

基于多种方法的图像去噪、边缘提取和增强

连鹏晨 魏旭鹏
PB15050991 PB15051032
自动化系

摘要

小波变换部分主要是用小波变换及相关方法对图像进行去噪，边缘提取，边缘增强。用实验观察与理论分析相结合的方法确定较好的小波去噪方式，小波基和阈值；对比小波变换和Canny两种不同的方法进行边缘提取的效果；选用效果较好的去噪和边缘提取方式，对含噪图像进行边缘增强。在低照度图像增强部分，我们将全局直方图均衡化方法和局部直方图均衡化方法进行比较，包括子块完全重叠的，以及带阈值的算法。对含噪声的图像，我们应用了空域和频域两类滤波器。在最后，我们尝试使用同态滤波方法进行彩色图像增强。

Abstract

In wavelet transform part, we mainly use wavelet transform and related methods to denoise the image, extract the edge, and enhance the edge. It combines experimental observation and theoretical analysis to determine the better denoising method of wavelet, wavelet basis and threshold; It contrasts two different methods, the wavelet transform and Canny, on edge extraction effect; It also selects better denoising and edge extraction ways to enhance the edge of the noisy image. In low-light image enhancement part, we compare the global histogram equalization method with local histogram equalization methods, with sub-block totally overlaid, and with threshold. For images mixed with noise, we apply spatial and spectrum filters. Homomorphic filtering is used in enhancement of color images in last part.

1. 小波变换进行图像处理

注：为了节省空间，采用subplot画图，导致图像较小，如果看不清楚，请对照原图。

1.1. 小波去噪

1.1.1 去噪方法的选取

小波去噪的方法有很多，为了理解与实现方便，选取小波系数软阈值去噪法，并在本小节与硬阈值去噪法进行对比。

以haar小波为例，软硬阈值均采用2层分解，阈值向量 $P=[10,25]$ ，得到的去噪结果如图1。

可以看出，软阈值的去噪效果明显优于硬阈值。原因是硬阈值去噪会“一刀切”（模小于 3σ 的小波系数全部切除，大于 3σ 全部保留，势必会在小波域产生突变，即伪吉布斯现象）。软阈值函数将模小于 3σ 的小波系数全部置零，而将模大于 3σ 的做一个比较特殊的处理，大于 3σ 的小波系数统一减去，小于 3σ 的小波系数统一加。这样小波系数在小波域就比较光滑了，因此用软阈值去噪得到的图像看起来很平滑。



图1：Haar小波软硬阈值去噪结果

1.1.2 小波函数的选取

在采用软阈值的基础上，采用2层分解，阈值向量同样固定为 $P=[10,25]$ ，选择5种不同的小波函数，（对于可选阶次的函数，均取为4次，阶次相同是为了控制变量，阶次较低时通常效果不太好，而阶次太高又会增大计算量，影响运算速度，因此阶次均取为4）对含噪图像进行分解、去噪、重构，结果如图2：

直接观察，难以确定哪种方法的去噪效果相对较好。于是将去噪后的图像分别与label图像作差，然后统计非0像素（代表没有滤掉的噪声）的个数，以及像素值大于20的像素（代表没有滤掉的较大噪声）个数。结果分别为（按照图2所示的顺序）：

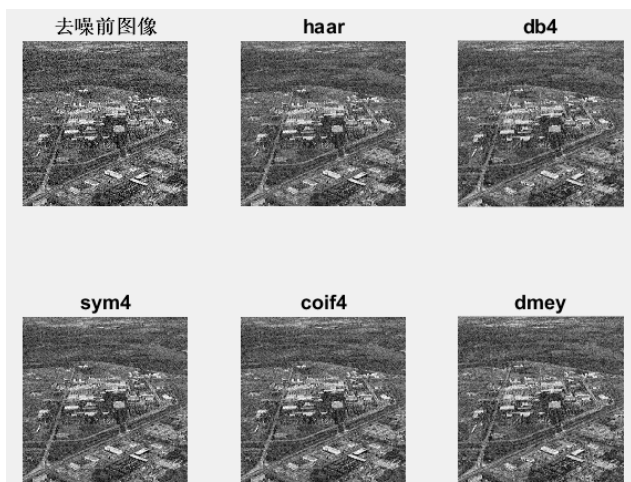


图 2：不同小波函数的去噪效果

112887 112573 112608 112621 112774
31899 31116 30848 30872 31127

可以看到，db4 的结果非 0 像素个数最少，sym4 次之，然而sym4的结果大像素值个数最少，说明sym4去噪后整体上更接近label图像。因此可以确认，sym4在这几个小波基中去噪效果最好。

下面根据选取小波基的选择标准进行分析。小波基的选择标准大致有：

- 正交性：可以使分析简便，有利于信号的精确重构；
- 对称性：对称的基函数使得小波滤波呈线性相位，信号不会失真，也可以提高算法的运行速度；
- 紧支性：紧支集的长度决定着信号局部特性的好坏，紧支集越短的小波基函数，局部时频特征就越好，越有利于信号的瞬时检测；
- 正则性：决定信号重构后的平滑性，会影响频域的分辨率，支集长度越长，正则性越好；
- 消失矩：基函数的消失矩越高，在高频的衰减也就越快，变换后信号的能量越集中，可以保持良好的频域定域性。

Coif4 小波支撑长度太长，dmey小波没有紧支撑性，haar小波消失矩太小，会较大程度影响去噪效果，故予以排除。Sym4 和db4 小波都具有较好的正则性。尽管都是近似对称，但是sym4 小波是在db4 上改进而来，具有更好的对称性，即一定程度上能够减少对信号进行分析和重构时的相位失真。因此，最终确定选取sym4作为小波基。

1.1.3 阈值的选取

阈值的选取，除了通过公式计算外，实践中经常是选取不同阈值进行比较，确定实际效果较好的阈值。

在图 3，以最初选取的阈值向量[10,25]为基准进行变化，确保两层的阈值各有不同方向的变化。

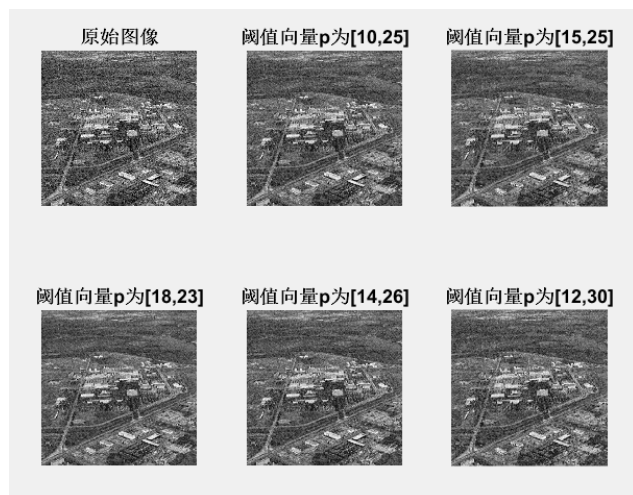


图 3：不同阈值向量下的去噪效果

与小波基的确定类似，难以从图中直接看出哪个效果更好。还是采取去噪后图像与label图像作差的方法，标准前已叙述，结果如下：

112608 112158 112018 112213 112356
30848 25219 22361 26337 28668

发现对于两个结果，都是阈值向量取[18, 23]效果相对较好。并且可以从选取过程中获知，阈值过大或过小都会影响去噪效果，当两层的阈值比较接近而且适中时，结果较好。因此选取[18, 23]作为小波去噪的阈值。

1.2. 边缘检测

1.2.1 小波边缘检测

选用之前确定的小波函数对图像进行分解，滤掉低频的部分，反变换后对剩下的像素进行二值化处理，即大于某个阈值（因为像素值都比较小，因此阈值取得也较小），置为 255，否则置为 0。选取不同的阈值得到的结果如图 4。

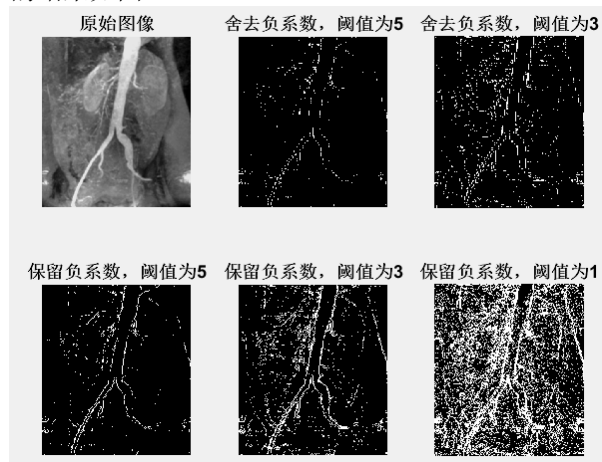


图 4：不同阈值下的边缘检测效果

重构时有两种不同的方式。一种是对负系数不做处理，这样在转换成uint8格式时负系数会被舍弃；另一种是对负系数取相反数，转换格式时会保留。从结果上看，舍弃负系数后，最终导致边缘的连续性较差；而保留负系数，会导致边缘太粗。权衡考虑，保留负系数，通过较大的阈值来适当锐化边缘，减小噪声，因此阈值选用5。

1.2.2 Canny边缘检测

Canny边缘检测直接用现成函数，重要的是对阈值的选择。初步选择一系列阈值进行实验，结果如图5。

可以看出，阈值太小时根本不能较好的提取边缘；而阈值过大时，又会丢失一部分细节。发现最佳阈值在0.1~0.3之间。再以0.2为基准选取一系列阈值，结果如图6。

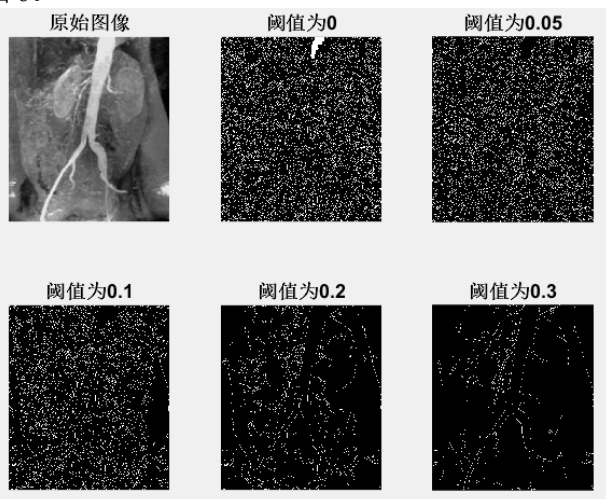


图5：初步选取阈值的Canny边缘检测效果

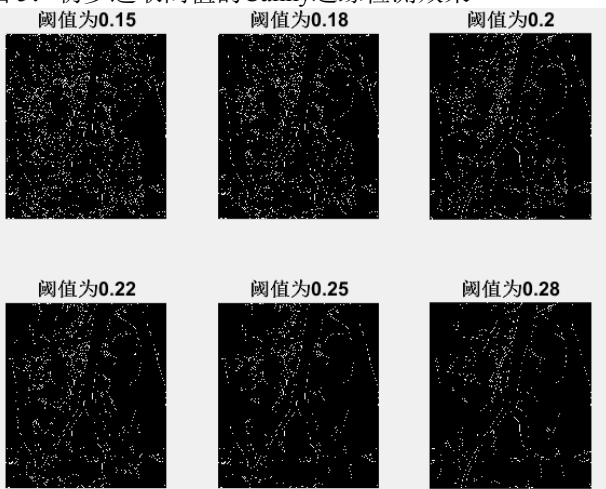


图6：以0.2为阈值基准的Canny边缘检测效果

从图中可以确定，阈值取0.25效果相对最好。

1.2.3 两种方法边缘提取的比较

对两种方法得到的结果分别互相作差，由于uint8格式会舍弃负数，这样得到的结果就是一种方法比另一种方法多提取的部分。结果如图7。

小波结果减去Canny结果后并没有很大变化，说明小波提取的边缘确实较粗，丢掉一部分边缘后影响不大；而Canny结果减去小波结果后，图中类似枝干的部分基本被剪掉了，说明Canny边缘的锐度较高。另外可以发现，图中被红圈标记的肾脏的边缘，小波基本没有检测到，说明Canny检测效果更好。对于之后的图像边缘增强，要求提取的边缘锐度较高，否则容易对整个小块区域进行增强，而不是仅仅增强了边缘。因此从边缘检测的能力和得到边缘的锐度上综合考虑，选用Canny边缘检测的方法。

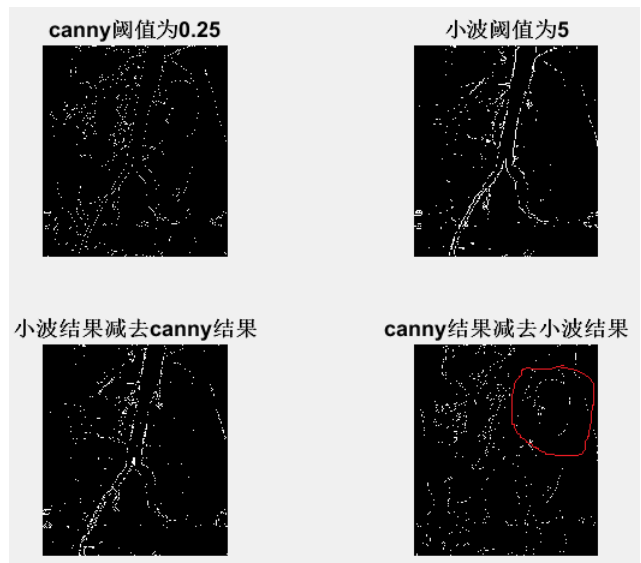


图7：两种处理方法作差的结果

2. 低照度图像增强

2.1. 直方图均衡化方法

2.1.1 概述

直方图均衡化是一种常用的亮度变换方式。在低照度图像中，直方图的分量集中在灰度值的低端。尽管暗图像的各像素点的灰度大小关系已经反映了物体表面的光学信息，人眼却很难区分具有较小差异的灰度值，也就无法用肉眼方便地获取图像的结构信息。因此，希望能使各像素点的灰度值均匀地分布在允许的灰度范围上，提高图像的对比度，提升视觉效果。直方图均衡

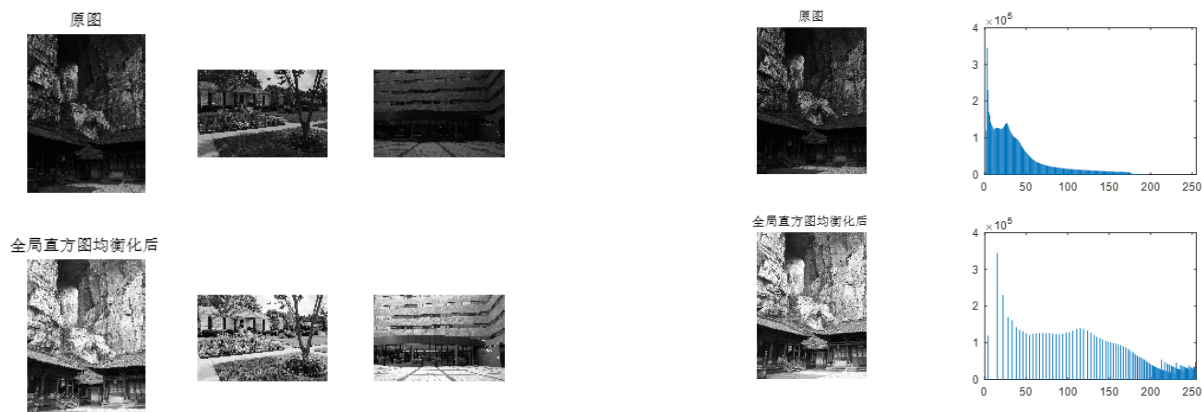


图 8：全局直方图均衡化结果

化就是这样一种映射方式，它试图将原图像的灰度分布变换为整个灰度范围上的均匀分布。

2.1.2 全局直方图均衡化方法

全局直方图均衡化方法通过全局的灰度统计信息生成映射关系，这一映射关系旨在使变换后的灰度分布近似满足均匀分布。

下面针对给定的三张低照度图像，进行全局直方图均衡化，得到的结果如图 8。

可以看到，低照度图像经全局直方图均衡化后，灰度的分布在整個灰度范围内更为均匀和分散，对比度得到了提高。原先图像中一些难以辨清的细节在全局直方图均衡化之后直观上的视觉效果都好了许多，因为原图的像素点在这些位置上的灰度值集中在数值较小处，经过直方图均衡化算法映射后，原先较为集中的灰度级会分散到灰度值比原来高一些的位置，原先相邻灰度级的像素经变换后，灰度差距被拉开，视觉上的对比度因此增强了。

但是，全局直方图均衡化的效果并非完全理想。例如在图像 1 中，明显感受到山崖经直方图均衡后显得过于明亮，原先山崖上相对较亮处的纹理经均衡化后看不清了。还有图中的石板路的纹理变得模糊。根据变换前后的灰度直方图分布，原图中绝大多数像素点的像素值集中在了 0~180，而 180 之后的灰度级的像素点数量极少。因此，经直方图均衡化后，灰度较大的点的灰度被推移到灰度极大的位置，例如 200 以上。偏亮部分的灰度分布得较为均匀，在均衡化后亮处相对亮度差别还是和原图比较接近。而纹理是偏暗的部分，它们的灰度经直方图均衡化后被拉高。从而，亮区域中的暗纹理的灰度经全局直方图均衡化后，与它周围像素点的相对的灰度差别被缩小，看不清。房檐下的梁出现了锯齿状的 artifact，原因可能是边缘像素点本来自然的灰度过渡，

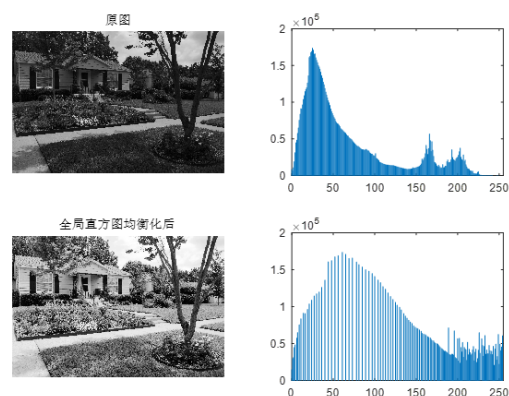


图 9：图像 1、2 全局直方图均衡化前后的变化

经直方图均衡化后，相对的灰度差异被改变。对于非边缘区域，由于每个像素点的邻域像素灰度较为接近，所以周围的几个相近灰度级距离变化并不明显，但边缘处灰度成分丰富，难免出现这样变换后灰度层次不自然的问题。再如图像 2，全局直方图均衡化后两个很明显的缺陷在于地面上树的影子，以及天上的云彩，在处理后反而难以辨清。根据图像 1 对亮处减弱的纹理的分析，出现问题的原因应该也是全局直方图均衡化后，局部的灰度距离被拉近。(注：以上处理过程中，求图像直方图使用myhist，进行全局直方图均衡化使用myHisteq。具体调用过程请参见Project2 文件夹中的P2SAT1.m。)

2.1.3 局部直方图均衡化方法

为避免全局直方图均衡化忽略位置信息带来的弊端，在改进的均衡化算法中，需要将位置信息引入。所以，我们采用局部直方图均衡化的算法，让直方图小窗在全图漫游，在不同位置分别计算直方图，并进行相应的均衡化映射。

2.1.3.1 子块完全重叠的局部直方图均衡化

子块完全重叠的局部直方图均衡化方法由用户给

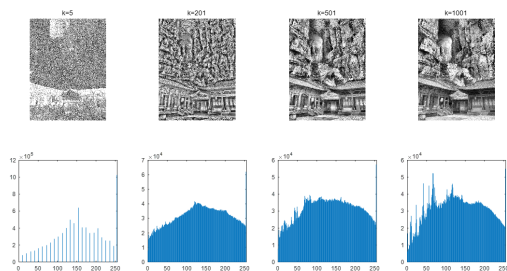


图 10: $k=5, 201, 501, 1001$ 时对图像 1 的处理结果

定某尺寸的矩形窗口，将这一窗口在原图像上移动，遍历整张图像。这一算法运算量极大，但较子块部分重叠的算法效果更好。

在子块完全重叠的直方图均衡化算法中，需要的输入值除了原图像之外，还有窗口尺寸。方便起见，选取窗口形状为正方形。在处理过程中，对三张给定图像，分别选取了多个窗口边长 k 进行测试。图 10 是对第一幅图像的处理结果。

（脚本文件为P2SAT2P1I1.m~P2SAT2P1I3.m）

窗口选取过小时，图像上会分布大量的雪花纹样（ $k=5$ ），无法辨清图像中的细节。而且图像灰度值相对关系被严重破坏，呈现出一种“反色”的效果。产生这一问题的原因在于局部直方图均衡化算法中，我们统计子块中像素点的灰度，然后依照全局直方图均衡化方法生成当前灰度区间 $[i,j]$ 到 $[0,255]$ 的映射。对于较暗的区域，如果周围的子块灰度十分接近，中心像素点有较大概率会被映射到灰度极端的位置，这样的极端是由于像素点个数过少导致的。

将窗口边长 k 取大后，局部的灰度失真现象就逐步缓解。在 $k=201$ 时，山崖石头边缘的阴影效果过于明显，原因仍然是窗口大小取得较小。不过此时出现这一现象就不能简单地断言 $k=201$ 的处理效果较差了：在这一窗口大小下，我们甚至可以清楚地看到石头间的层次、纹路。这是因为，在子块取得稍小些时，局部特征得到了充分地反映。随着窗口的增大，局部细节的对比度减弱，而图像的整体感更强，处理效果也逐步向全局直方图均衡化算法靠近。

由上面的分析，我们大致可以得到局部直方图均衡化较全局直方图均衡化的不同：图像的局部细节在局部直方图均衡化中得以突出，但是相应地，由于选取的像素并不包含全局信息，部分位置的灰度值会发生畸变，甚至出现灰度大小关系发生变化的现象——这一现象在全局直方图均衡化中不可能发生。那么，有没有可能找到这样一种算法，能让局部直方图均衡化尽可能地保持原有的灰度大小关系呢？

2.1.3.2带阈值的局部直方图均衡化

在这一部分尝试这样一种方法，将图像依照一个阈

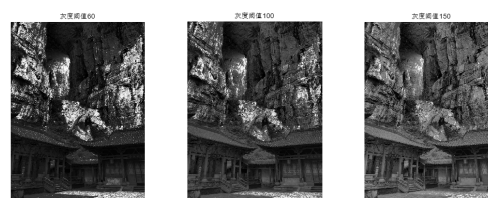


图 11: 带阈值的局部直方图均衡化处理结果
（从左至右灰度阈值为 60, 100, 150）

值灰度，分割成两张子图，然后分别对它们在各自的灰度范围内进行局部直方图均衡化，以保证这两灰度层次间的互不交叠，从而保证两层间的灰度大小关系不变。经统计，在图像 1 中，有 90%的点灰度值在 95 以下，80%的像素灰度在 61 以下，所以尝试对图像 1 做灰度阈值为 60, 100, 150，窗口大小 1001 的局部直方图均衡化。（P2SAT2P2.m）

可以看到，在 3 个灰度阈值的结果中，视觉上均可以清晰地感觉到山崖和建筑物的整体灰度差别。对于这一点，在全局直方图均衡化算法中做得太过，屋檐下灰度太大；而子块完全重叠的直方图均衡化算法则做得不够，有把建筑物和山崖的明暗关系倒置的趋势。而采取了带阈值的局部直方图均衡化算法后，一定程度上缓解了灰度级倒置的问题。

2.1.4定量的效果评估

在这一部分采用PSNR和SSIM指标评估图像增强的效果。之前处理结果的PSNR和SSIM指标见下表。

PSNR 指标					
窗口大小 k	全局	5(10)	201(401)	501(1001)	1001(2001)
图像 1	21.8222	8.0143	12.1565	13.9164	16.7267
图像 2	20.3246	11.3221	14.5942	16.0223	17.5435
图像 3	18.9148	8.1463	11.9992	13.4876	16.2196

SSIM 指标					
窗口大小 k	全局	5(10)	201(401)	501(1001)	1001(2001)
图像 1	0.8277	0.2575	0.6009	0.6789	0.7517
图像 2	0.8835	0.3995	0.7105	0.7945	0.8418
图像 3	0.712	0.1444	0.4243	0.5005	0.5828

（注：括号内的数对图像 3 适用）

带阈值的直方图均衡化（图像 1）			
阈值大小	60	100	150
PSNR	10.4655	11.2691	13.311
SSIM	0.489	0.5908	0.6998

原图 PSNR 为 9.0871, 11.4897, 9.2110，SSIM 为 0.3950, 0.5844, 0.3694。在经过全局直方图均衡化后，PSNR和SSIM指标得到了很大的提升。然而，在子块直

方图均衡化以及带阈值的直方图均衡化操作后，尽管PSNR和SSIM指标较原图有所提升，但均不如全局直方图均衡化，而且表现出一种参数越接近于全局直方图均衡化本质时（即窗口取大，和阈值取高），性能指标越好的现象。尽管我们所采用的局部直方图均衡化算法在体现局部细节，维护相对亮度关系等方面有所提升，但是局部直方图均衡化的处理方式仍有一些较大的缺陷，例如子块间不自然过渡所形成的大片artifact，会使图像中被引入大量偏离真实的分量，导致PSNR值下降，同时破坏图像的局部结构特性。

2.2. 带噪声的低照度图像增强

当低照度图像受到噪声污染，在进行图像增强操作前，需要先对其进行滤波，才能进行增强操作。否则图像中的噪声在增强后会带来我们所不期望的效果。在这一单元之后的操作中，我们先使用响应滤波器对图像去噪，然后用全局直方图均衡化方法提高图像的对比度。

2.2.1 使用均值滤波方法进行图像去噪

均值滤波是一种较为常用的图像平滑方法。算术均值滤波器用窗口内各像素灰度的平均值取代窗口中央像素的灰度值，用这种方法消去噪声的尖锐变化，但其副作用是模糊图像的边缘。在本部分我们仅对图像1进行均值滤波方法去噪的实验，以大致了解均值滤波的去噪效果。PSNR和SSIM计算结果如下。（P2SBI1mean.m）

指标	直接均衡化	3x3	5x5	7x7
PSNR	17.73	20.338	19.9348	19.3493
SSIM	0.3659	0.5932	0.591	0.5253

可以看到，经过均值滤波后直方图均衡化增强的图像，较直接使用直方图均衡化，有更高的PSNR和SSIM。

2.2.2 巴特沃斯低通滤波器去噪

该滤波器有两个可调参数：截止频率D0和阶数n，n越大，滤波器的截止性能越好，在空域中振铃现象也更加明显。在使用频域滤波前，需先确定一个截止频率。分别对图像1,2,3的频谱进行手动的量测，得到图像1,2,3的低频成分窗口大小大约为115,113,153。对于图像1，选取截止频率大小为150,200,300，分别尝试2、3阶图像，观察去噪效果。发现阶数对效果的影响不大，因此之后统一选2阶。取不同截止频率的差异较明显：截止频率低会损伤图像边缘。如截止频率设定为150的图像在边缘处明显要比后两图像模糊一些。计算PSNR和SSIM指标，有：

指标	直接均衡化	150	200	300
PSNR	17.73	18.4366	19.0039	19.7465
SSIM	0.3659	0.4394	0.493	0.5729

随着截止频率的提升，PSNR和SSIM指标不断优化，这说明之前的截止频率可能取得偏低，使得一些图



图 12：不同截止频率对边缘的影响

对图像2采用巴特沃斯滤波的局部效果 对图像2采用高斯滤波的局部效果



图 13：两种不同频域滤波器性能对比

像中的细节被损伤。继续尝试，观察到通带在500~600间时，能取到较好的指标（550时PSNR为20.4018，SSIM为0.6073）。但在截止频率550的图像中已经可以看到明显的雪花样噪点了。它的指标高是因为它将图像的边缘和细节保留得好。但从去噪的角度看，它的效果并不理想。可见对带噪声的低照度图像的增强本质上是多维优化的问题，需要在去噪性能和视觉效果间做出折衷。

2.2.3 高斯低通滤波器去噪

高斯低通滤波器是另一种常用的滤波器。通常使用时只需确定截止频率这一参数。基于上一部分的截止频率选取经验，使用高斯滤波器对图像进行去噪，然后做直方图均衡化操作。计算得到PSNR和SSIM指标如下。

图像 1

截止频率	150	200	300
PSNR	18.78	19.2933	19.9582
SSIM	0.5053	0.563	0.6205

图像 2

截止频率	150	300	500
PSNR	16.1552	17.4764	18.5339
SSIM	0.3755	0.5703	0.697

图像 3

截止频率	200	400	800
PSNR	18.3029	18.6258	18.4936
SSIM	0.6264	0.6475	0.5173

对比之前的巴特沃斯低通滤波效果，从指标上看高斯滤波器的处理结果整体略强，但两者相距不远。就处理的整体效果而言，当截止频率选取得一致，两者之间存在微小的差别。例如前边分析提到的图像边缘处（如图13），经巴特沃斯低通滤波后的图像边缘处较经高斯低通滤波后的边缘更为突出，体现在视觉上即颜色较旁边的像素显得更深一些，这是因为巴特沃斯滤波器在截止频率附近幅值下降得较高斯滤波器更为剧烈。

3. 附加题

3.1. 边缘增强

采用之前已经确认的去噪方式进行去噪，在此基础上用canny进行边缘提取。然后找到边缘像素的位置，在去噪后图像的对应位置像素乘一个系数，达到边缘增强的效果。

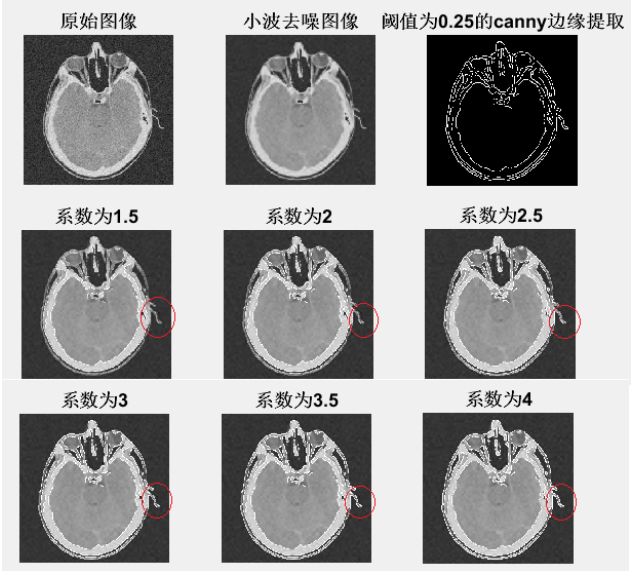


图 14：边缘增强效果图

从结果可见，系数较小时，对图 14 中红圈标注位置增强效果十分有限。随着系数增大，增强效果越来越明显。并且由于边缘的锐度较高，即使边缘增强很多也不会图像其他部分的观察造成干扰。因此在实际中，为取得更好的观察效果，可适当选取较大边缘增强系数。

3.2. 同态滤波

在本部分，我们将对光照不均而导致部分位置偏暗的图像同态滤波处理，期望能恢复低照度区域视觉效果，并尽可能减少增强过程中引入的失真。

在RGB空间中，选用高斯提升滤波器，选定标准参数 $\gamma_H=4.5$, $\gamma_L=0.3$, $c=1$, $D_0=10$ ，在这些值附近改动 γ_L , γ_H , c 的取值，分析处理效果的不同。

在同态滤波时，需要抑制光照项对图像的影响，而对反射项作适当放大，以对比的形式抑制光照项。因此， γ_L 成为影响图像增强效果的关键因素。将 γ_L 由近 1 值调整到近 0 值，可以看到，图像的低照度部分亮度得到提升。调整 γ_H ，处理效果没有太大改变，因为 γ_H 是高频区域的增益，而高斯函数近原点处的衰减要比远离原点处快。到给定窗口 D_0 处时， $e^{-\frac{r^2}{D_0^2}}$ 也已经降低到 0.3679 了，再往低频走，增益很快就会趋于 γ_L 。而低频成分占主导，因此整体效果主要受 γ_L 影响。而 c 参数，只是用

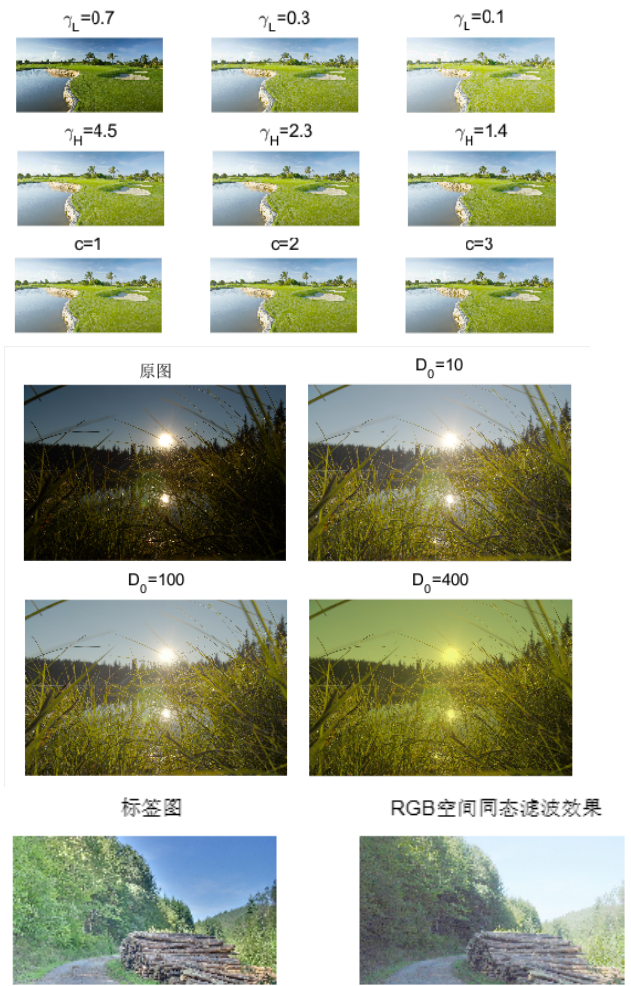


图 15：RGB空间下的同态滤波

于控制函数坡度的锐度，在 D_0 较小时的影响不是很大。提升 D_0 ，通带宽度提升，光照成分保留充分。注意到图像 2 中G通道成分主导整张图像的色调。在 D_0 增大后，高通提升滤波的截止频率变小，对光照项的抑制不充分，各通道的色饱和度提升，G通道尤其明显。所以，增大 D_0 带给人的视觉效果是图像变绿变暗。

根据上述分析，交互地调整各参数，得到较优结果，并计算PSNR和SSIM：

	D_0	C	γ_H	γ_L	PSNR	SSIM
图像 1	10	1	4.5	0.3	18.8715	0.948
图像 2	20	1	8	0.4	21.0381	0.6554
图像 3	10	1	3	0.1	12.9302	0.6155

图像 3 的PSNR值很低。与给定标签图对比，可以发现本部分处理中存在严重问题：图像颜色失真。如图像 3，树林部分处理后整体仍然偏暗，天空部分的色彩上却过饱和。如果调大 γ_L ，暗处变亮，但过饱和更严重。如果要改进，可以考虑对图像先进行分割，再进行同态滤波操作，以避免处理过程中的变化冲突。

参考文献

- [1] 周密,李尊尊,耿国华.基于小波阈值的图像去噪方法研究[J].计算机技术与发展,2008(5):1-3.
- [2] 孙琰.基于小波变换的图像边缘检测技术[D].西安:西北工业大学,2004:2-5.
- [3] 王康泰.灰度图像边缘检测方法研究[D].杭州:浙江工商大学,2007:1-4.
- [4] Wang Y, Chen Q, Zhang B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45(1): 68-75.
- [5] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. IEEE transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(1): 1-8.
- [6] 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.
- [7] 江巨浪,张佑生,薛峰,等.保持图像亮度的局部直方图均衡算法[J].电子学报,2006,34(5):861-866.
- [8] SamLiao-SCUT. 图像处理PSNR及其计算(OpenCV和matlab实现)[OL]. CSDN.
<https://blog.csdn.net/laoxuan2011/article/details/51519062>.
- [9] Cool_ben. SSIM——基于结构相似性的图像质量评价(matlab)[OL]. CSDN.
https://blog.csdn.net/cool_ben/article/details/46597967.
- [10] 水木剑锋. 图像增强之——同态滤波[OL]. CSDN.
https://blog.csdn.net/sinat_34035510/article/details/51337266.
- [11] 晨晁追风. 颜色空间那些事儿[OL]. CSDN.
<https://blog.csdn.net/hit2015spring/article/details/52556653>
- [12] jjkislele. PSNR_SSIM_in_matlab[CP]. Github.
https://github.com/jjkislele/PSNR_SSIM_in_matlab.