有着巨大的潜能,因此得以广为流行。在基于公认规则的图像处理方法中^[3],人们可以使用语言术语试探性地表达人的直觉知识。这实质上是高度非线性的,因而不可能轻易用传统的数学建模表示其特性。另外,此种方法允许将试探性的模糊规则融入种种常规方法,导致产生更加灵活的设计技术。如 Russo 提出了基于模糊规则的平滑、增强清晰度和边缘检测的算子^[4,5],文^[6]介绍了基于模糊规则的图像增强的方法。但应指出,所谓模糊控制,只是在所采用的控制方法中应用了模糊数学理论,而它所进行的仍然是确定性的工作。它不仅能成功地实现控制,而且能模仿人的思维方法,对一些无法数学建模的过程进行有效控制。

在数字图像信息处理中,由于图像信息本身的复杂性和它们之间较强的相关性,在处理过程中的不同层次可能出现不完整性和不精确性、非结构化问题以及建模困难等,模糊集理论应用于图像处理在一些情况下比硬计算方法效果更好,是一种颇有潜力的图像智能信息处理方法。

3 基于迭代模糊控制的滤波

本文提出了在图像处理系统中采用模糊的 if-then-else 规则机制的总体结构。基于迭代模糊控制的滤波方法的核心思想是不让相关区域的每个点被每个基本的模糊规则同样地激活。这个思想在模糊控制中得到广泛应用。为了保证这个目标的实现,在图像滤波中往往使用下列模糊规^[7]和图 1 所给的隶属函数:

规则 1 如果(更多的 x_i 是 NB),则 y 是 NB

规则 2 如果(更多的 x_i 是 NM),则 y 是 NM

^{*})基金项目:重庆市应用基础研究资助项目(No. 2001-6968)、校科技基金资助项目(No. SWNUF2004006)。鲁瑞华 教授,硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理及数字通信;刘光远 教授,博士,硕士生导师,主要研究智能信息处理。

- 规则 3 如果(更多的 x_i 是 NS),则 y 是 NS
 规则 4 如果(更多的 x_i 是 PS),则 y 是 PS
 规则 5 如果(更多的 x_i 是 PM),则 y 是 PM
 规则 6 如果(更多的 x_i 是 PB),则 y 是 PB
 规则 0 否则, y 是 Z

上面各个 x_i 是相邻像素 I_i (位于一个尺寸为 $N \times N$ 的窗口)与中心像素 I 之间的亮度差,即 $x_i = I_i - I$ 。输出变量 y 是加于 I 以产生合成像素亮度 I' 的数量。术语集合 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、PS(正小)、PM(正中)和 PB(正大)是表示输入和输出空间恰当的模糊区域划分的模糊集,具有一般三角形形状的隶属函数(见图 1)。图 1 是在量化后的论域中,以论域元素为横坐标,以隶属度为纵坐标而画出的模糊量隶属函数图形。这些值是论域 $[-256, 256]$ 中语言变量 x_i 和 y 的语言值^[8]。more 表示 S 型模糊函数并且可以用下式描写:

$$\mu_{\text{more}}(t) = \begin{cases} 0 & t < a \\ 0.5 \{1 - \cos[\frac{\pi(t-a)}{b-a}]\} & a < t < b \\ 1 & t > b \end{cases} \quad (1)$$

用于实验的值是 $a=0.2, b=0.8$ 。

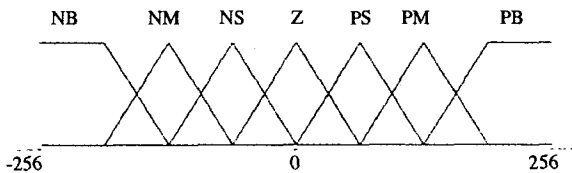


图 1 NB、NM、NS、PS、PM 和 PB 的隶属函数

3.1 蕴涵规则的激活度

规则 1 的激活度用下面关系式计算(其他蕴涵规则的激活度大致相似):

$$\lambda_1 = \min [\mu_{\text{NB}}(x_i): x_i \in \sup(\text{NB})] \times \mu_{\text{more}} \left[\frac{x_i \text{ 的个数} \in \text{支集}(\text{NB})}{x_i \text{ 的总数}} \right] \quad (2)$$

对于规则 0, 可以应用下面公式估算其激活度:

$$\lambda_0 = \max \{0, 1 - \sum_{i=1}^6 \lambda_i\} \quad (3)$$

为了从上述模糊规则根据数字推导输出, 我们使用相关乘积推理机制如下:

$$y = \frac{\sum_{i=0}^6 c_i w_i \lambda_i}{\sum_{i=0}^6 w_i \lambda_i} \quad (4)$$

式中 c_i 和 W_i 分别为第 i 个模糊规则中使用的隶属函数的中心点和宽度。因为全部 W_i 都是相等的而且 $C_0=0$, 方程(4)能够简化为

$$y = \sum_{i=1}^6 c_i \lambda_i \quad (5)$$

3.2 实验结果

在高斯噪声和混合噪声环境下, 利用模拟实验测试 IFCF 的性能。

3.2.1 IFCF 具有良好的图像复原能力 为了展示在高斯噪声环境中 IFCF 方法的性能, 以 Lena 图像为例进行研究。此图像先被均值 $M=0$ 、方差 $\sigma^2=400$ 的高斯噪声所污染, 然后利用 IFCF 方法进行滤波。滤波处理的结果如图 2 中曲线(a)所示。从该曲线很容易看到, 随着迭代次数的增加, 得到的复原图像从均方误差(MSE)意义上说更好。为了

显示此种滤波在混合噪声情况下的性能, 在本实验考察的图像中添加 $[\%2.5, \%2.5]$ 的脉冲噪声(符号 $[\%p, \%q]$ 对于脉冲噪声来说意味着 $p\%$ 的图像像素被正脉冲噪声所污染, $q\%$ 的图像像素被负脉冲噪声所污染), 结果如图 2 中曲线(b)所示。从高斯噪声和混合噪声情况下的两个结果可以得出结论, 由于迭代次数增加, IFCF 具有良好的图像复原能力。

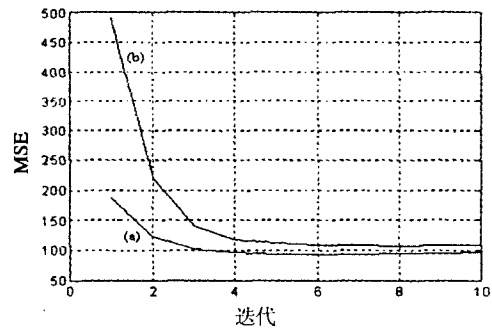


图 2 实验图像为被 $\mu=0, \sigma^2=400$ 的高斯噪声污染的 256×256 Lena 图像。(a)无脉冲噪声;(b)有 $[\%2.5, \%2.5]$ 的脉冲噪声

3.2.2 高斯噪声方差对 IFCF 性能的影响 为了表明噪声方差怎样影响 IFCF 的性能, 这里再次使用被具有不同方差($\sigma^2=0, 100, 200, 300, 400$)的零均值高斯噪声污染的 Lena 图像进行实验。图 3 表明, 已复原图像的均方误差是高斯噪声方差的函数。此图将 IFCF 性能与(文[9]中提出的)模糊加权中值滤波(fuzzy weighted median filter, FWMF)和(文[10]中提出的)边缘保持平滑滤波(edge preserving smoothing filter, EPSF)的性能进行比较, EPSF 的两个窗口尺寸分别为 5×5 和 7×7 。这些结果说明 IFCF 滤波的性能令人满意。

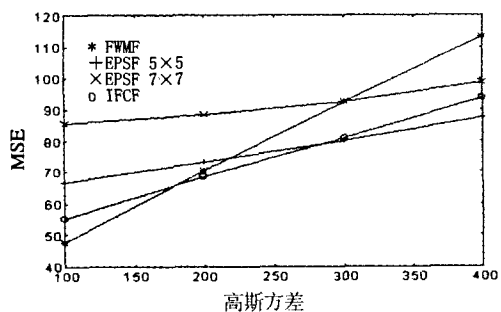


图 3 均方误差为高斯噪声方差的函数。计算的对象是 Lena 图像

3.2.3 在混合噪声环境下高斯噪声方差对 IFCF 的影响 为了表明当高斯噪声方差在混合噪声环境下发生变化时 IFCF 滤波的性能, 将图 3 中进行实验的 Lena 图像混杂上 $[\%2.5, \%2.5]$ 脉冲噪声, 并用其作为对滤波器的输入。图 4 中所示图像复原的结果表明, 与其他滤波相比, 在混合噪声中 IFCF 滤波有着最好的性能。

3.3 改进的迭代模糊控制滤波(Modified IFCF)

令人遗憾的是, 从几次测试实验观察得知, 在每次迭代中输出图像边缘均有一点模糊。因此, 增加迭代次数使图像更为不清晰。特别是在低噪声情况, 图像在几次迭代之后会变得更加退化而不是得到增强。为了解决这一问题, 每一步都对 more 函数合理调整, 使图像在边界上变得更加清晰, 如图 5 所示。

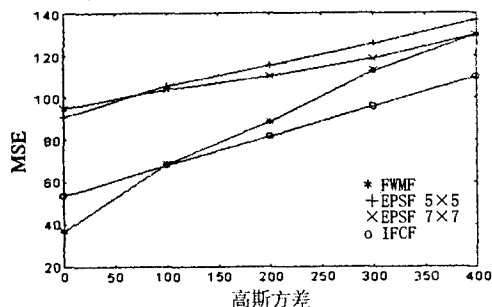


图4 不同滤波的复原图像的均方误差。滤波对象为被混合噪声(高斯噪声和[2.5,2.5]脉冲噪声)污染的Lena图像

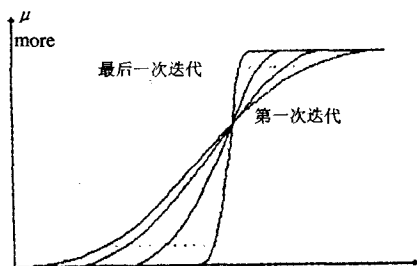


图5 迭代中 more 函数曲线形状的变化

通过使每次迭代中 more 函数的形状增加清晰度, more 函数的活动范围变小,这使得规则(1~6)将只在这些规则有较大激活可能性的那些区域被激活。这样,在几次迭代之后这些规则对于多数图像像素都不被激活,因而尽管增加迭代次数也不会产生边缘模糊的问题。这就是说,可以通过增加迭代次数而又不丢失边缘信息以达到增强 IFCF 的特性。

为了展示 MIFCF 优于 IFCF 的性能,使用被具有不同方差($\sigma^2=100, 200, 300, 400, 500, 600$)的添加性高斯噪声污染的Lena图像进行实验。MIFCF 和 IFCF 获得的复原图像的均方误差见图6。对于混合噪声的情况,添加[2.5,2.5]脉冲噪声于前面说的图像,结果见图7。这两个图像表明 MIFCF 性能优于 IFCF,在低噪声情况下尤其如此。

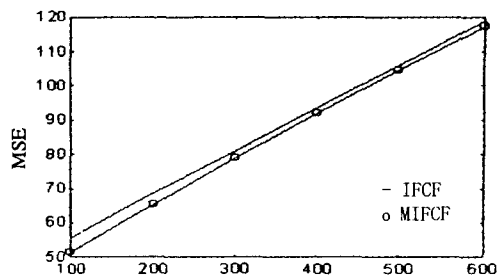


图6 均方误差是高斯噪声方差的函数。计算的对象是Lena图像,用的是3×3窗尺寸的IFCF和MIFCF

为了展示高斯噪声环境下 MIFCF 的性能,再次考察Lena图像滤波情况。该图像先被 $\mu=0, \sigma^2=0.4$ 的多次重复的高斯噪声污染,然后应用 MIFCF 滤波。此滤波处理的结果见图8(a)。在图8(b)中做同一实验,只不过 $\sigma^2=0.7$ 。从此图很容易看到,由于迭代次数增加,可以得到在均方误差意义上说更好的图像复原。

3.4 扩展迭代模糊控制滤波

扩展的迭代模糊控制滤波(extended iterative fuzzy con-

trol filter, EIFCF)主要是基于这样的想法,即每次迭代模糊论域都更为缩小,如图9所示,这使此种滤波在迭代期间得以保持其性能。此种想法的蕴含是每次迭代图像都会得到更多的滤波。因此噪声的总量在平均值和峰值意义上说将会减少,从而通过减缩模糊语言域,即精减模糊语言域的隶属函数,使被激活的模糊规则的数目稳定不变以保持该滤波能力。

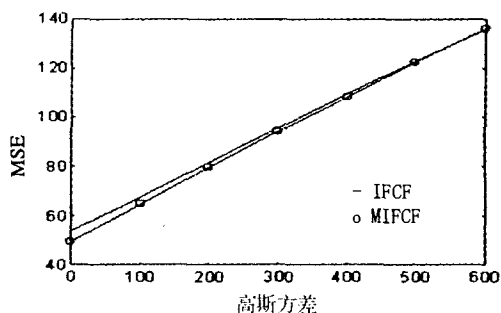


图7 3×3窗尺寸的IFCF和MIFCF滤波器的复原图像的均方误差。滤波对象为被混合噪声(高斯噪声和[2.5,2.5]脉冲噪声)污染的Lena图像

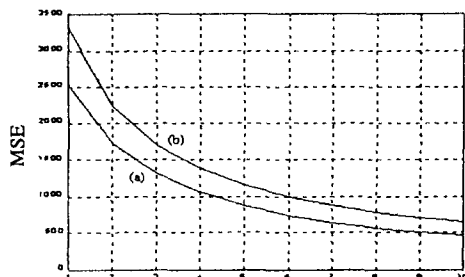


图8 MIFCF滤波的均方误差与迭代次数的关系曲线。滤波对象为被多次重复的高斯噪声污染的Lena图像。(a) $\sigma^2=0.4$, (b) $\sigma^2=0.7$

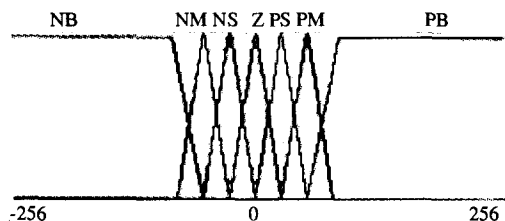


图9 几次迭代后的隶属函数

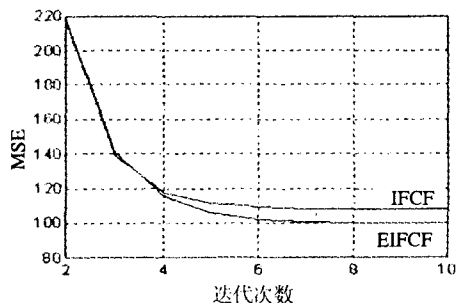


图10 不同迭代次数的IFCF和EIFCF滤波用于退化Lena图像的比较

比较随着迭代次数增加 EIFCF 与 IFCF 的性能变化时,应用两种滤波对被 $\sigma^2=400$ 的高斯噪声和[2.5,2.5]脉冲噪声污染的Lena图像进行测试,并且计算每次迭代中两种滤波的均方误差。图10所示为实验结果。从该图不难看出,

起初,两种滤波响应都好,但是几次迭代之后就只有 EIFCF 保持其滤波能力。进一步观察该图可知,滤波算法运行超过 6 次,迭代便无用了,因为不会得到更多的图像增强。

为了展示噪声方差如何影响 EIFCF 的性能,用的是被具有不同方差($\sigma^2 = 100, 200, 300, 400, 500, 600$)的零均值高斯噪声污染的 Lena 图像进行实验。图 11 显示复原图像的均方误差为高斯噪声方差的函数。比较 EIFCF 与 FWMF、EPSF、ENHANCE F^[4] 和 IFCF 的性能,结果表明 EIFCF 滤波器的性能令人满意。

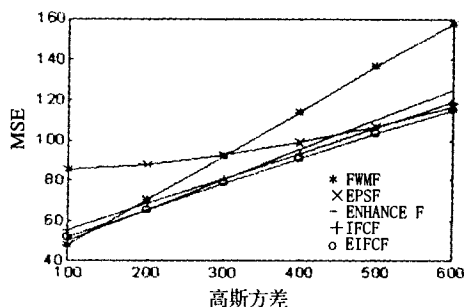


图 11 不同滤波复原图像的均方误差,滤波对象为被高斯噪声污染的 Lena 图像

为了展示在混合噪声环境下高斯噪声方差变化时 EIFCF 的性能,图像 Lena 被 $[\%2.5, \%2.5]$ 脉冲噪声污染并被用作对滤波器的输入。图 12 所示图像复原结果表明在混合噪声环境下 EIFCF 有着优于上述其他各种滤波器的性能。

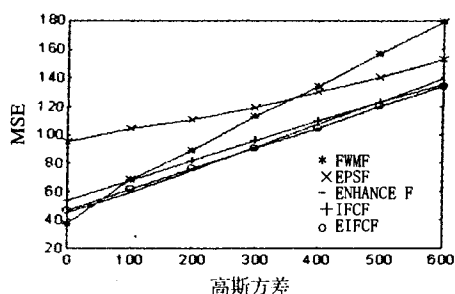


图 12 不同滤波复原的图像的均方误差。滤波对象为被混合噪声(高斯噪声和 $[\%2.5, \%2.5]$ 脉冲噪声)污染的 Lena 图像

结束语 本文介绍了一种新的基于迭代模糊控制的滤波方法,该方法具有显著的特点,即既能去除脉冲噪声和平滑高斯噪声,又能同时有效地保持边缘和图像细节。此种滤波方法的种种改进均增强了本文提出的滤波方法的性能。作为今后的研究,我们将要把所提出的滤波方法用于图像分割之类的图像处理任务,还将应用计算智能的其他一些方面研究模糊规则的优化。

参考文献

- 1 Mastin G A. Adaptive filters for digital image noise smoothing: an evaluation, Computer Vision, Graphics, Image Processing, 1985,31:103~121
- 2 Pal S K. Fuzzy sets in image processing and recognition. In: Proc. of FUZZ-IEEE'92 First IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, 1992. 119~126
- 3 Chen B T, Chen Y, Hsu W. Image processing and understanding based on the fuzzy inference approach. In: Proc. of FUZZ-IEEE'94 3rd IEEE Intl. Conf. Fuzzy Systems, 1994. 279~83
- 4 Russo F, Ramponi G. Edge detection by FIRE operators. In: Proc. of FUZZ-IEEE'94 3rd IEEE Intl. Conf. Fuzzy Systems, 1994. 249~253
- 5 Russo F, Ramponi G. A fuzzy filter for images corrupted by impulse noise. IEEE Signal Processing Letters, 1996,3(6):168~170
- 6 Choi Y, Krishnapuram R. A robust approach to image enhancement based on fuzzy logic. IEEE Trans Image Processing, 1997,6(6):808~825
- 7 余永权. 模糊控制技术与模糊家用电器. 北京:北京航空航天大学出版社,2000. 102~106
- 8 曹谢东. 模糊信息处理及应用. 北京:科学出版社,2003. 137~138
- 9 Taguchi A. A design method of fuzzy weighted median fillers. In: Proc. of ICIP'96 3rd IEEE Int. Conf. Image Processing, 1996,1:423~426
- 10 Muneyasu M, Wada Y, Hinamoto T. Edge-preserving smoothing by adaptive nonlinear filters based on fuzzy control laws. In: Proc. of ICIP'96 3rd IEEE Int. Conf. Image Processing, 1996,1:785~788

(上接第 105 页)

的、动态虚拟组织中服务的命名和更新,以及消息通知和订阅,它实际上就是 Web 服务定义语言(Web Service Definition Language, WSDL)的扩展。

在具体实现中,使用 UDDI 定义的 find_relatedBusinesses 操作发现可用服务,服务之间的关系,如分支关系、合流关系等,使用集合运算实现。

总结 本文研究了服务组合的构造算法和最优组合服务算法。组合服务用有向无环图表示,图的节点表示服务,图的边表示服务交互。最优组合服务是有向无环图中的一条路径,最优算法不仅计入了服务的计算和存储费用,同时计入服务交互费用。通过把节点费用(计算和存储费用)转移到边(服务交互费用)上,提出了基于 Dijkstra 算法的最优组合服务算法,其算法复杂度为 $O(n^2)$ 。这些算法既可用 Web 服务流程描述语言如 WSFL 实现,也可用网格服务流程语言如 GSFL 实现。

在研究服务组合的构造时,服务的语义^[7]和服务的安全性是非常重要的问题,本文对这些问题均未涉及。

参考文献

- 1 Horn P. Autonomic Computing; IBM's perspective on the State of Information Technology. <http://www.research.ibm.com/autonomic/>, Oct. 2001
- 2 Thatte S. XLANG; Web Services for Business Process Design. <http://www.gotdotnet.com/team/xml-wsspecs/xlang-c/>, December. 2001
- 3 Leymann F. Web Services Flow Language Web Services Flow Language (WSFL 1.0). <http://www-306.ibm.com/software/solutions/webservices/>, May 2001
- 4 Andrews T, et al. Business Process Execution Language for Web Services Version 1.1. <http://www-106.ibm.com/developerworks/webservices/library/ws-bpel/>, May 2003
- 5 Wagstrom P, Krishnan S, von Laszewski G. GSFL: A Work-flow Framework for Grid Services. <http://www-fp.mcs.anl.gov/division/publications/>, Aug. 2002
- 6 Foster I, Kesselman C, Nick J, et al. The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration. <http://www.globus.org/research/papers/ogsa.pdf>, June 2002
- 7 Agarwal M, Parashar M. Enabling Autonomic Compositions in Grid Environments. In: the Proc. of the 4th International Workshop on Grid Computing (Grid 2003), Phoenix, Arizona. 2003. 34~41