

基于改进同态滤波的低对比度图像增强

刘佳敏 何 宁

(北京联合大学智慧城市学院 北京 100101)

摘 要 针对传统同态滤波算法计算量大、参数设置困难、实验难度大等问题,提出一种改进同态滤波和对比度约束自适应直方图均衡相结合的低对比度图像增强算法。对原始图像进行均衡,保留图像的细节,增强图像的对比度;通过对同态滤波算法进行改进,进一步提高预处理图像的对比度。改进同态滤波算法利用滤波器特性对滤波函数进行简化,不但保证了原始算法的效果,而且在很大程度上减少了计算。结果表明,该算法是可控的,效果明显,细节更加完整。

关键词 改进同态滤波 对比度受限自适应直方图均衡算法 低对比度图像

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.03.037

LOW CONTRAST IMAGE ENHANCEMENT BASED ON IMPROVED HOMOMORPHIC FILTERING

Liu Jiamin He Ning

(School of Smart City, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract The traditional homomorphic filtering algorithm has a large amount of calculation, and has difficulty in setting parameter, so that the experiment is very difficult. Aiming at these problems, this paper proposes a low contrast image enhancement algorithm based on improved homomorphic filtering and contrast limited adaptive histogram equalization. The original image was equalized to preserve the details of the image, and the contrast of the image was enhanced. By improving the homomorphic filtering algorithm, the contrast of the preprocessed image was further improved. The improved homomorphic filtering algorithm simplified the filtering function by using the filter characteristics, which not only ensured the effect of the original algorithm, but also reduced the calculation to a large extent. The results show that the algorithm is controllable, the effect is noticeable, and the details are more complete.

Keywords Improved homomorphic filtering Contrast limited adaptive histogram equalization algorithm Low contrast image

0 引 言

图像在采集、获取过程中,主观与客观等诸多因素常导致图像对比度低、清晰度低并伴随噪声。为了提高图像质量,使其更适合人眼特性,有必要对图像进行增强。在生活中,我们会得到动态范围大的图像(即黑色部分非常黑,白色部分非常白),目标部分的灰度非常暗(即灰度范围非常小),因此我们无法区分对象

的灰度和细节。扩展灰度级可提高图像的对比度,但会使动态范围变大。灰度级压缩可以减小动态范围,但会使物体的灰度和细节难以区分。

目前,低对比度图像的增强方法有很多,如直方图均衡^[1-2]、同态滤波^[3]、对比度约束自适应直方图均衡(CLAHE)^[4-6]。直方图均衡算法对图像全局像素进行直方图变换,对像素值分布均匀的图像效果明显,但如果图像包含比图像其他区域更暗或更亮的部分,这些部分的对比度将不会得到有效增强,也可能导致图

像中对比度抑制和中小型物体的消失,减少图像信息。

自适应直方图均衡(AHE)能有效提高图像对比度。AHE算法^[7-8]通过对局部进行直方图均衡来改善CLAHE方法的缺陷,所以能更好提高图像的局部对比度,保留更多图像细节。然而,该算法存在图像同一区域噪声过大的问题,对比度约束的自适应直方图均衡(CLAHE)算法可以有效地限制噪声放大^[9]。

CLAHE和AHE之间的区别在于对比度限制。这个特性也可以应用到全局直方图均衡化中,但该算法需要对图像中的每个像素计算其邻域直方图以及对应的变换函数,这使得算法极其耗时。

在图像增强领域,针对低对比度图像Retinex算法^[10-11]和深度学习算法^[12-14]应用也越来越广泛。Retinex方法最初被NASA用于处理航天图像,增强效果明显,后逐渐被改进并用于其他增强应用中。但Retinex方法参数只能通过经验设置,且计算复杂度高,耗费成本极大。深度学习算法在人工智能领域应用广泛,但是深度学习对数据集要求较高,目前国内没有适合的数据集进行训练测试,许多学者利用合成的或处理之后的图像作为小样本训练集进行学习,局限性大,泛化能力不强。

对于光照不均匀的图像,同态滤波^[15]既可以实现亮度调节,又可以提高对比度,从而提高图像质量。但同态滤波的参数过多且只能通过实验测试获得,并且图像经过同态滤波处理后图像出现细节模糊、轮廓不清晰现象。

为了解决上述问题,本文提出了一种将CLAHE与改进的同态滤波相结合的算法。我们在不改变同态滤波函数衰减低频,增强高频特性条件下,改变滤波器函数来减少计算复杂度,最后结合CLAHE算法,不仅简化了计算,满足了实时性要求,同时增强了图像细节。实验结果证明该方法更有效更简单,明显改善图像对比度,并消除噪声影响。

1 同态滤波

根据照射-反射模型,一幅图像 $f(x,y)$ 可以表示为其照射分量 $i(x,y)$ 和反射分量 $r(x,y)$ 的乘积。即:

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y) \quad (1)$$

式(1)不能直接用于处理光照的频率分量,因为在傅里叶变换中,乘积的变换不等于变换的乘积。

等式两边分别进行对数变换得:

$$z(x,y) = \ln f(x,y) = \ln i(x,y) + \ln r(x,y) \quad (2)$$

则有:

$$\mathfrak{F}\{z(x,y)\} = \mathfrak{F}\{\ln f(x,y)\} = \mathfrak{F}\{\ln i(x,y)\} + \mathfrak{F}\{\ln r(x,y)\} \quad (3)$$

或

$$Z(u,v) = F_i(u,v) + F_r(u,v) \quad (4)$$

式中: $F_i(u,v)$ 和 $F_r(u,v)$ 分别是 $\ln i(x,y)$ 和 $\ln r(x,y)$ 的傅里叶变换。

我们用滤波器对 $Z(u,v)$ 滤波,则有:

$$S(u,v) = H(u,v)Z(u,v) = H(u,v)F_i(u,v) + H(u,v)F_r(u,v) \quad (5)$$

由于 $z(x,y)$ 是通过输入图像的自然对数形成的,故可通过取滤波后结果的指数这一反处理来输出图像:

$$g(x,y) = e^{s(x,y)} = e^{i'(x,y)} e^{r'(x,y)} = i_0(x,y)r_0(x,y) \quad (6)$$

式中:

$$i_0(x,y) = e^{i'(x,y)} \quad (7)$$

$$r_0(x,y) = e^{r'(x,y)} \quad (8)$$

推导分别得到输出图像的照射和反射分量。

同态滤波器需要一个函数 $H(u,v)$ 来更好地控制光照分量,其中 $D(u,v)$ 是距中心的距离。如果 H_H 和 H_L 选定, $H_H > 1$ 且 $H_L < 1$,那么图1所示滤波器函数趋向于对低频(照射)部分进行衰减,并对高频(反射)部分进行增强,其结果是同时进行动态范围的压缩和对比度的增强。

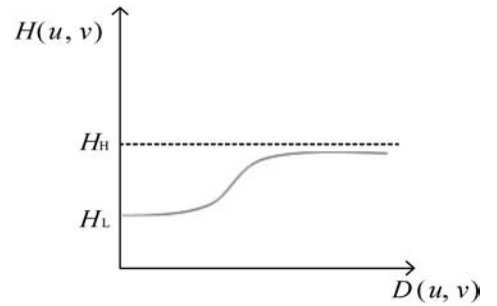


图1 滤波器剖面图

图1所示的函数形态近似高通滤波函数,如高斯高通滤波、巴特沃斯高通滤波、指数滤波^[16],其中常数控制函数坡度的锐利度,它在 H_L 和 H_H 之间过渡, D_0 是图像的截止频率。

(1) 高斯同态滤波:

$$H(i,j) = (H_H - H_L) [1 - e^{-c \left[\frac{D^2(i,j)}{D_0^2} \right]}] + H_L \quad (9)$$

(2) 巴特沃斯同态滤波:

$$H(i,j) = (H_H - H_L) \left[\left(\frac{1}{1 + \frac{D_0^2}{cD(i,j)}} \right) \right]^2 + H_L \quad (10)$$

(3) 指数同态滤波:

$$H(i,j) = (H_H - H_L) e^{-\frac{D_0}{cD(i,j)}} + H_L \quad (11)$$

2 方法设计

2.1 CLAHE 算法

CLAHE 算法在计算累积分布函数(CDF)以限制放大幅度之前,使用预先定义的阈值来调整柱状图。这不仅限制了 CDF 的斜率,而且也限制了转换函数的斜率。柱状图的剪切极限取决于柱状图的分布和域的大小。一般情况下,直接省略超过直方图裁剪极限的部分是不精确的。裁剪部分应均匀分布到柱状图的其他部分,如图 2 所示。这样处理,能防止图像锐化,使图像对比度会更自然。文献[17]中对 CLAHE 算法基本流程做了详细描述。

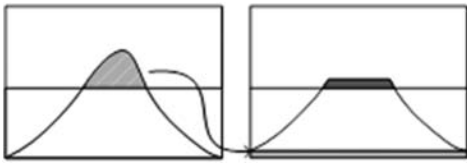


图2 CLAHE 算法

2.2 改进同态滤波

本文利用高斯函数对同态滤波进行改进,并利用改进的同态滤波^[18]对图像进行增强。改进后的同态滤波参数相较传统同态滤波函数明显减少,算法更简洁、更可控。

同态滤波的高斯低通滤波函数为:

$$H(i, j) = e^{-\frac{D^2(i, j)}{2D_0^2}} \quad (12)$$

改进后的同态滤波函数为:

$$H_g(i, j) = a + bH(i, j) \quad (13)$$

对图像进行傅里叶变换得到:

$$\begin{aligned} G_g(i, j) &= H_g(i, j)Z(i, j) = H_g(i, j)I(i, j) + \\ &H_g(i, j)R(i, j) = [a + bH(i, j)][I(i, j) + \\ &R(i, j)] = aI(i, j) + aR(i, j) + bH(i, j)I(i, j) + \\ &bH(i, j)R(i, j) \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可知: a 是调整低频分量的系数,即调整入射分量(调整亮度); b 是调整高频分量的系数,即调整反射分量(细节特征)。从实验中得知,不同图像的 a 、 b 参数设置不同。 D_0 的选择比较困难,它和照射与反射对应的频谱幅度对比度有关,一般需多次实验才能确定。原始图像中室外屋顶建筑的边缘轮廓很模糊,室内暗处细节不明显,利用该函数进行滤波后,不但能保留低频分量 $aI(i, j)$,还能对高频项 $bH(i, j)I(i, j)$ 进行增强,从而使图像边缘的轮廓更加清晰,有助于表现出图像中暗处的细节。最后,用傅里叶变换对同态

滤波后的图像进行反变换,结果如下:

$$g(i, j) = F^{-1}(G_g(i, j)) = i'(i, j) + r'(i, j) \quad (15)$$

对 $g(i, j)$ 进行指数运算得:

$$s(i, j) = e^{g(i, j)} = i_0(i, j) + r_0(i, j) \quad (16)$$

为了改善改进同态滤波在图像处理中的刚性和细节少等缺点,本文将 CLAHE 算法与改进同态滤波相结合对图像进行处理。结果显示该方法可以明显提高图像的亮度,保留图像的细节,增强图像对比度。具体的处理流程如图 3 所示。



图3 本文方法处理流程

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

为了对算法的效果有一个感性的理解,本文将大量图像与不同的算法进行了比较,结果如图 4 所示(其中左图为庙宇,右图为隧道)。实验表明,针对低对比度图像,将 CLAHE 与改进同态滤波结合的方法处理效果更理想,视觉体验好,对细节的保留更完整。从图 4 可以看出,处理后的图像的视觉效果得到了有效的改善。



(a) 原图



(b) 高斯同态滤波



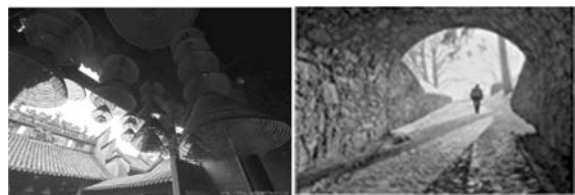
(c) 巴特沃斯同态滤波



(d) 指数同态滤波



(e) CLAHE



(f) 改进同态滤波



(g) 本文算法

图4 不同算法实验效果图对比

3.2 主观分析

从图4可以看出,原始图像的背光区域细节不明显,亮度一般较低。高斯、巴特沃斯和指数同态滤波在一定程度上提高了亮度,黑暗部分对比度有所改善,但同时也造成建筑轮廓不清晰、整体泛白的现象,视觉效果一般。CLAHE明显改善了这一缺陷,屋顶的细节保存完整,但背光区域亮度仍然没有达到理想效果。本文方法同时解决了以上问题,室外房顶轮廓清晰,细节保留完整,建筑形态与隧道建筑结构清晰,在提高图像亮度、保留图像细节的同时,使图像更自然。在视觉感知方面,与其他方法相比,本文方法具有更好的效果。

3.3 客观分析

本文将采用均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)作为图像质量检验指标。MSE的值越小,说明处理效果越精准;PSNR越大说明图像保真程度越高。除此之外,我们加入了对比度评价指标^[19],对比度即亮暗的对比程度,对比度越大,图像层次越强,清晰度越高。

从表1可看出,改进算法参数个数相较其他滤波算法明显减少,不但减少了计算,同时也保留了图像细节并对噪声进行有效抑制。从表2的图4庙宇可看出,原图像对比度只有0.00464,经过同态滤波处理后的原图像对比度均有所提高,其中改进同态滤波效果最明显。对于图4隧道,CLAHE算法效果最明显。在图像处理过程中,噪声也会对图像产生一定的影响。从峰值信噪比数值可看出,本文方法相较改进方法,在增强图像对比度的同时也抑制了噪声。故可从不同应

用中考虑最有效的方法。

表1 滤波函数参数

同态滤波函数		参数个数	参数值
图4 庙宇	高斯	4	$H_H = 2; H_L = 0.5; c = 2; D_0 = 10$
	巴特沃斯	4	$H_H = 1.5; H_L = 0.25; c = 1; D_0 = 10$
	指数	4	$H_H = 1.2; H_L = 0.3; c = 1; D_0 = 10$
	改进方法	3	$a = 0.5; b = 1; D_0 = 10$
图4 隧道	高斯	4	$H_H = 2; H_L = 0.3; c = 2; D_0 = 10$
	巴特沃斯	4	$H_H = 0.3; H_L = 0.1; c = 2; D_0 = 10$
	指数	4	$H_H = 0.3; H_L = 0.1; c = 2; D_0 = 10$
	改进方法	3	$a = 0.3; b = 0.5; D_0 = 10$

表2 指标评估

图像		对比度	均方差	峰值信噪比
图4 庙宇	原图像	0.0046 4	-	-
	高斯	0.006 47	0.306 7	53.264 3
	CLAHE	0.005 35	0.810 0	49.046 2
	改进滤波	0.009 96	0.192 1	55.295 0
	本文方法	0.011 90	0.463 7	51.434 6
图4 隧道	原图像	0.006 6	-	-
	高斯	0.004 9	14.514 1	17.050 3
	CLAHE	0.001 0	14.103 4	16.771 5
	改进滤波	0.005 0	14.466 7	16.984 8
	本文方法	0.010 5	14.343 9	16.857 9

综上所述,本文方法增强效果更明显,更符合人眼特征,视觉效果更好。

4 结 语

本文研究了基于同态滤波的频率域图像增强技术。首先介绍了常用经典算法的原理与应用,详细分析了它们的实现过程和优缺点,并在此基础上做了改进,同时也介绍了改进算法的原理与实现。结果表明,图像整体的亮度与对比度有明显改善,很好地保留了细节,有效地对其他方法效果做了补偿。但是同时也面临很多问题,比如在对图像进行处理过程中同时增加了噪声,图4庙宇的周围出现晕圈等。今后,我们可以考虑基于小波变换的图像增强算法^[14],并对该方法进行相应的改进。对比度增强算法只是图像增强中的一部分,而且方法多种多样,本文主要采取灰度图像,未来可考虑彩色图像或黑暗图像,以及在不同应用中根据需求对同态滤波器做优化^[20]。

参 考 文 献

- [1] 徐辉, 贺耀宜. 一种煤矿井下监控视频图像预处理方法[J]. 工矿自动化, 2016(1): 32-34.
- [2] 蔡超峰. 局部直方图均衡化算法研究及其应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [3] 程新. 基于同态滤波的图像增强算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2016.
- [4] 魏德志, 梁光明. 基于改进的 CLAHE 显微细胞图像增强算法[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(10): 111-114.
- [5] 张璞, 王英, 王苏苏. 基于 CLAHE 变换的低对比度图像增强改进算法[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2011, 26(4): 57-60.
- [6] 余成波, 孔庆达, 田桐. 基于 CLAHE 与同态滤波的细胞图像增强新方法[J]. 微型机与应用, 2017, 36(4): 51-52.
- [7] Isa I S, Sulaiman S N, Mustapha M, et al. Automatic contrast enhancement of brain MR images using Average Intensity Replacement based on Adaptive Histogram Equalization (AIR-AHE) [J]. Biocybernetics & Biomedical Engineering, 2017, 37(1): 24-34.
- [8] Wang Z, Tao J. A fast implementation of adaptive histogram equalization [C]//International Conference on Signal Processing. 2006.
- [9] 智宁, 毛善君, 李梅. 基于照度调整的矿井非均匀照度视频图像增强算法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2190-2197.
- [10] Liao S, Piao Y, Li B. Low illumination color image enhancement based on improved Retinex [C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2017.
- [11] Hu H, Ni G. Color image enhancement based on the improved retinex [C]//International Conference on Multimedia Technology. IEEE, 2010.
- [12] Cai J, Gu S, Zhang L. Learning a deep single image contrast enhancer from multi-exposure images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(4): 2049-2062.
- [13] 毛伟民, 赵勋杰. 基于神经网络的低照度彩色图像增强算法[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 67-70.
- [14] Tao L, Zhu C, Xiang G, et al. LLCNN: A convolutional neural network for low-light image enhancement [C]//2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP). IEEE, 2017.
- [15] Abbas A P A H, Harbi J. Image enhancement by using homomorphic filtering model [C]//The 1st International Conference on Information Technology (ICoIT'17). 2017: 335.
- [16] 陈春宁, 王延杰. 在频域中利用同态滤波增强图像对比度[J]. 微计算机信息. 2007(6): 264-266.
- [17] 王秋云, 罗鸿斌. 基于改进同态滤波的光照不均车牌图像增强方法[J]. 中国建材科技. 2016(6): 160-162.
- [18] 史经俭, 王盼攀. 改进后的同态滤波图像处理技术中的应用[J]. 科技信息, 2010(7): 41-41.
- [19] 宋庆峰, 吕绪良, 隋明序, 等. 一种基于小波变换的图像增强算法[J]. 光电技术应用, 2014(6): 39-42.
- [20] Plichoski G F, Chidambaram C, Parpinelli R S. Optimizing a homomorphic filter for illumination compensation in face recognition using population-based algorithms [C]//2017 Workshop of Computer Vision (WVC). IEEE, 2017: 78-83.
- ~~~~~
- (上接第 177 页)
- [20] Huang H, Tang J, Liu L, et al. Triadic closure pattern analysis and prediction in social networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2015, 27(12): 3374-3389.
- [21] Tang J, Lou T, Kleinberg J M. Inferring social ties across heterogenous networks [C]//Proceedings of the fifth ACM international conference on Web search and data mining. ACM, 2012: 743-752.
- [22] Wang C, Han J W, Jia Y T, et al. Mining advisor-advisee relationships from research publication networks [C]//Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2010: 203-212.
- [23] Backstrom L, Leskovec J. Supervised random walks: Predicting and recommending links in social networks [C]//Proceedings of the fourth ACM international conference on Web search and data mining, 2011: 635-644.
- [24] Eagle N, Pentland A S, Lazer D. Inferring social network structure using mobile phone data [J]. PNAS, 2009, 106(36): 15274-15278.
- [25] Sun Y, Tang J, Member, et al. Co-Evolution of Multi-Typed Objects in Dynamic Star Networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2014, 26(12): 2942-2955.
- [26] Jiang B, Sha Y, Wang L. A multi-view retweeting behaviors prediction in social networks [M]//Web Technologies and Applications. Springer International Publishing, 2015.
- [27] Zhang J, Liu B, Tang J, et al. Social influence locality for modeling retweeting behaviors [C]//Proceedings of the Twenty-Third international joint conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, 2013: 2761-2767.
- [28] Burt R S. Structural holes: The social structure of competition [M]. Harvard University Press, 1992.
- [29] Goyal S, Vega-Redondo F. Structural holes in social networks [J]. Journal of Economic Theory, 2007, 137(1): 460-492.
- [30] Lou T C, Tang J. Mining structural hole spanners through information diffusion in social networks [C]//Proceedings of the 22nd international conference on World Wide Web, 2013: 825-836.
- [31] 何贤芒, 陈银冬, 李东, 等. 基于项目合作的社会关系网络构建[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(4): 776-784.
- [32] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness [M]. W. H. Freeman, 1979.