

《数 字 图 象 处 理》

综合作业 4

综合报告

班级：自 45

姓名：林子坤

学号：2014011541

目录

一、项目简介	3
二、程序属性	3
三、调研报告与综述（一）	4
3.1 论文背景	4
3.2 论文算法	5
四、调研报告与综述（二）	6
4.1 论文背景	6
4.2 论文算法	6
五、调研报告与综述（三）	7
5.1 论文背景	7
5.2 论文算法	7
六、算法原理与设计	8
6.1 第一步：读取文件	8
6.2 第二步：计算权重函数(weighting function)	9
6.3 第三步：从 6 张图像中采样并记入矩阵	9
6.4 第四步：建立曝光度矩阵	9
6.5 第五步：求解特征函数 $g(z)$	9
6.6 第六步：HDR 算法计算	9
6.7 获得结果	10
七、程序结构	11
八、算法改进讨论	11
九、心得与体会	13
参考文献	14

综合作业 4 HDR 算法调研与实现

综合报告

林子坤

(自动化系 自 45 班 2014011541)

一、项目简介

在我们日常使用手机或相机照相功能的过程中，我们可以发现其中有一个“HDR”选项。例如苹果手机在 5 代之后便提供了“HDR”的功能。那么“HDR”是什么呢？为什么它能够提供更好的图片处理效果呢？本次项目将对 HDR 技术及其算法实现进行调研。

高动态范围成像(High Dynamic Range Imaging, HDR)是“用来实现比普通数位图像技术更大曝光动态范围(即更大的明暗差别)的一组技术。高动态范围成像的目的就是要正确地表示真实世界中从太阳光直射到最暗的阴影这样大的范围亮度。”(引自维基百科)

HDR 的出现主要是为了解决照片显示内容动态范围不足的问题，现在除了手机、相机外，HDR 技术还用在了电视上。高动态范围图像 (High-Dynamic Range, 简称 HDR)，相比普通的图像，可以提供更多的动态范围和图像细节，根据不同的曝光时间的 LDR(Low-Dynamic Range)图像，利用每个曝光时间相对应最佳细节的 LDR 图像来合成最终 HDR 图像，能够更好的反映出真实环境中的视觉效果。因此，通过 HDR 技术，我们可以看到更接近真实、更鲜艳的显示效果。

本次项目的内容是调研并综述 2 篇以上 HDR 算法相关的文献，并实现一种 HDR 算法。并讨论算法中参数对结果的影响。

二、程序属性

本程序使用 Matlab(R2016a, maci64)编写，“.m”文件支持的运行环境是所有装有 Matlab 的计算机。

输入六张图像如下：





以下是一张较为理想的 HDR 算法最终实现结果。



三、调研报告与综述（一）

本部分调研的是“Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs”一文，作者是来自 University of California at Berkeley 的 Paul E. Debevec 与 Jitendra Malik。在参考文献中也将加以注明。

注：在综述过程中，对于英文文献中的一些单词不知如何翻译，在查询未果后，采取直接原意直译的方式标注在引号中，并在括号中注明英文原文。

3.1 论文背景

在计算机图形学中，数码照片变得越来越重要。当我们拍摄一个场景，我们都能够获得一个二维的“亮度(brightness)”矩阵。然而，这个矩阵却很少是现场真实测量的相对亮度。例如，如果一个像素的值是另一个的两倍，在现实生活中却不太可能观察到两倍的光亮。相反地，通常有一个未知的、非线性的映射，来确定场景中的亮度与图像中的像素值的关系。

这种非线性映射很难实现知道，因为它实际上是在摄影过程中发生的几个非线性映射的组合物。在常规照相机中，这个“影像(film)”首先暴露在光中以形成“潜影(latent image)”。这种“影像(film)”随后被发展从而将“潜影(latent image)”分化为影响上不同透明度或者强度的变化。然后，这种“影像(film)”可以利用胶片扫描仪进行数字化。

在第一阶段的过程中，影像与曝光 X 的关系是一个非线性函数，成为这个影响的“特性曲线(characteristic curve)”。而其中的困难在于有限的动态范围——摄影师必须挑选最感兴趣

的那部分“光亮(radiance)”并选择合适的曝光时间。在有光泽的材料和人工光源的场景，亮度的差异往往十分大从而十分难以捕捉。为了在这种场景中覆盖整个动态范围，可以拍摄一系列不同曝光度的照片。那么问题来了——我们如何将这些单独的图片整合为一张复合的“光亮图谱(radiance map)”呢？

这篇论文提供了一种恢复高动态范围的“光亮图谱”与传统成像设备拍摄照片的方法。在这个方法中，多个场景的照片采取不同的曝光量，则我们可以使用这些不同曝光图片蕴含恢复成像过程的响应函数，将这些图像融合成一个单一的、高动态范围的新图。这张新图将覆盖原始照片拍摄的整个动态范围。

3.2 论文算法

我们使用“特征曲线(characteristic curve)”来反映不同的曝光程度对于图像的影响。设显示像素值 Z 与实际像素值 X 之间的关系为光照强度 E 与光照时间 Δt 之积的函数。

$$Z = f(E \Delta t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

则对两边同时取自然对数并以反函数形式表达，可得以下公式。

$$\ln(f^{-1}(Z_{ij})) = \ln(E_i) + \ln(\Delta t) \quad \dots \dots \dots (1.5)$$

记 $g = \ln(f^{-1})$ ，则将以 (1.5) 公式化为以下形式。

$$g(Z_{ij}) = \ln(E_i) + \ln(\Delta t) \quad \dots \dots \dots (2)$$

为了获取函数 g 最好的形式，使得该函数能够最好地满足等式(2)，我们需要设置一个 $g''(z)$ 函数以增加 g 函数的光滑性。在实际操作中，通过在矩阵中增加一组额外的值来实现这一目标。

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 \quad (3)$$

由于 $g(z)$ 在接近 Z_{min} 和 Z_{max} 的区域会有个较为陡峭的幅度变化，因此为了使得 $g(z)$ 变得更加光滑并在这个区域所得到的结果看起来更加真实，我们需要一个权重函数(weighting function) $w(z)$ 来实现这个目标。式(4)给出了一个权重函数 $w(z)$ 与像素值 z 的关系，表示如下：

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & (z < \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max})) \\ Z_{max} - z & (z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max})) \end{cases}$$

将(3)式加上权值因素进行考虑，获得新的表达式如下所示。

$$\mathcal{O} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{w(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]\}^2 + \\ \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z)g''(z)]^2$$

最后，由于图像的像素点往往较多，我们并不需要使用每一个求解过程中的点。对于 P 张图片，我们只需要给出一定量的采样点进行恢复即可。例如，在本次大作业中，有 6 张曝光度不同的图片，该算法告诉我们只需要给出 204 个采样点即可完成算法的要求。

该篇论文也提供了一种根据以上函数关系求解特征函数 $g(z)$ 的方法——SVD（奇异值分解）。因为在线性代数的学习中并没有过多接触到 SVD 方法，关于这一部分的设计将参考其它文献与相关代码。

四、调研报告与综述（二）

本部分调研的是“Photographic Tone Reproduction for Digital Images”一文。在参考文献中也将加以注明。

注：在综述过程中，对于英文文献中的一些单词不知如何翻译，在查询未果后，采取直接原意直译的方式标注在引号中，并在括号中注明英文原文。

4.1 论文背景

在现实生活中，光的色泽是具有很大差异的。文中指出，繁星闪耀的夜空和阳光照耀的白雪具有显著不同的亮度。然而，在我们的有限的显示设备条件下，显示出的色调将和原来的颜色产生较大的偏差。色调再现问题首先由摄影师们提出。他们的目标是产生现实的“效果”，但他们不得不面对设备局限性的现实。

一个经典的摄影任务是对现实世界的潜在的高亮度动态范围的照片，输出一个对应的低动态范围映射，而“色调再现”的问题也成为了计算机图形学中的一个重要问题。这篇论文对摄影过程中的色调映射进行分析，并设计出一个新的色调调整的方法。

4.2 论文算法

和很多的图像亮度恢复过程相似，该算法也使用了“对数平均(log-average)”的方法来进行计算，对于每个点 (x,y) ，背景平均光亮程度计算如下。

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp \left(\sum_{x,y} \log (\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (1)$$

其中， N 代表图像中的像素点总个数， δ 是一个很小的数，是为了防止黑色点在进行除法运算时分母为零，造成程序错误的情况。随后，即可根据这一平均值估算背景光照情况如

以下公式所示，其中 a 是一个常数，其值设置为 0.18，也可根据不同的情况取 0.72、0.045 等数值。

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x, y) \quad (2)$$

论文注意到，在高光或是天空场合下，很多场景有一个主导的动态范围变化，但实际的高光照区域却是很小的。而且在很多场合下，我们也不需要将图像中所有点的像素值压缩在一个范围内（如 0~255）。为了解决这一问题，设计了以下公式。其中 L_{white} 代表能够显示为“纯白(pure white)”的亮度值。

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}} \right)}{1 + L(x, y)} \quad (4)$$

五、调研报告与综述（三）

5.1 论文背景

本部分调研的是“高动态范围图像的生成与显示方法研究”一文，作者是李林国、李淑敬、李季。在参考文献中也将加以注明。

自然场景的亮度包含很大的动态范围，其动态范围差别可达亿级。然而普通的打印及显示设备可表示的动态范围仅仅只有 100:1。因而高动态范围图像的生成与显示都非常困难。近年来国内外高度关注高动态范围图像的研究，出现了大量的相关论文。尤其在高动态范围图像的生成、显示和压缩等方面。

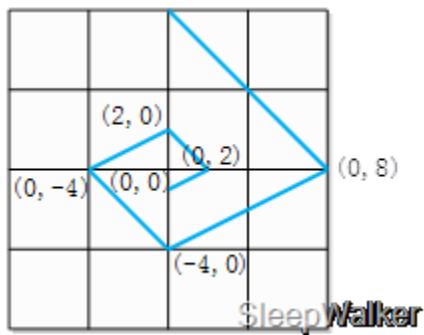
5.2 论文算法

2008 年，有专家提出了一种给予人眼视觉系统的自适应映射算子。该方法使用了一种基于 Retinex 理论的人眼视觉系统模型，该模型摒弃了以往通过计算某一半径范围内的像素进行局部处理的方法，采用一种自适应的边缘处理局部算子，有效避免了光晕现象。

Retinex 算法是 McCann 和 Frankle 一起提出的一种 Retinex 算法，该算法是一种基于多重迭代策略的 Retinex 算法，单个点的像素值取决于一条特定路径的环绕的结果，经过多次迭代逼近理想值。通过比较螺旋式路径上的各像素点的灰度值来估计和去除图像的照度分量。

该算法估测图像经过以下几个步骤：

- 1、将原图像的三个彩色通道均变换到对数域；
- 2、初始化常数图像矩阵 $R_0(x, y)$ ，作为进行迭代运算的初始值；
- 3、计算路径，如下图所示，令 S_1, S_2, \dots, S_m 为路径上的点，从远到近排列；



4、对路径上的像素点按照如下公式运算：

$$\begin{aligned}
 R_c &= \frac{I_m + R_c}{2} = \frac{R_m + S_c - S_m + R_c}{2} = \frac{S_c - S_m}{2} + \frac{R_m + R_c}{2} \\
 &= R_0 + \frac{r_c - r_m}{2} + \frac{r_c - r_{m-1}}{2} + \dots + \frac{r_c - r_1}{2}
 \end{aligned}$$

其中 R_c 表示中心位置最终的反射率估计， R_0 为常数值为转换后的图像中的最大值，在步骤 2 中被确定。最终公式中可以看到，最终照度分量被去除了，而中心位置的反射率由路径上各点的反射率之间的差值进行估计，并且从轨迹上可以看到，靠的越近的在最终估计的时候所占比重越大。

此迭代方案基于成对像素亮度值间的互动，这一像素对在图像中的坐标 (x, y) 、 (x_s, y_s) 。第一步处理的像素被预定义的距离 $shift$ 分开，下一步将比较方向顺时针旋转 90 度，距离 D 减半，直至到达单位像素距离。每一步计算中迭代次数 $nIterator$ 由用户决定。每次迭代有四个步操作：比例(ratio)、乘积(product)、重置(reset)、平均(average)。

在程序中，设 OP 为上一步迭代的乘积； NP 为当前迭代的乘积； IP 为中间乘积结果； R 为原始图像；符号 * 表示重置操作。每步迭代使用如下公式估计点处的明度值：

$$NP(x, y) = \sqrt{OP(x, y) * IP(x, y)} = \sqrt{OP(x, y) [OP(xs, ys) \frac{R(x, y)}{R(xs, ys)}]^*}$$

该方法首先由像素的 RGB 值计算其亮度 $L = 0.299R + 0.587G + 0.114B$ ，然后通过公式进行 HVS 的初步亮度校正。接下来，该方法通过高斯函数对图像进行局卜算子处理。

六、算法原理与设计

本次程序设计实现的算法是来自 “Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs” 一文，作者是来自 University of California at Berkeley 的 Paul E. Debevec 与 Jitendra Malik。程序设计过程中参考了来自 TU Berlin(柏林工业大学)网站对于 HDR 算法的研究。

6.1 第一步：读取文件

该步骤读取助教老师所给的 6 张不同曝光度的图像并将其所有信息存在一个元组变量中方便调用。

6.2 第二步：计算权重函数(weighting function)

根据论文式(4)可得权重函数 $w(z)$ 与像素值 z 的关系表示如下：

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & (z < \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max})) \\ Z_{max} - z & (z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max})) \end{cases}$$

6.3 第三步：从 6 张图像中采样并记入矩阵

从算法中可以看出，为了解出特征函数 $g(z)$ ，需要对各张图片相同位置的点进行采样，并构造一个 2 维采样点矩阵（实际为 RGB 通道的 3 个单独矩阵）记录采样信息。这个采样点矩阵第一维存储的是不同图像的序列，第二维存储的是各张图像的采样点 RGB 信息。

6.4 第四步：建立曝光度矩阵

根据曝光时间信息（这由文件名获得。由于本题目中助教老师并没有给出这 6 张图片的曝光度信息，因此本人猜测曝光时间由短到长分别为 $\frac{1}{256}, \frac{1}{128}, \frac{1}{64}, \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{1}{8}$ ）建立曝光度矩阵 B ，记录曝光时间的自然对数。

6.5 第五步：求解特征函数 $g(z)$

本部分参考了来自 TU Berlin(柏林工业大学)网站对于 HDR 算法的研究，奇异值分解部分参考了该网站的相关代码。

建立求解方程组 $g(x)=A^{-1}b$ 。 A 与 b 的参数设置如下， k 值代表所在行数。初始 k 值为 1（代表第 1 行）经过每一次设置后，将 k 值增加 1。

$$\begin{aligned} A[k, Z[i, j] + 1] &= weight(Z[i, j] + 1) \\ A[k, 256 + i] &= -weight(Z[i, j] + 1) \\ A[k, 129] &= 1 \\ b[k] &= weight(Z[i, j] + 1)*B[i, j] \end{aligned}$$

与此同时，为了增加求解结果的光滑程度，在最后增加一组额外的方程，其中 l 为预先设定好的光滑系数：

$$\begin{aligned} l \cdot weight(i+1) \cdot x_{k,i} - 2 \cdot l \cdot weight(i+1) \cdot x_{k,i+1} + l \cdot weight(i+1) \cdot x_{k,i+2} \\ = weight(Z[k, i+2] + 1)*B[i, j] \end{aligned}$$

最后，使用奇异值分解法获得长度为 256 的特征函数 $g(z)$ 。

6.6 第六步：HDR 算法计算

本步骤是 HDR 算法的核心部分。在这个部分中，程序读取曝光时间不同的 6 张图像，

根据网站上的研究，如果一个像素是“饱和(saturated)”的（即像素值为 255），那么它和之前图像的具有更长曝光时间的信息就变得不可靠了（个人理解是：如果这张图像具有更长的曝光时间，像素值将会比原来的更高。然而原来的像素值已经达到了最高的 255，则那个本应更高的像素值也只能以 255 来表示，这势必造成较大的误差）。

为了简化该方法的计算，使用权值和加权求和的方式忽略这些影响。其本质是生成一个刨除这些“饱和”点的掩膜，在最后的 HDR 处理中这些点的值将以 $g(z)-B$ 来代替。

最后，对 HDR 处理的结果进行规范化，处理方式是将 HDR 结果除以权值积分和，并取指数从而获得最终结果。

根据求解公式 $\text{luminance}=0.2125\text{hdrR}+0.7154*\text{hdrG}+0.0721*\text{hdrB}$ ，获得光照图如下。

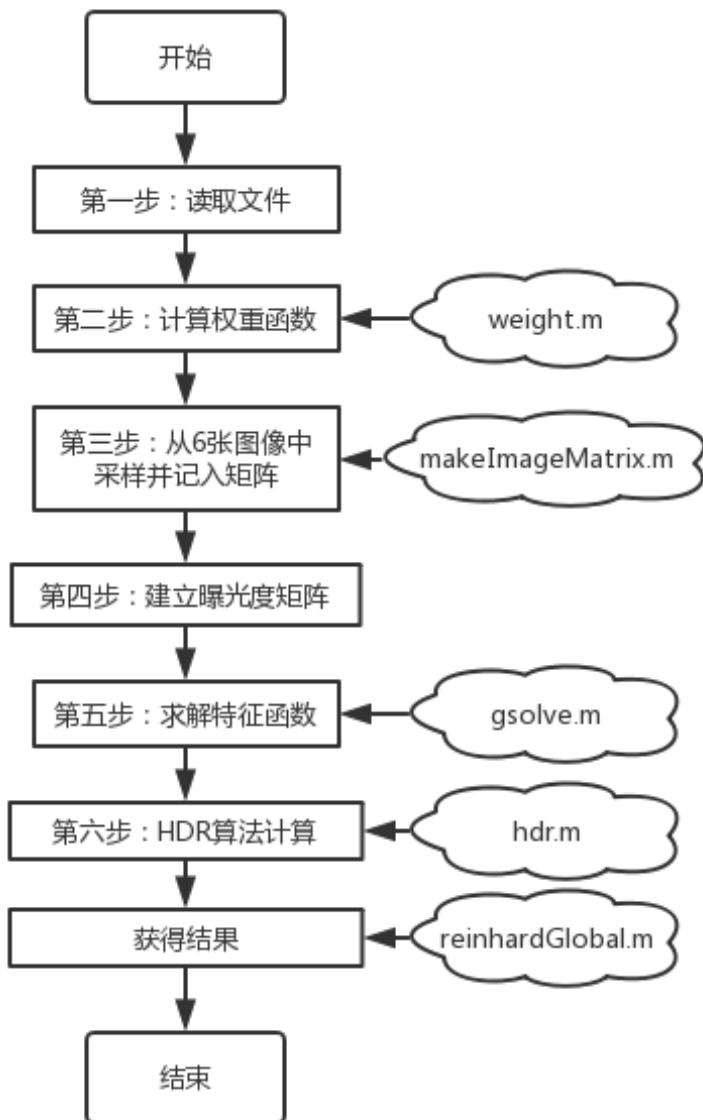


6.7 获得结果

本部分参考了来自 TU Berlin(柏林工业大学)网站对于 HDR 算法的研究与相关代码。最终获得了高范围动态成像的结果如下图所示。



七、程序结构



八、算法改进讨论

在这次 HDR 算法的调研过程中，我们也发现了一个比较不方便的问题：曝光时间的未知使得我们需要先对曝光时间进行“猜测”。为了大致解决这一问题，本人想到了以下思路——可以将各张图片的背景亮度提取出来，然后依据一张“对应表”将这个亮度对应到一个曝光时间，那么这个曝光时间便可以不需人为“猜测”，只需计算机估算即可。这个部分的大致原理阐述如下。

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

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y)$$

其中，图像的照射分量通常由慢的空间变化来表征，取值范围是

$$0 < i(x, y) < \infty$$

而反射分量往往引起突变，特别是在不同物体的连接部分，取值范围是

$$0 < r(x, y) < 1$$

我们定义

$$z(x, y) = lni(x, y) + lnr(x, y)$$

如果 $lni(x, y)$ 和 $lnr(x, y)$ 是独立随机变量，则 $z(x, y)$ 的直方图是 $lni(x, y)$ 和 $lnr(x, y)$ 直方图的卷积。因此如果 $lni(x, y)$ 的直方图很宽，它和 $lnr(x, y)$ 卷积的结果将不能保持类似于 $lnr(x, y)$ 直方图的形状， $z(x, y)$ 的直方图可能和 $lnr(x, y)$ 的直方图有很大不同，不一定是双峰的。

实践中可将非均匀光射到一个白色均匀反射面产生和入射光成正比的图，有

$$g(x, y) = ki(x, y)$$

归一化的反射光生成图为

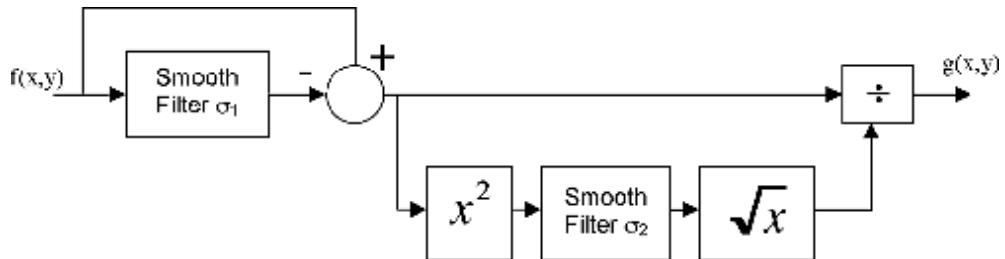
$$h(x, y) = \frac{f(x, y)}{g(x, y)} = \frac{r(x, y)}{k}$$

那么如何从图像中估计 $g(x, y) \approx ki(x, y)$ 呢？Guanglei Xiong (Full-Time WCMC Faculty, Weill Cornell Medical College) 提出了一个“local normalization algorithm”（可能译为“局部正态算法”？），其原理简要由下式表示：

$$g(x, y) = \frac{f(x, y) - m_f(x, y)}{\sigma_f(x, y)}$$

其中， $f(x, y)$ 表示原始图像， $m_f(x, y)$ 表示 $f(x, y)$ 局部均值的估计量， $\sigma_f(x, y)$ 表示 $f(x, y)$ 局部方差的估计量， $g(x, y)$ 表示输出图像。

根据以上算法，该算法示意图如下所示：



其中， σ_1, σ_2 分别控制两个平滑滤波器的参数。

因此，可以通过先进行“局部正态算法”的方式，将各张图片的背景亮度提取出来。

为了能够将背景亮度与曝光时间对应起来，在进行这个步骤之前，可能需要对相机进行一些必要的测试，对不同曝光时间的背景亮度进行一一对应，此后进行“查表”即可找出映

射后的曝光时间。

九、心得与体会

不知不觉中，这学期的课程已经到达尾声。回想起这学期开学之初选择数字图象处理课程时的“懵逼”状态，到第一次体验大作业一次次“图像拼接”的“心累”，数图课程最初的确给了我不少的挑战。但是，当我最终等待了 20 分钟的程序结果是令人欣喜的“完美对接”时，我深深感受到了数字图象处理课程的魅力所在——艰难的过程与令人满足的结果，在其中付出的那些汗水是我这学期最大的收获。

数字图象处理课程和其他课程不同，它的大作业与实际生活、工业息息相关。在生活、工业中，难免有一些摄像硬件的局限性，数字图象处理为这个局限性提供了改进的可能，也使得我们将学习与生产生活接轨。“同态滤波”、“图像去雾”，让我们认识到今后的学习与生产生活对接的方向。

最后，再次感谢陆老师一个学期的耐心讲课，也感谢两位助教不辞辛劳批阅作业、解答我们的问题。预祝老师、助教新年快乐，万事如意！

参考文献

- [1] Digital Image Processing_3rd, Rafael C.Gonzalez
- [2]Debevec, Paul E., and Jitendra Malik. "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs." ACM SIGGRAPH 2008 classes. ACM, 2008.
- [3] Reinhard E, Stark M, Shirley P, et al. Photographic tone reproduction for digital images[M]// ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM, 2002:267-276.
- [4] 李林国, 李淑敬, 李季. 高动态范围图像的生成与显示方法研究[J]. 微计算机信息, 2011, 27(6):224-226.
- [5] Frankle J A, Mccann J J. Method and apparatus for lightness imaging: US, US4384336[P]. 1983.
- [6] <http://cybertron.cg.tu-berlin.de/eitz/hdr/>