

基于形态学的可变权值匹配自适应图像增强算法

刘艳莉^① 桂志国^{*①②}

^①(中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

^②(仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 为了精确提取图像的细节特征,改善图像增强的效果,该文提出了一种基于形态学的可变权值自适应增强算法。通过构造扩展全方位多尺度结构元素,并进行 top-hat 变换,分解了图像不同方向不同尺度的细节。该文打破了传统形态学增强算法中各方向细节取均值融合的思想,实现了根据图像的局部灰度特性,动态调整各方向不同尺度细节的权值。在图像增强过程中,根据提取到的细节的结构化特征,构造相应的自适应增益函数,从而实现图像的自适应增强。实验结果表明,该算法能较好地利用图像的自相关性,比传统的形态学增强方法更有效地突出图像的细节信息,且能抑制噪声的放大。

关键词: 图像增强; 形态学; 自适应; 结构元素

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)06-1285-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01082

Adaptive Image Enhancement Algorithm with Variable Weighted Matching Based on Morphology

Liu Yan-li^① Gui Zhi-guo^{①②}

^①(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

^②(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to extract accurately the image details, and improve the effect of image enhancement, an adaptive image enhancement algorithm with variable weighted matching based on morphological is proposed. With this method, extension omni-directional multi-scale structure element is constructed, which is used to decompose image of different scale details in different direction through top-hat translation. The proposed algorithm broke the idea of that the detail weighted in each direction is taken average in traditional morphology method, and adjusts the weight of the different detail direction based on the dynamic characteristic analysis of the local gray level. In the image enhancement process, according to the structured feature of extracted details, the corresponding adaptive gain function is constructed to realize the image adaptive enhancement. The experimental results show that, the algorithm can highlight more effective image details than the traditional morphological method of image enhancement by using the autocorrelation of image, and can suppress the noise in some extent.

Key words: Image enhancement; Mathematical morphology; Adaptive; Structure element

1 引言

图像增强技术为图像后续信息分析及提取奠定了基础,是数字图像处理的基本内容之一。几十年来,不同类型的图像增强技术^[1-4]被相继提出并得到广泛发展。图像锐化^[5,6]的目的是为了增强图像的边缘及细节的清晰度,因此也被称为图像边缘细节

增强; 本文将传统锐化原理应用到了形态学领域。形态学^[7-9]在滤除图像细节的同时不会引起边缘等特征的偏移,因此形态学滤波更适于提取目标形状、边缘细节等特性。近年来,很多研究者将多尺度形态学应用于图像增强中^[10-12],并取得了较好的效果。

形态学应用到图像增强处理中的关键是提取图像全方位的细节特征,精确分配各个方向细节所占的比重,并找到一个控制各个方向细节的增益函数。然而,传统的形态学应用于图像增强中常存在以下两个问题:首先,传统的形态学算法常使用各向同性结构元素,使各个方向的细节都取均值融合,忽

2013-07-23 收到, 2013-10-12 改回

国家自然科学基金 (61071192, 61271357, 61171178), 山西省自然科学基金 (2009011020-2), 山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助项目, 山西省国际合作项目(2013081035)和山西省研究生优秀创新项目(20123098)资助课题

*通信作者: 桂志国 gzgtg@163.com

略了不同方向的细节差异^[8,9]；其次，对于提取到的细节特征缺乏灵活性与应用针对性，即缺乏对图像细节增强过程中应根据其不同区域的局部统计特性和结构化特征进行自适应的处理。针对上述问题，本文使用扩展全方位多尺度结构元素，全面利用目标像素点邻域的灰度特性，自适应匹配每个方向细节所占的比重；同时，根据图像细节特征的变化情况，调控细节做进一步增强。该算法在增强图像细节方面得到了较好的效果，使处理后的图像目标背景对比度、细节特征等优于原图像，同时避免了噪声的放大。

2 相关形态学理论

数学形态学运算目前已成为图像处理领域的重要工具。形态学具有局部、并行、实时、快速、易于实现等特性，其以严格的数学理论和几何学为基础。数学形态学可以通过 top-hat 变换提取图像的亮、暗细节特征。由于图像的复杂性及像素间较强的相关性，图像中的目标或特征可能具有不同的尺度，若对整个图像采用一种单一的结构元素做处理，会损失图像的细节。因此，许多研究者采用多尺度结构元素来提取不同尺度下的图像特征。多尺度 top-hat 变换定义如下：

$$\text{亮 top-hat: } WT_n = f - f \circ nB \quad (1)$$

$$\text{暗 top-hat: } BT_n = f \bullet nB - f \quad (2)$$

式中 $n = 1, 2, \dots, N$ 为整数，表示结构元素尺度因子。 nB 表示对结构元素 B 自身进行 $n-1$ 次膨胀。 $nB = B \oplus B \oplus \dots \oplus B$ 。亮 top-hat 变换提取图像中小于结构元素 nB 的亮细节特征；暗 top-hat 变换提取小于结构元素 nB 的暗细节特征。

3 图像可变权值匹配自适应增强算法的构造

文献[10]在形态学的基础上，利用多尺度分析法扩展了传统图像锐化增强算法。其基本思想是，用具有一定形态的结构元素提取和度量图像中对应的局部亮、暗细节特征，增强提取到的亮、暗细节特征的反差后，再将其结合起来，重构原图像，其公式可表示如下：

$$\begin{array}{cccccccc} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 & B_7 & B_8 \\ \text{(a) } 0^\circ \text{ 方向} & \text{(b) } 45^\circ \text{ 方向} & \text{(c) } 90^\circ \text{ 方向} & \text{(d) } 135^\circ \text{ 方向} & \text{(e) } 180^\circ \text{ 方向} & \text{(f) } 225^\circ \text{ 方向} & \text{(g) } 270^\circ \text{ 方向} & \text{(h) } 315^\circ \text{ 方向} \end{array}$$

图1 8个方向的结构元素

$$g = f + 0.5S_o - 0.5S_c \quad (3)$$

其中 $S_o = \sum_{i=1}^n (n-i+1)WT_i$, $S_c = \sum_{i=1}^n (n-i+1)BT_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

该算法对于较低尺度层的细节重复叠加，增加了冗余性，且对提取到的细节调整缺乏自适应性。该算法虽不是最优的，但其增强思想却被广泛采用。常用的形态学增强算法^[8-12]只利用单一方向的像素做处理，并且对图像各方向细节特征取均值融合，使处理后的图像增强效果欠佳。为了提高图像增强的效果，本文在结构元素选取、细节特征权值匹配及算法增强的灵活性上均做了一些改进。

3.1 结构元素的选择

结构元素在形态学运算中的作用类似于图像处理中的滤波窗口，且对边缘细节的检测有重要影响，因此它的选择至关重要。形态学运算的时间与结构元素的尺寸成正比，通过分解结构元素可以减少计算时间。由于结构元素尺寸过大，会导致运算量大幅提升，且提取的边缘细节较粗，所以在实际操作中可根据具体情况相应调整。如果只采用一种结构元素，其输出图像中只包含一种几何信息，图像的其余细节丢失。采用不同方向的结构元素，可在多结构元素下实现图像几何特征的保持；同时根据图像边缘细节的走向，有针对性地选取结构元素。边缘细节复杂的图像考虑用多方位或全方位的结构元素来提高边缘细节方向的敏感性。

为了精确提取图像的细节特征，文中采用一种全方位多尺度结构元素，使结构元素尽可能多地覆盖图像的各个方向，提高算法对各个方向细节的敏感性。本文使用了 8 方向的结构元素 B_i , $i = 1, 2, \dots, 8$ ，对图像进行滤波处理，其中尺度大小为 3×3 的 8 方向结构元素选取如图 1 所示。

由于只对单一方向像素进行处理，很难达到最佳的增强效果。为了尽可能全面地利用目标像素点邻域各像素点的信息，本文使用扩展全方位多尺度结构元素，以获得更好的滤波效果。扩展全方位多尺度结构元素 B_i 的尺度随 k 的增加而单调增大，即为 $(2k+1) \times (2k+1)$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。选取 5×5 窗口的扩展全方位结构元素如图 2。

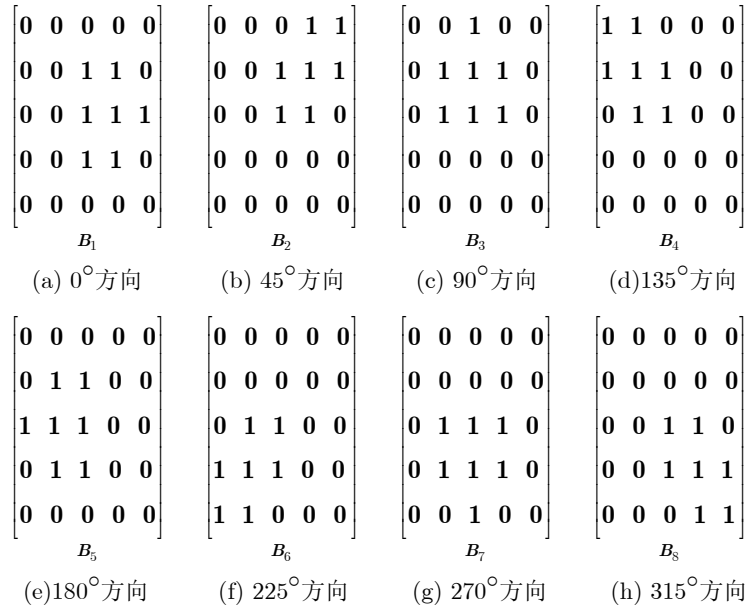


图 2 8 个方向的扩展结构元素

3.2 多尺度形态学细节特征的提取

利用上述选定的结构元素提取图像有应用价值的细节特征。如上所述，形态学开运算能提取图像中的亮细节特征，形态学闭运算能提取图像中的暗细节特征。依据多尺度分析思想，用多尺度结构元素 nB_i 对图像进行一系列的开运算或闭运算，可以得到图像多尺度层的细节特征。为避免提取到的细节特征具有较强的冗余性^[13,14]，本文多尺度亮 top-hat 变换提取图像不同尺度的亮细节特征如下：

$$\left. \begin{aligned} fw_{0i} &= f \\ fw_{ni} &= f \circ nB_i \\ DW_{ni} &= fw_{(n-1)i} - fw_{ni} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中，原图像 f 经过结构元素 nB_i 的开运算分别得到尺度大于 $n-1$ 且小于 n 的 8 个方向的细节特征 DW_{ni} 。

同样，多尺度暗 top-hat 变换提取图像不同尺度的暗细节特征如下：

$$\left. \begin{aligned} fb_{0i} &= f \\ fb_{ni} &= f \bullet nB_i \\ DB_{ni} &= fb_{ni} - fb_{(n-1)i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

原图像经过扩展全方位多尺度结构元素的分解，得到每个方向上的亮、暗细节特征组成如下：

$$\begin{aligned} DW_i &= \{DW_{1i}, DW_{2i}, \dots, DW_{ni}\}, \\ DB_i &= \{DB_{1i}, DB_{2i}, \dots, DB_{ni}\}; \\ i &= 1, 2, \dots, 8 \end{aligned} \quad (6)$$

亮细节特征体在图像中形成前景，暗细节特征在图像中形成背景，其对比度主要体现在图像的亮、

暗细节反差上。因此，在增强图像时亮、暗细节特征应按同等因素考虑。则提取到的同一方向上的亮、暗细节特征对比度可表示为

$$Df_i = w_i \times (DW_i - DB_i), \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (7)$$

Df_i 体现了相邻尺度下图像亮、暗区域的细节组成，增强图像时，应突出这些特征信息，以增强图像的细节。如何有效地增强这些细节特征，同时避免处理后的图像产生伪影及噪声放大是需要讨论的重点。由于图像的细节丰富，其在不同方向的细节体现程度不同，因此，每个方向的细节权值 w_i 应不尽相同。

3.3 各方向细节特征权值的动态调整

本文引入全方位多尺度结构元素的思想，其与结构元素同方向的边缘细节较敏感，而与其不同方向的边缘细节又会被平滑掉，即结构元素的形状可以决定检测到的边缘细节方向。自适应权值 w_i 可以根据相关的图像信息自适应调整选择，使图像的细节匹配更精确。文中不同方向细节特征的权值是由滑动窗口的局部灰度变化特性决定的。设图像滑动窗口 3×3 子块如图 3 所示， r_0 为中心像素的灰度值， r_1, \dots, r_8 为其邻域像素灰度值。设图像中心像素点 (x, y) 与其邻域像素点间灰度的差分为 $d_k = r_0 - r_k$ ， $k = 1, 2, \dots, 8$ 。

$$\begin{bmatrix} r_4 & r_3 & r_2 \\ r_5 & r_0 & r_1 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix}$$

图 3 窗口为 3×3 的子块

像素间的差分大小反映了像素间的灰度变化程度,体现了边缘细节的方向特征。与边缘细节方向一致的结构元素即为最佳匹配结构元素,则该方向细节所占的权值较大。以一个像素点为中心,其对称邻域的某个方向的灰度差异越大,则该点越可能位于垂直于差分方向的图像边缘细节上。通过计算

图像每个像素邻域内 4 个总体方向的差分平方,确定该邻域内可能的边缘细节方向。为了进一步分析图像不同方向的边缘细节,又通过计算中心像素点与邻域像素点间的差分平方,得到 8 个方向的差分平方。窗口为 3×3 的图像子块内不同方向邻域灰度间的差分平方与对应方向细节关系如表 1 所示。

表 1 不同方向邻域差分与对应方向细节权值

对称邻域间差分平方	中心与邻域间差分平方	对应方向细节	对应权值
$V_{f1} = \left(\sum_{k=1}^3 r_k - \sum_{k=5}^7 r_k \right)^2$	$V_{e1} = \left(\sum_{k=1}^3 d_k \right)^2$	Df_2	$w_2 = \frac{s_1}{s_1 + s_2} \cdot w_{f1}$
	$V_{e2} = \left(\sum_{k=5}^7 d_k \right)^2$	Df_6	$w_6 = w_{f1} - w_2$
$V_{f2} = \left(\sum_{k=2}^4 r_k - \sum_{k=6}^8 r_k \right)^2$	$V_{e3} = \left(\sum_{k=2}^4 d_k \right)^2$	Df_3	$w_3 = \frac{s_3}{s_3 + s_4} \cdot w_{f2}$
	$V_{e4} = \left(\sum_{k=6}^8 d_k \right)^2$	Df_7	$w_7 = w_{f2} - w_3$
$V_{f3} = \left(\sum_{k=3}^5 r_k - \sum_{k=7}^8 r_k - r_1 \right)^2$	$V_{e5} = \left(\sum_{k=3}^5 d_k \right)^2$	Df_4	$w_4 = \frac{s_5}{s_5 + s_6} \cdot w_{f3}$
	$V_{e6} = \left(\sum_{k=7}^8 d_k + d_1 \right)^2$	Df_8	$w_8 = w_{f3} - w_5$
$V_{f4} = \left(\sum_{k=4}^6 r_k - \sum_{k=1}^2 r_k - r_8 \right)^2$	$V_{e7} = \left(\sum_{k=4}^6 d_k \right)^2$	Df_1	$w_1 = \frac{s_7}{s_7 + s_8} \cdot w_{f4}$
	$V_{e8} = \left(\sum_{k=1}^2 d_k + d_8 \right)^2$	Df_5	$w_5 = w_{f4} - w_1$

表 1 中, $s_i = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} v_{ei}(x, y)$, $w_{fk} = v_k / \sum_{k=1}^4 v_k$, 其中, $v_k = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} v_{fk}(x, y)$ 。

首先通过对整体图像(尺寸为 $M \times N$)对称邻域间灰度差分平方 v_{fk} 的累加,得到图像在垂直、水平、主对角线、次对角线 4 个方向的总灰度差异特征 v_k , 并由此计算每个方向边缘细节在 4 个总体方向所占的比重 w_{fk} ; 其次,又引入了像素点间的灰度突变方向,即通过计算中心像素点与邻域像素点间的差分平方,进一步得到 8 方向的灰度差分平方 V_{ei} ,使得图像灰度突变方向与提取的边缘细节方向一致时,得到的权值较大,进一步增强算法对边缘细节方向的敏感性。统计整幅图像的图像子块,得到 8 个方向的灰度差异特性 s_i ; 最终,本算法不同方向细节的权值 w_i 可根据对应方向灰度差异特性的不同,进行动态匹配得到。

使用多尺度结构元素提取图像每一方向多尺度层的细节特征后,根据得到的对应方向细节权值 w_i ,将其结果进行权值融合,得到扩展全方位多尺度的图像细节信息如下:

$$Df = \sum_{i=1}^8 w_i (DW_i - DB_i) = \sum_{i=1}^8 (w_i \times Df_i) \quad (8)$$

为了更直观地体现该动态调整权值原理的有效性,本文采用如图 4 的一幅简单的线条型图像作说明。图像中每个方向的细节信息所占的比重不同,像素局部窗口内灰度差异越大,则其对应方向的权值就越大。表 2 列出了图 4 中不同方向细节权值确定的结果。从中可以看出 Df_1 , Df_5 方向(即水平方向)的细节权值最小,几乎为零; Df_3 , Df_7 方向对应的权值较大(图像中的线条都是关于中心点对称,因此其在对称方向的权值对应相等)。图像对应方向权值与各方向细节所占比重一致。

表 2 图 4 各方向细节权值

细节方向	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	Df_7	Df_8
对应权值	0.0501	0.1223	0.2030	0.1246	0.0501	0.1223	0.203	0.1246

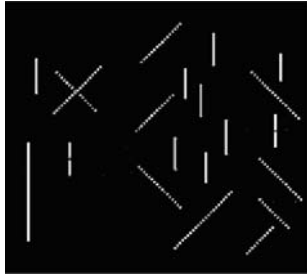


图 4 实验原图

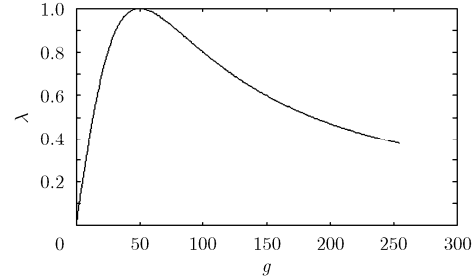


图 5 λ 的曲线图

3.4 自适应增益函数的选择

利用常数对提取到的整体图像细节 Df 采用同一标准进行调整时，很难达到实际应用的需求。针对多结构元素提取的细节特征的不同，本文引入一个增益函数 λ ，即其细节对输出图像的贡献不再是一个固定值，而由该细节的结构化特性决定。则本文算法图像增强后的图像可表示为

$$fen = f + K \times \lambda \times \sum_{i=1}^8 (w_i \times Df_i) \quad (9)$$

文中增益函数 λ 的选取如下：

$$\lambda = \frac{g}{ag^2 + b} \quad (10)$$

其中 $g = g + (Df \oplus nB_i - Df \ominus nB_i)$ (初始化图像 $g = 0$), $b = g_0 / 2$, $a = 1 / (2g_0)$ 。

g_0 是根据图像梯度设定的常数 $g_{\min} \leq g_0 \leq g_{\max}$ 。在 $b = 25$, $a = 0.01$ 时的 λ 的曲线图如图 5 所示，其中横坐标为梯度值 g ，纵坐标为增益函数 λ 的输出值；该图峰值点为 $g_0 = 50$ 。从图像可以看出，这个函数特征可以对图像动态变化较小的细节区域进行有效增强，突出了图像中隐藏的小细节；而对动态变化很陡峭的强边缘区域(较大的 g)，锐化强度减弱，避免了图像产生伪影现象及较大的噪声。合理地选择峰值 g_0 和参数 K ，可以实现较好的平衡效果，既不放大噪声，又能较好地锐化细节。

图 6 中，图 6(a)为原始图像，图 6(b)~图 6(d)为本文算法参数分别选取 $K=20, g_0=50$ ； $K=20, g_0=20$ ； $K=10, g_0=20$ 时的处理结果。从中可以看出，经该算法处理后的图像细节都得到了增强，

通过图 6(b)与图 6(c)的比较可以看出， g_0 能有效抑制背景噪声；比较图 6(c)与图 6(d)可以看出， K 能有效控制细节增强程度。

综上，本文算法的具体实现步骤如下：

(1)构造大小为 $(2k+1) \times (2k+1)$ 的 8 方向扩展全方位多尺度结构元素 $B_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。

(2)在单一方向上使用多尺度结构元素，提取图像相邻尺度的细节特征 $Df_i, i = 1, 2, \dots, 8$ 。

(3)根据不同方向细节特征所占比重 w_i 不同，将各方向提取的细节特征进行加权组合，得到图像全方位多尺度结构元素提取的精确细节特征。

(4)在步骤(3)提取的细节特征基础上，利用根据其梯度构造的增益函数 λ 对细节做进一步调整，使隐藏的细节突出，同时抑制背景噪声放大，使处理后的图像更适于人眼观察。

4 实验结果和分析

为了检测本文算法对图像增强的有效性，图 7 列出了本文算法与经典的 Laplace 算法和传统的形态学增强算法效果的对比。图 7(a)为原图，图 7(b)为 8 邻域 Laplace 算子提取的细节，图 7(c)为文献[10]方法提取的多尺度细节，图 7(d)为文献[11]算法多尺度 top-hat 变化提取的细节，图 7(e)为本文算法提取的细节。图 7(c)与图 7(d)都是使用各向同性的结构元素进行多尺度细节提取，且对细节的处理都缺乏灵活性与针对性。图 7(f)~图 7(i)分别表示对应图 7(b)~图 7(e)的算法对 Lena 图像增强效果对比图。通过直接观察可以看出，Laplace 算法在提取细节的同时明显放大了噪声，增强后的图像受噪声影

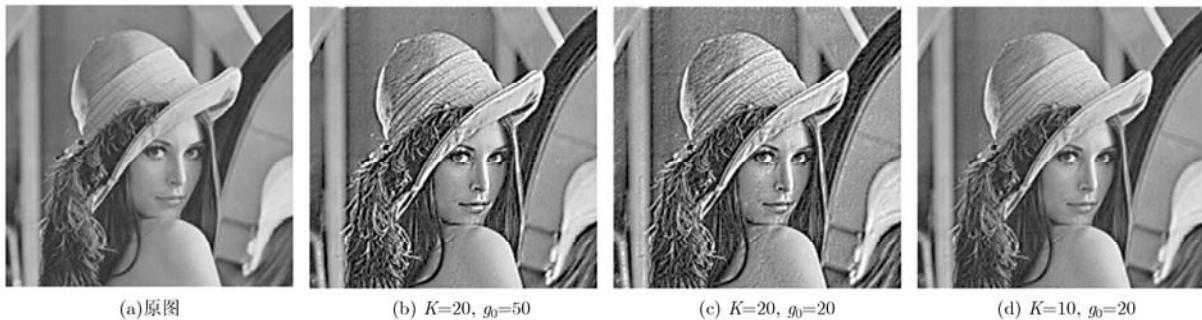


图 6 本文不同参数下增强后的图像

响较大;文献[10]提取的各尺度细节具有较强的冗余性,处理后的图像局部出现过增强,增强效果不均匀,影响视觉效果;文献[11]虽然在细节提取方面降低了冗余性,但部分细节体现不足,没有区分不同方向的细节差异,将提取到的细节直接加到原图像中,缺乏对细节的调整;本文算法较好地提取出了图像的细节,使隐藏的重要特征突显出来,对细节增强起到较好的效果。以上实现表明,本文方法解决了传统算法细节体现不足,和放大噪声的矛盾。

此外,由表3可看出,本文提出的算法较其它

算法在增强图像的同时可以保持较高的信息熵和细节-背景方差比(DV/BV, Detail Variance, DV; Background Variance, BV)。DV, BV的计算方法参见文献[5]。本文提出的算法由于使用扩展全方位多尺度结构元素,可以提取图像尽可能多的细节,且对各方向细节进行精确分配,在一定程度上较好地突出了图像的信息;并且本文算法利用了图像的结构化特性,在细节增强的同时能够在一定程度上抑制噪声的影响。

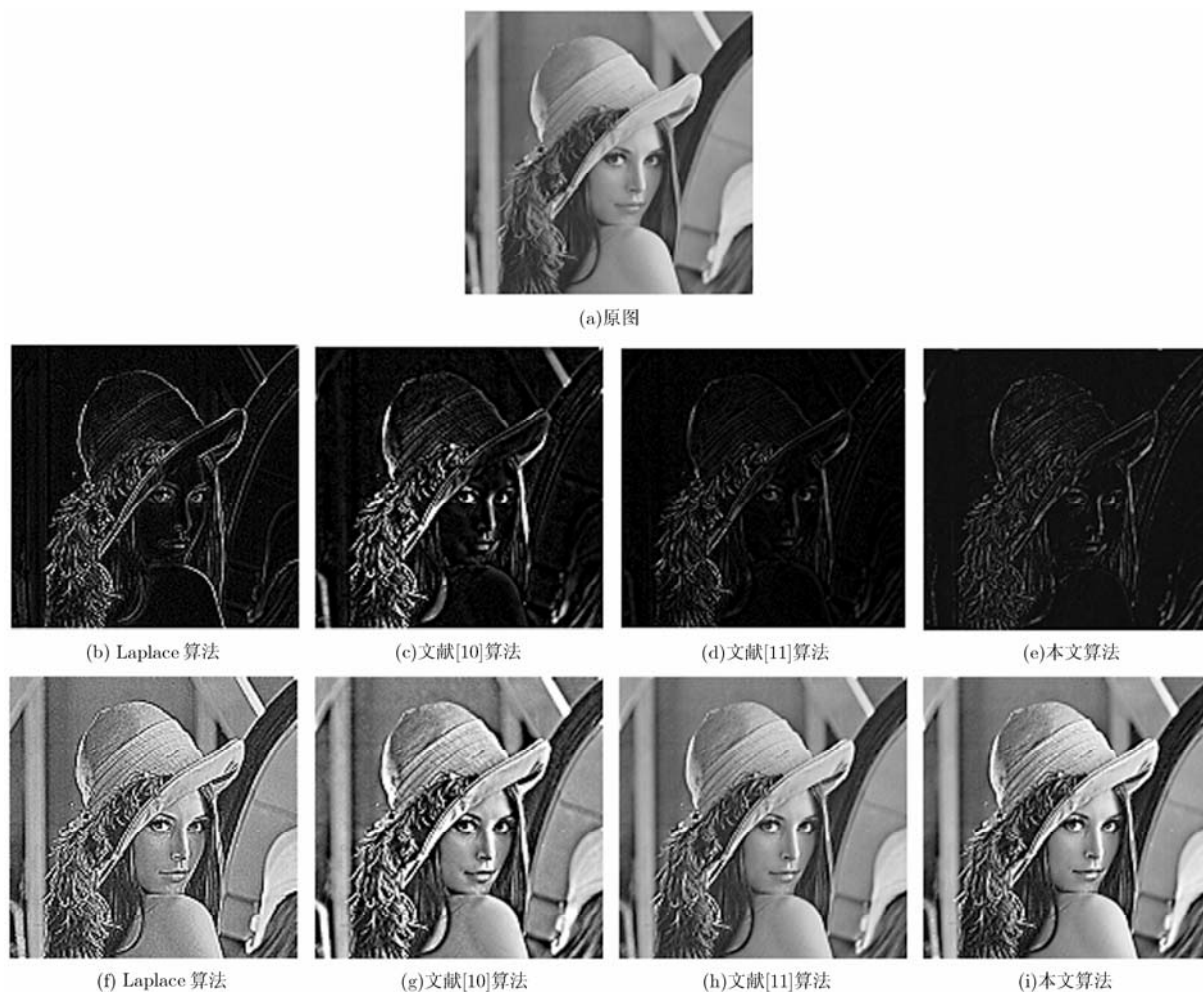


图7 3种算法的图像增强效果对比

表3 图7增强图像的指标对比

	Laplace 算法	文献[10]算法	文献[11]算法	本文算法
信息熵	5.1616	5.1991	5.3047	5.3247
DV	245.9292	194.4641	159.4295	169.3584
BV	85.2621	14.7641	10.9499	5.5648
DV/BV	2.8844	13.1714	14.5599	30.4339

5 结束语

本文利用形态学独特的特征提取优势,针对图

像的几何形状特征实现对图像的有效增强,并取得了较好的仿真效果。本文针对传统形态学增强算法

结构元素设定单一忽略图像不同方向的细节差异的问题,构造了扩展全方位多尺度结构元素,利用图像邻域像素间的差分平方,动态调整不同方向细节的权值,实现了各方向细节的精确匹配。将图像不同方向下不同尺度的亮、暗细节特征提取后,根据特定的应用需求可以有针对性地灵活调整增益函数,增强感兴趣的特征。实验表明,与其它常用的形态学增强算法相比,本文提出的算法在细节增强与噪声抑制方面取得了较好的平衡。

参考文献

- [1] 李成,鞠明,毕笃彦,等. 基于局部自适应拉升窗的复合图像增强算法[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2756-2762.
Li Cheng, Ju Ming, Bi Du-yan, *et al.*. Composite image contrast enhancement algorithm based on local adaptive stretching window[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2756-2762.
- [2] 迟健男,王东署,杨旭,等. 顺序形态变换的图像增强算法[J]. 光电工程, 2002, 32(7): 74-78.
Chi Jian-nan, Wang Dong-shu, Yang Xu, *et al.*. Algorithm of image enhancement based on order morphology transformation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 32(7): 74-78.
- [3] 黄果,陈庆利,许黎,等. 可变阶次分数阶微分实现图像自适应增强[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 4(3): 1-9.
Huang Guo, Chen Qing-li, Xu Li, *et al.*. Realization of adaptive image enhancement with variable fractional order differential[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2012, 4(3): 1-9.
- [4] 杨柱中,周激流,晏祥玉,等. 基于分数阶微分的图像增强[J]. 计算机辅助设计与图像图形学报, 2008, 20(3): 343-348.
Yang Zhu-zhong, Zhou Ji-liu, Yan Xiang-yu, *et al.*. Image enhancement based on fractional differentials[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3): 343-348.
- [5] Gui Zhi-guo and Liu Yi. An image sharpening algorithm based on fuzzy logic[J]. *Optik*, 2011, 122 (8): 697-702.
- [6] Yang Ching-chung. A modification for the mask-filtering approach by superposing anisotropic derivatives in an image[J]. *Optik*, 2011, 122(18): 1684-1687.
- [7] 师文,朱学芳,朱光. 基于形态学的MRI图像自适应边缘检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 408-415.
Shi Wen, Zhu Xue-fang, and Zhu Guang. Adaptive edge detection algorithm of MRI image based on morphology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 408-415.
- [8] 李郁峰,冯晓云,徐铭蔚. 基于多尺度 top-hat 分解的红外与可见光图像增强融合[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2824-2833.
Li Yu-feng, Feng Xiao-yun, and Xu Ming-wei. Infrared and visible image features enhancement and fusion using multi-scale top-hat decomposition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2824-2833.
- [9] Bai Xiang-zhi and Zhou Fu-gen. A unified form of multi-scale top-hat transform based algorithms for image processing[J]. *Optik*, 2013, 124(13): 1614-1619.
- [10] Susanta Mukhopadhyay and Bhabatosh Chanda. A multiscale morphological approach to local contrast enhancement[J]. *Signal Processing*, 2000, 80(4): 685-696.
- [11] Bai Xiang-zhi, Zhou Fu-gen, and Xue Bin-dang. Image enhancement using multi scale image features extracted by top-hat transform[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 44(2): 328-336.
- [12] Susanta Mukhopadhyay and Bhabatosh Chanda. Fusion of 2D grayscale images using multiscale morphology[J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(10): 1939-1949.

刘艳莉：女，1985年生，博士生，研究领域为图像处理、图像增强。

桂志国：男，1972年生，教授，博士生导师，研究领域为信号与信息处理、图像处理和识别、图像重建。