

## 图像处理期中作业

题目：基于直方图的图像增强



学 生 姓 名 : 李闯

学 号 : 2253214

专 业 班 级 : 计算机科学与技术 2 班

指 导 教 师 : 何良华

2025 年 04 月 23 日

## 一、引言

### 1.1. 实验背景

在数字图像处理领域，图像增强技术是改善图像视觉效果的重要手段。由于成像过程中存在光照条件不理想、传感器噪声干扰等问题，获取的图像常出现对比度不足、细节模糊等情况。直方图增强作为经典的图像增强技术，通过重新分布像素强度值来提升图像质量，在多个实际应用场景中展现出良好效果。

### 1.2. 实验目标

本实验旨在通过编程实现和效果分析，深入理解三种典型的直方图增强方法：

- 1) 实现直方图均衡化（HE）、CLAHE 和直方图匹配三种算法。
- 2) 在 ImageNat 数据库的 50000 张图像上进行实验，分析不同方法的增强效果。
- 3) 对比各方法的优缺点，并探讨适用场景。

实验重点关注算法原理的理解和实现，以及增强效果的对比分析。通过本实验，可以掌握直方图处理的核心思想，并了解如何根据实际需求选择合适的增强方法。

## 二、方法实现

### 2.1. 直方图均衡化（HE）

直方图均衡化是一种通过灰度变换将图像直方图从集中分布调整为均匀分布的技术。其核心是将原始图像的累积分布函数(CDF)映射为线性函数，从而扩展动态范围。对于离散图像，变换函数定义为：

$$s_k = T(r_k) = \text{round}\left(\frac{L-1}{N} \sum_{i=0}^k n_i\right) \quad (k = 0, 1, 2, \dots, L-1)$$

其中  $L$  为灰度级（通常为 256）， $N$  为图像的总像素数， $n_i$  为第  $i$  级灰度像素数量。

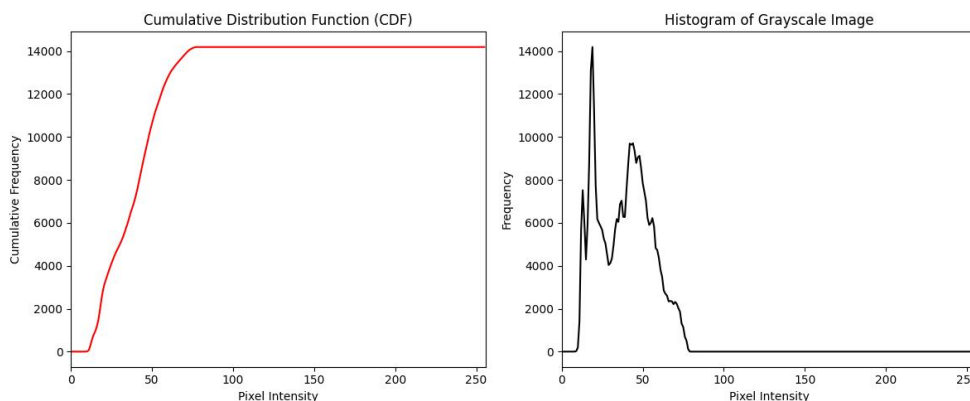


图 1 直方图与 CDF

直方图均衡化处理的具体步骤如下：

- (1) **计算直方图**：统计各灰度级的像素频数。
- (2) **构建 CDF**：计算归一化累计分布函数。
- (3) **灰度映射**：将 CDF 值线性映射到 $[0, L - 1]$ 范围。
- (4) **像素转换**：应用映射表生成新图像。

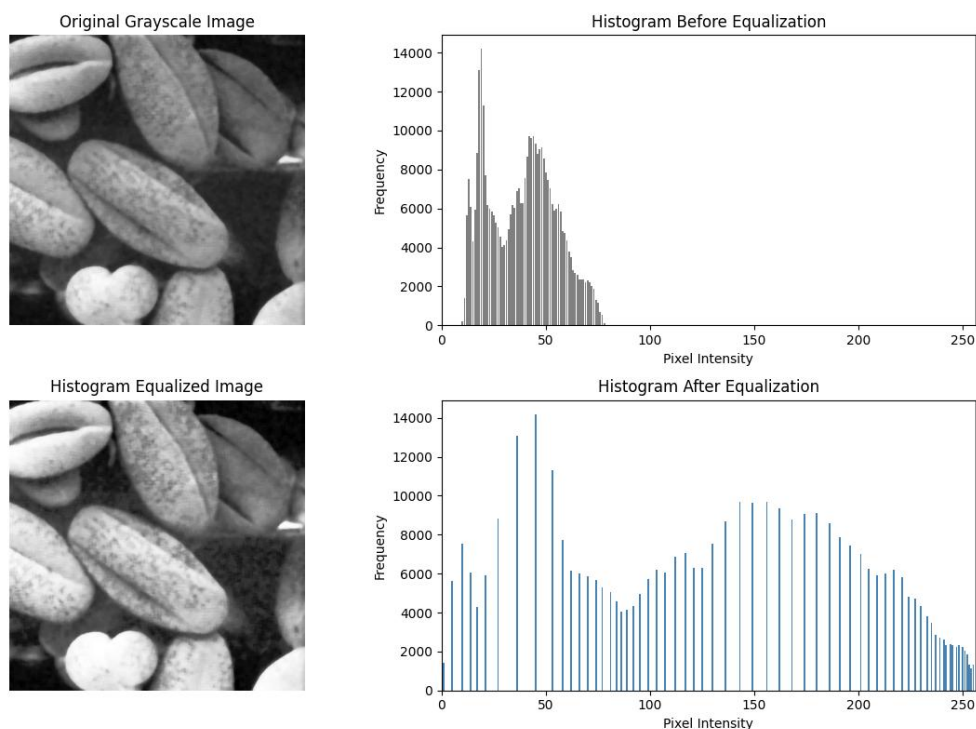


图 2 灰度图像直方图均衡化处理前后对比图

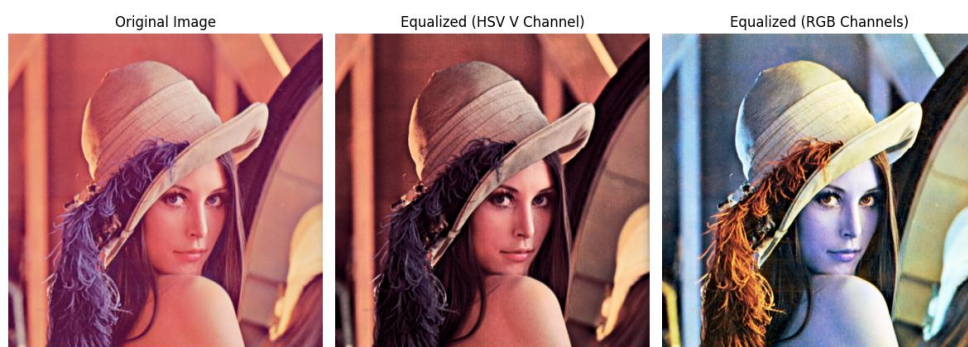


图 3 彩色图像直方图均衡化方法处理结果对比图（HSV vs. RGB）

将直方图均衡化应用于 RGB 色彩空间的三个通道可能会带来意想不到的问题。RGB 色彩空间由红、绿、蓝三个通道组成，每个通道的像素值共同决定了图像的颜色表现。如果对这三个通道分别进行独立的直方图均衡化处理，虽然每个通道的对比度会得到提升，但由于各通道的像素值分布被单独调整，原始图像中 R、G、B 通道之间固有的比例关系会被破坏。这种

比例关系的改变会导致图像的颜色平衡失调，使得最终结果出现颜色失真或产生不自然的色调偏移，从而影响视觉效果。

为了解决这一问题，通常会采用 HSL 或 HSV 色彩空间进行亮度的单独均衡化。HSL（色相、饱和度、亮度）和 HSV（色相、饱和度、明度）色彩空间将颜色信息与亮度信息分离，使得我们可以仅对亮度分量进行均衡化处理，而不影响色相和饱和度。这种方法能够在提升图像整体对比度的同时，有效避免颜色失真的问题。

## 2.2. CLAHE（对比度受限的自适应直方图均衡化）

CLAHE（对比度受限的自适应直方图均衡化）是针对传统直方图均衡化（HE）局限性提出的改进算法。传统 HE 采用全局处理方式，当图像中存在局部过亮或过暗区域时，增强效果往往不够理想，同时会放大背景噪声。这些问题主要源于两个方面：一是全局处理无法适应图像不同区域的亮度差异，二是均衡化过程中对某些灰度级的过度增强。

CLAHE 通过两个核心机制解决传统 HE 的局限性：

（1）**自适应分块处理**：图像被划分为多个不重叠的子区域，每个子区域的直方图单独进行均衡化，使得不同亮度区域的对比度都能得到优化。

（2）**对比度限制**：通过设定一个裁剪阈值（clip limit），对直方图中过高的像素频数进行裁剪，并将裁剪后的像素重新分配到各个灰度级，从而防止某些灰度级因过度增强而引入噪声。

CLAHE 的计算流程可以概括为以下几个步骤：

- （1）**图像分块**：将输入图像划分为若干个大小相同的矩形块（如  $8 \times 8$  或  $16 \times 16$ ）。
- （2）**计算局部直方图**：对每个块计算其灰度直方图。
- （3）**直方图裁剪**：对每个块的直方图进行对比度限制，防止某些灰度级过度增强。
- （4）**均衡化映射**：对裁剪后的直方图进行均衡化，并生成灰度映射函数。
- （5）**插值融合**：为了避免块间边界处的突变，采用双线性插值对相邻块的映射结果进行平滑融合，最终生成增强后的图像。

CLAHE 相比传统 HE 具有显著优势。首先，在细节保留方面，HE 容易造成高光和阴影区域的细节丢失，而 CLAHE 通过局部自适应处理能够更好地保持各亮度层次的细节信息（如图 4-5 所示）。其次，在噪声控制上，HE 会均匀增强所有频率成分导致噪声放大，CLAHE 则通过对比度限制机制有效抑制噪声干扰。

CLAHE 的性能主要受两个关键参数影响：**clip limit** 决定对比度增强强度，**tile size** 控制局部处理范围。如图 6 所示，通过对比不同参数设置的处理效果可以发现，clip limit 值较低时图像增强较为保守，适合本身对比度较好的图像；而较高值能产生更强烈的对比度提升，但可能引入少量块效应。在分块尺寸方面，较小的块能提供精细的局部增强。

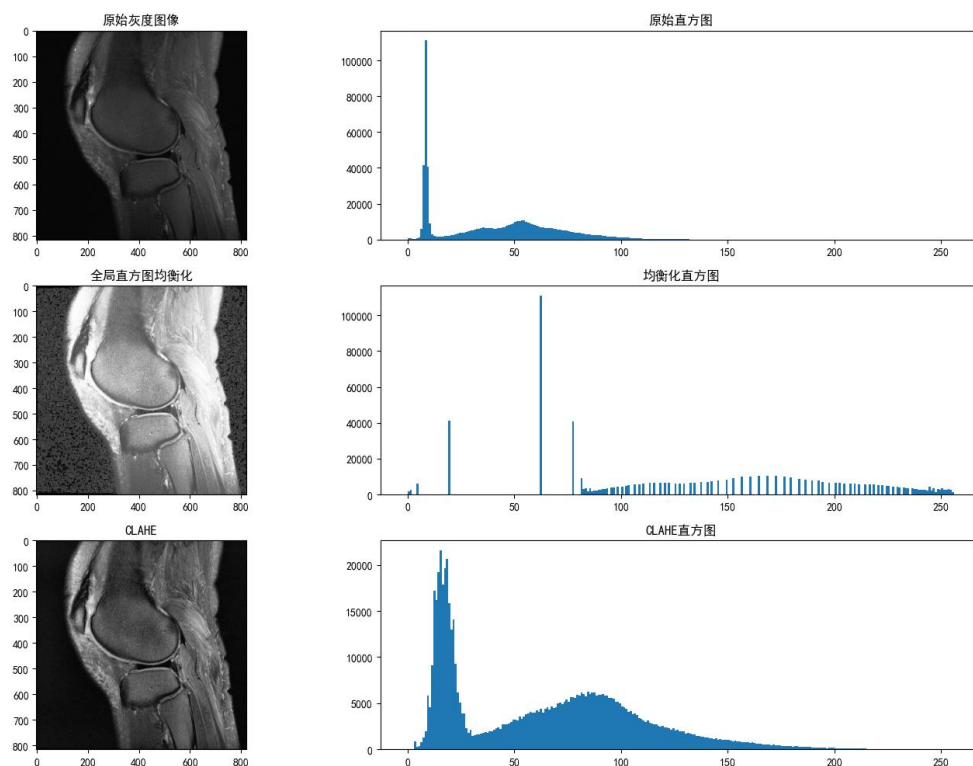


图 4 HE 和 CLAHE 方法处理结果对比图

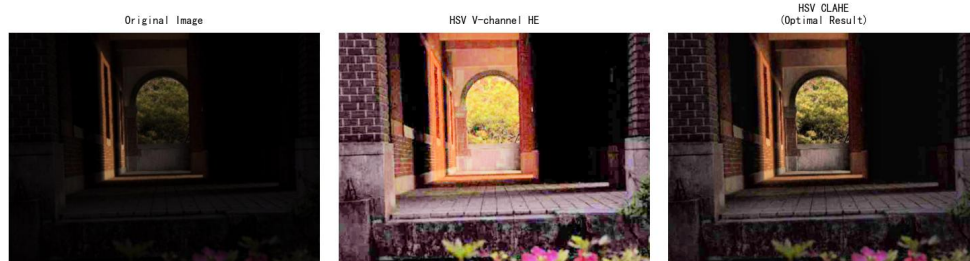


图 5 彩色图像采用 HSV HE 和 HSV CLAHE 方法处理效果对比图



图 6 HSV CLAHE 采用不同参数处理效果对比图



## 2.3. 直方图匹配 (Histogram Matching)

直方图匹配是一种通过调整图像直方图使其逼近目标分布的图像处理技术。其核心原理是通过建立原始图像与目标图像累积分布函数 (CDF) 之间的映射关系来实现灰度转换。具体实现过程包含三个关键步骤：首先计算两幅图像的直方图并构建归一化 CDF 曲线，然后通过寻找 CDF 值最接近的对应关系建立灰度映射表，最后将此映射表应用于原始图像的所有像素。

灰度图像直方图匹配结果对比

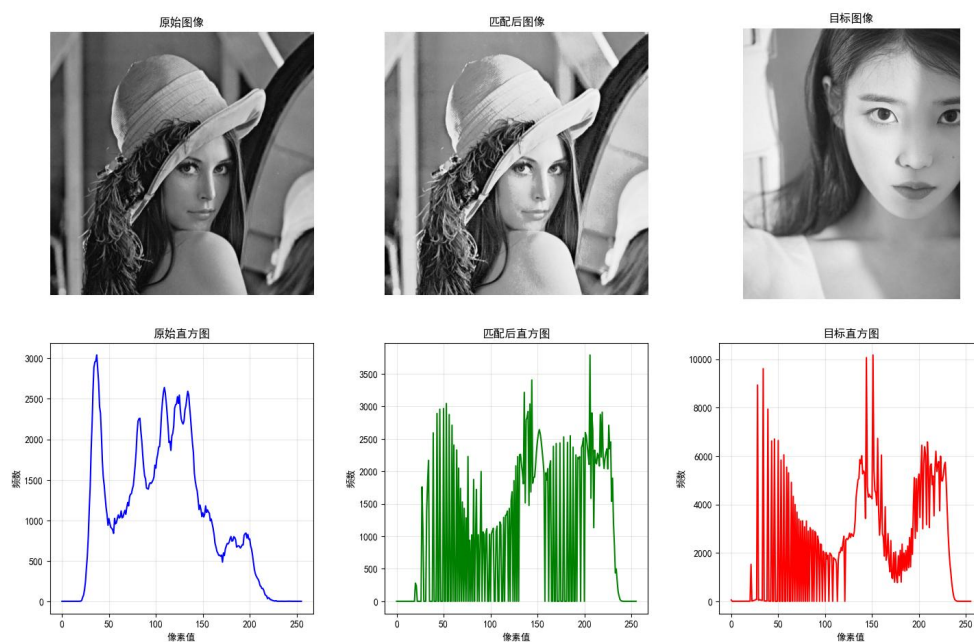


图 7 灰度图像直方图匹配结果对比图

彩色图像直方图匹配结果对比 (HSV空间V通道匹配)

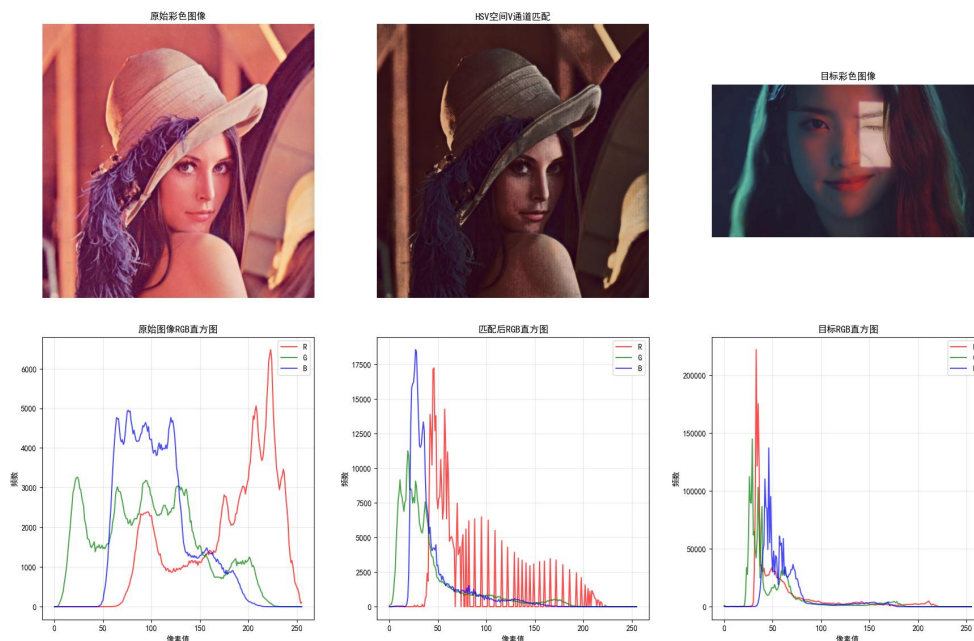


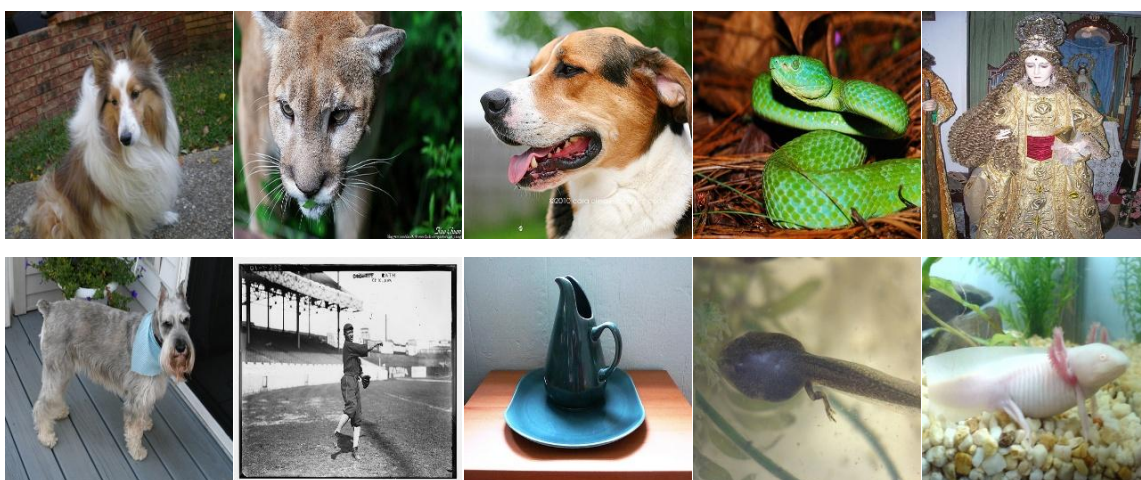
图 8 彩色图像直方图匹配结果对比图(HSV 空间 V 通道匹配)

在彩色图像处理中，直接对 RGB 三通道独立进行匹配会导致严重的颜色失真。如图 8 所示，我们采用 HSV 色彩空间进行处理，仅对亮度通道（V 通道）执行匹配操作，同时保持色相（H）和饱和度（S）不变。这种方法既能有效调整图像对比度，又能完美保留原始色彩特征。。

与直方图均衡化相比，该技术的主要优势在于其灵活性，但需要注意，该方法的效果高度依赖参考图像的选择。

## 三、实验结果与分析

**数据集：**采用 ImageNet ILSVRC2012 验证集（50,000 张图像），覆盖 1,000 个类别，包含不同光照条件、分辨率和场景复杂度的图像。



### 实验结果：

选取其中 10 张图片进行对比展示，每张拼图从左到右依次展示：原始图像、直方图均衡化（HE）结果、CLAHE 增强结果，以及直方图匹配（HM）结果。











## 四、总结

本实验对三种典型的直方图增强算法进行了系统性对比分析，重点考察了不同算法的增强效果与特性差异。实验结果显示，CLAHE 算法在保持图像自然视觉效果方面表现最为突出，能够有效提升局部对比度而不引入明显的噪声放大问题。该方法通过自适应分块处理和对比度限制机制，在多数测试图像上都获得了令人满意的增强效果。

传统的直方图均衡化算法虽然实现简单、计算效率高，但其全局处理特性导致在复杂光照条件下的图像上容易出现过度增强现象，特别是在高光和阴影区域容易丢失细节。相比之下，直方图匹配算法展现出独特的灵活性，通过选择合适的参考图像，可以实现更具针对性的增强效果，这种方法在需要保持特定灰度分布特征的场景中具有独特优势。

从实际应用角度来看，三种算法各具特点：CLAHE 适合大多数常规图像增强需求，直方图均衡化适用于实时性要求较高的场景，而直方图匹配则在专业图像处理领域更具价值。值得注意的是，算法的选择应当综合考虑图像特性、增强需求和计算资源等因素。本次实验的结果为理解不同直方图增强方法的特性提供了直观认识。