生成噪声文章一: 低照度下更精确的物理模型

来自北理工的硕士生,当年 CVPR 最佳论文展示奖。嗯,感觉确实还行,但也不至于最佳。不过作者确实很强,有扎实的数学基础。BIT 的本硕,之前去过剑桥和微软亚研院访问过,NB。

A Physics-based Noise Formation Model for Extreme Low-light Raw Denoising, CV PR 2020, KaiXuan Wei, BIT

Introduction & Related Works

低照度的摄像不可避免有问题:曝光短则噪声多、长则模糊和拖影发生概率高;其中一个解决方法 flash 也会导致颜色失准并且使用场景严格。

Large aperture incurs small depth of field, and is unavailable in smartphone cameras; long exposure can induce blur due to scene variations or camera motions; flash can cause color aberrations and is useful only for nearby objects.

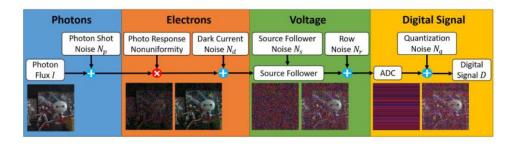
有两种方法:神经网络方法,用神经网络模拟噪声,但是需要训练需要干净的图片和有噪声的图片这个 pair,所以非常耗力耗时。而物理方法则取决于物理模型准不准确。

Such a deep learning approach generally requires a large amount of labelled training data that resembles low-light photographs in the real world

Notwithstanding the promising results, collecting sufficient real data with ground-truth labels to prevent overfitting is exceedingly expensive and time-consuming

模型建立

很常规, 噪声有 shot noise 和 read nosie, 不过下面这张图挺不错的:



1. From Photon to Electrons

这个流程大部分是 shot noise,但是作者也做了说明,这部分还包括了: photo response no nuniformity 和 dark current noise。随着工艺的发展,这两个噪声降低了很多,并且将暗电流的波动放入 read noise 中。如果只考虑 shot noise,结果如下,和以往没有区别:

$$(I+N_p) \sim \mathcal{P}(I)$$

2. From Electrons to Voltage

这一步的噪声取决于: the circuit design and processing technology used。包括了: the rmal noise, reset noise, source follower noise, banding pattern noise。统一用读出噪声表示,其中条带噪声先不管:

$$N_{read} = N_d + N_t + N_s$$

这里就是文章的关键了:以往的方法都是认为是高斯分布,但是统计发现有 long-tailed 现象,作者做了如下解释:

This can be attributed by the flicker and random telegraph signal components of source follower noise [25], or the dark spikes raised by dark current

因此作者没有用高斯分布,而是使用 TL 分布 (Tukey lambda)。而忽略掉的条带噪声,作者则是使用了高斯分布进行模拟。其中条带噪声分为 row 和 vertical,但是作者在实验中发现: vertical 的噪声基本可以没有(就是频率谱中没有横线)。

3. From Voltage to Digital Numbers

这一步就是量化噪声,和以前文献认知相同。

模型标定

需要两种类型的帧: Flat-filed frames 和 Bias frames, 其实就是分别的亮暗帧。

1. 标定 shot noise

在 shot noise 部分,因为有增益,所以最后 $L=K*(I+N_p)$ 。首先需要量化增益 K 应该是多少。作者通过参考文献[32]的方法量化出来,方法是很经典的方法:

不同亮度(曝光时间)下的亮场图,对于每一张图,计算出均值、方差,有均值-方差这个pairs,最后最小二乘法模拟出一条直线即可。

得出 K 之后,如何生成 shot noise? 那就很简单了,直接根据泊松噪声分布生成就可以了。比如干净图中的像素值是 I,那么就生成分布是 P(I)的值,最后乘以一个 K 就好了。

2. 标定非 shot noise

首先对于 Bias 而言,其频率谱如图。没有横线说明没有竖线条带,竖线则说明有 row noise:

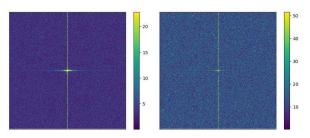


Figure 3: Centralized Fourier spectrum of bias frames captured by SonyA7S2 (*left*) and (*right*) NikonD850 cameras

标定 row noise 很朴素,直接对每一行求平均。作者使用 Shapiro-Wilk 检验,去查看各个 row nosie 是否正态分布,结果是需要考虑的。所以 row noise 还有个标准差,记作 σ_r 。这里的标准针对所有的数据,也就是如果模拟噪声时,每一行的像素各自加上自己对应的 row noise,再加上该标准差的高斯噪声。

此时,剩余的噪声期望是 0,作者比较了高斯分布、之前说的 TL 分布。评价指标是 R 方(PPC C 图),结果显示 TL 更好一点,其中分布的方差记作 σ_{TL} 。结果如下图所示:

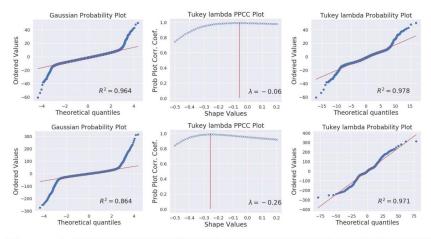


Figure 4: Distribution fitting of read noise for SonyA7S2 (top) and NikonD850 (bottom) cameras. Left: probability plot against the Gaussian distribution; Middle: Tukey lambda PPCC plot that determines the optimal λ (shown in red line); Right: probability plot against the Tukey Lambda distribution. A higher R^2 indicates a better fit. (Best viewed with zoom)

3. 自动化标定

我们得到了一组参数: K, σ_r , σ_{TL} , **这个是对于一个 ISO 而言的,也就是不同的 ISO 这一组参数 不相同。**那干脆每个 ISO 都标定?太麻烦了!

所以使用采样,只对几个 ISO 进行标定,然后建立参数之间的联合分布,然后通过最小二乘法

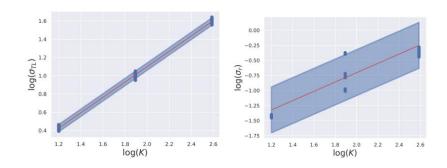
计算得出,假如不是提前设好的 ISO 时,应该是什么参数。

$$\log(K) \sim U\left(\log(\hat{K}_{min}), \log(\hat{K}_{max})\right),$$

$$\log(\sigma_{TL}) | \log(K) \sim \mathcal{N}\left(a_{TL}\log(K) + b_{TL}, \hat{\sigma}_{TL}\right),$$
(7)
$$\log(\sigma_r) | \log(K) \sim \mathcal{N}\left(a_r\log(K) + b_r, \hat{\sigma}_r\right),$$

其中 Kmin 和 Kmax 分别是在最小 ISO 和最大 ISO 得到的值。从第一个式子看出,认为 log(K) 和 ISO 成正比,此时有了一个新的 ISO 时,我们能直接得到 K。上述公式要训练的值是 a、b 和两个尖括号 sigma,这样有 K 之后,就能够得到想要的两个 simga 值。

如下图所示,模拟出的是红线。而上下方的蓝线就是因为高斯分布(两个尖括号 sigma)有一定的误差。



参考文献

首先是论文很可,知乎上有一篇讲解很好(作者 BIT 的学弟),最后是 github 上有代码。

https://www.zhuanlan.zhihu.com/p/356933763