

数字图像复原方法及应用

付诗君

(贵州师范学院, 贵州 贵阳 550025)

【摘要】在图像的采集、传输、存储和处理过程中, 由于设备不完善、处理方法不当, 导致图像质量下降。为了提高图像质量, 利用计算机对退化图像进行恢复和重建的过程称为图像复原。本文有限地介绍了图像退化和图像复原的基本理论, 然后详细阐述了图像复原的分类, 最后通过直接去噪声、逆滤波和维纳滤波实现了图像复原。

【关键词】图像; 退化; 复原; 去噪声; 逆滤波

一、引言

随着计算机、互联网技术日新月异的发展, 图像已经成为人类获取信息、表述信息和传达信息中必不可少的工具^[1]。然而图像在采集、传输、存储及处理的过程中, 由于设备装置的不完善和处理方法的不恰当导致图像质量下降, 这叫图像退化, 图像退化主要有图像模糊、图像噪声及图像欠采样等情况。图像退化过程大致有下面两类:

(1) 空间不变图像退化, 此类退化图像与像素位置无关, 退化原因来自于系统本身的参数。(2) 空间变化图像退化, 对于此类退化, 图像的退化程度会随着像素的位置发生改变, 比较常见的原因有传输介质的不均匀性^[2], 因此图像退化可以分为基于灰度的退化和基于几何失真的退化, 本文讨论的是基于灰度的图像退化。为了提高图像质量, 尽可能恢复退化图像, 首先观察一幅退化图像, 找出图像退化的原因, 分析退化因素, 然后确定图像恢复模型, 最后通过退化模型的逆过程恢复图像。提高图像质量的常用方法有两种: 图像增强和图像恢复。不同的是, 图像增强是为了提高原始图像质量。而图像复原则是在质量下

降的图像中对其进行图像的恢复, 利用消除或减少图像的模糊、图像的噪声等, 尽可能的获得原来真实的图像^[3]。当点扩散函数为零且模型只有噪声因子时, 图像恢复就变成了图像增强, 因此图像增强是图像恢复的一种特殊形式。

二、图像复原方法

在光学成像及传输的过程中所导致的图像退化, 可以利用了解到数学这类的先验知识来建立图像复原模型, 这里的先验知识是假定图像退化由采集和传输中的模糊和噪声所导致的, 即退化过程由模糊(退化函数)项和加性噪声项组成, 得到的一幅输出的退化图像 $g(x, y)$ 是由输入图像 $f(x, y)$ 产生的, 图像复原的过程其实是为了设计一个合适的滤波器, 根据退化图像 $g(x, y)$ 、退化函数 $h(x, y)$ 以及噪声 $n(x, y)$, 通过退化的逆过程估计原始输入图像 $\hat{f}(x, y)$ 。成像过程常常是非线性, 这样求解比较困难, 因此将非线性系统近似为线性系统, 那么空间域给出的退化图像模型: $g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y)$, 其中 $h(x, y)$ 是退化函数, 也叫点扩散函数, 点扩散函数 (PSF) 描述了一个成像系统对于点光源或者是点物体的

响应, 用该指标来衡量重建后的图像的分辨率, 退化图像模型对应的频域形式: $G(x, y) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v)$ 。

(一) 噪声模型

图像在采集、传输和处理过程中经常受到各种噪声的影响和干扰, 会导致图像质量下降, 严重影响后期图像处理。根据图像和噪声是否相关, 噪声信号分为加性噪声和乘性噪声。加性噪声与图像信号无关, 一般在信道传输过程中产生。乘性噪声与图像信号之间存在一定的关系, 而且往往随着图像信号的变化而变化, 一般属于图像采集噪声。在某些情况下, 例如信号变化很小, 噪声并不大。乘性噪声处理近似为加性噪声, 乘性噪声信号和原始图像信号可以相互独立。本文采用统计特征分类将噪声分为随机噪声和周期性噪声。因此为了消除噪声, 提高图像质量, 方便后续图像处理, 必须对图像进行去噪处理。

1. 随机噪声

在图像处理中, 只有周期性噪声与空间坐标有关, 而随机噪声与空间坐标无关, 即像素值与空间中的随机噪声值没有关系。常见的随机噪声有: 高斯、指数、均匀和脉冲, 这些噪声不是确定性信号, 而是随机信号, 不能用确定性函数表示。为了研究随机噪声信号, 通常用概率密度函数表示。

(1) 高斯噪声

高斯噪声的概率密度函数是:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

其中 z 是灰度值。高斯噪声的平均值、标准差、方差分别是 μ 、 σ 、 σ^2 。

(2) 指数噪声

指数噪声的概率密度函数是:

$$p(z) = \begin{cases} ae^{-ax} & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases}$$

其中, $a > 0$ 。指数噪声的平均值、方差分别是:

$$\mu = \frac{1}{a}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{a^2}$$

(3) 均匀噪声

均匀噪声的概率密度函数是:

$$p(z) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq z \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

均匀噪声的平均值、方差分别是:

$$\mu = \frac{a+b}{2}, \quad \sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$$

(4) 脉冲(椒盐)噪声

双极脉冲噪声又被称为椒盐噪声, 其概率密度函数是:

$$p(z) = \begin{cases} P_a & z = a \\ P_b & z = b \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

若 $b > a$, 灰度值 b 在图像上是亮点, 灰度值 a 在图像上是暗点。若 P_a 或 P_b 为零, 则脉冲噪声称为单极脉冲。若 P_a 或 P_b 均不为零, 尤其是近似相等时, 脉冲噪声类似图像的胡椒噪声和盐粉噪声, 因此又名椒盐噪声。

2. 周期噪声

周期噪声是一种依赖空间位置的噪声, 可以通过查看图像的空间周期变化现象规律来识别, 周期噪声来自图像采集过程中的电气或机电干扰, 但主要来自图像采集过程中的电子信息, 周期性噪声不是对原图某一特定区域影响的, 而是对整个空域图像都有影响, 由于周期噪声在空域图像上是周期出现, 在频域上对应的是孤立的频点, 周期噪声通常被建模为二维正弦波, 可以通过频率域滤波显著减少。

（二）退化函数模型

在图像复原实际问题中，我们通常不知道退化函数，根据退化图像的点扩散函数(PSF)是否已知，图像复原算法可以分为图像非盲复原算法和图像盲复原算法两类^[4]。图像非盲复原是在退化函数（点扩散函数）已知的情况下复原图像，图像盲复原是在退化函数完全未知的情况下进行图像复原，因此未知退化函数需要估计退化函数，估计退化函数的方法有观察估计法、实验估计法及模型估计法。

1. 观察估计法

在模糊图像选择一小部分没有噪声或者较少噪声的图像 $g_s(x, y)$ ，以此来构建一幅不退化的图像

$$\hat{f}_s(x, y), \quad H_s(u, v) = \frac{G_s(u, v)}{\hat{F}_s(u, v)}, \quad \text{然后根据}$$

$H_s(u, v)$ 在更大比例上构建相同形状的函数 $H(u, v)$ 。

2. 实验估计法

通过与退化图像相同的设备实验得到退化模型，由于冲激函数的傅里叶变换是一个常数，假

设为常量 A ，因此 $H(u, v) = \frac{G(u, v)}{A}$ 。

3. 模型估计法

（1）大气湍流模型

大气湍流模型是由于各种环境因素所导致的，退化函数 $H(u, v) = e^{-k(u^2+v^2)^{5/6}}$ ，其中 k 是一个常量，这个常量与湍流性质相关，一般大气湍流模型适合用高斯低通滤波器对退化图像均匀模糊。

（2）运动模糊模型

运动模糊模型是由于短时间内成像传感器与被摄景物快速拍摄所导致的，是非正常积累的像素，

退化函数 $H(u, v) = \frac{T}{\pi(\mu a + \nu b)} \sin[\pi(\mu a + \nu b)] e^{[-j\pi(\mu a + \nu b)]}$ ， T

为采集时间长度（曝光时间）， a 、 b 分别为垂直、水平方向的运动距离。

（三）复原方法

通过介绍了噪声模型和退化函数模型，本文将复原方法分为三种情况。

1. 仅有噪声影响，没有退化函数情况

如果图像噪声是引起图像质量下降的唯一原因，那么退化模型变成： $g(x, y) = h(x, y) + n(x, y)$ ，对应的频域形式： $G(x, y) = H(u, v) + F(u, v)$ ，如果是加性噪声，那么选择空域处理，如果是周期噪声，那么选择频域处理。

（1）随机噪声

随机噪声参数估计是为了知道噪声是属于什么概率分布，主要是为了获取噪声概率分布的概率密度函数参数，一般来说可以通过图像拍摄设备传感器的技术文档说明来获取噪声的概率密度函数参数，但是有些设备是没有技术文档说明的，那么需要对这些噪声参数进行估计，通常截取一小块退化图像中恒定灰度值的部分，这部分图像的灰度值变化不大，来进行直方图统计，通过直方图可以看出属于什么类型分布，确定噪声的种类，然后计算概率密度函数参数求解所需的一系列参数，其中，均匀分布可以用平均值和方差来解出参数，椒盐噪声可以不用计算平均值及方差，直接统计概率即可，知道了相应类型的噪声，可以采用合适的滤波器对噪声滤波。

空间滤波器适用于只有加性噪声的恢复，主要有两大类：均值滤波器和顺序统计滤波器。常见的算术平均、几何平均、谐波平均和逆谐波平均等滤波器属于均值滤波器，算术平均滤波器和几何平均滤波器擅长处理高斯噪声或均匀噪声，谐波平均滤波器擅长处理带有脉冲（“椒盐”）噪声。此外，中值、最大 / 最小值和中点过滤器是顺序

统计过滤器。中值滤波器比均值滤波器产生更少的模糊，适用于处理单极或双极脉冲噪声。最大值滤波器可以找到图像中的最白点，可以有效消除“胡椒”噪声（“胡椒”噪声是一个很低的值），最小值滤波器可以找到图像中的最黑点，可以有效消除“盐粉”声。（“盐粉”噪声是一个非常高的值）。由于结合了顺序统计和平均，中点滤波器擅长处理高斯和均匀噪声类型。

（2）周期噪声

周期噪声通常用正弦或余弦函数表示，通过检测图像的傅里叶谱可以估计出周期噪声参数，在谱中表现为一个峰值；另一种方法是从退化图像中识别噪声周期。因此，空间图像的周期噪声具有周期性出现的特点。为了去除周期噪声，可以使用傅里叶变换在频域空间中进行操作。可以看出，空间域中的图像周期噪声对应于频域中以脉冲形式出现的孤立点，并使用相应的滤波器对其进行过滤和消除。周期噪声可以通过特殊的带阻、带通和陷波滤波器来降低。带阻滤波器可以消除频域噪声分量的大致位置已知的噪声，带通滤波器也需要知道图像信号的频带，但带阻滤波器执行的操作正好相反，而且这类滤波器也是针对频点较多的情况。但陷波滤波器针对的是频率点较少的情况，用于通过或阻断预定中心频率范围内的频率，包括陷波带阻和陷波带通。

2. 存在退化函数，知道退化模型情况

对于退化图像，存在退化函数且已知退化函数模型的图像复原都是在频域下进行的，这属于非盲复原。当然这也分为了两种情况，一种是没有或者较小的加性噪声，这种滤波的方法称为逆滤波，退化模型可以简化为： $G(x,y)=H(u,v)F(u,v)$ ，这属于无约束复原，逆滤波只能处理无噪声或者较小噪声的图像，如果噪声太大，那么经过逆滤

波器恢复的图像也是噪声图像。另外一种是非维纳滤波，这是退化函数和噪声都存在情况下，采用维纳滤波，这种方法属于有约束复原，通常情况下，退化函数信号和噪声信号都是随机函数，而维纳滤波的目标是找到一个最优的滤波器，使得复原后的图像和原图像之间的差值最小^[5]。一般来说，当没有噪点或只有少量噪点时，适合使用逆滤波来恢复图像，以获得较好的效果。当噪声较大时，不适合逆滤波，需要维纳滤波来降低噪声。

3. 存在退化函数，但是难以确定模型情况

通常图像复原方法都是在退化函数已知的情况下进行，但是在实际工作中，拿到一幅退化图像，知道需要退化函数来复原，但是不知道退化函数具体模型，利用估计图像退化函数模型来复原的方法称为盲复原方法，图像盲复原是图像处理领域研究的热点问题^[6]。为了估计退化函数，之前已经描述了估计函数的方法，常用的退化函数估计方法有观察估计法、实验估计法及模型估计法，一般情况下是用模型估计法来估计退化函数，应用最广泛的模型是大气湍流模型和运动模糊模型。

三、图像复原应用

本文将在图像中加入随机噪声、周期噪声和运动模糊加噪声，然后对这三种情况进行图像恢复。

（一）随机噪声

1. 高斯噪声

对图像添加高斯噪声，分别用算术平均、几何平均、谐波平均及逆谐波平均滤波器来恢复图像，可以看出对于高斯噪声图像，采用均值滤波器能够恢复结果，尤其是几何平均滤波器效果更好，但是逆谐波滤波平均处理效果不是很好，图3.1所示。

2. 脉冲噪声

对图像添加脉冲（椒盐）噪声，分别用均值滤波器、中值滤波器及二次中值滤波器，可以看出



图 3.1



图 3.2

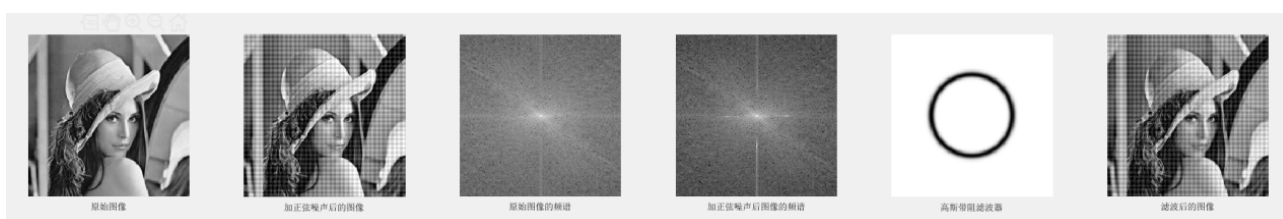


图 3.3 width=5

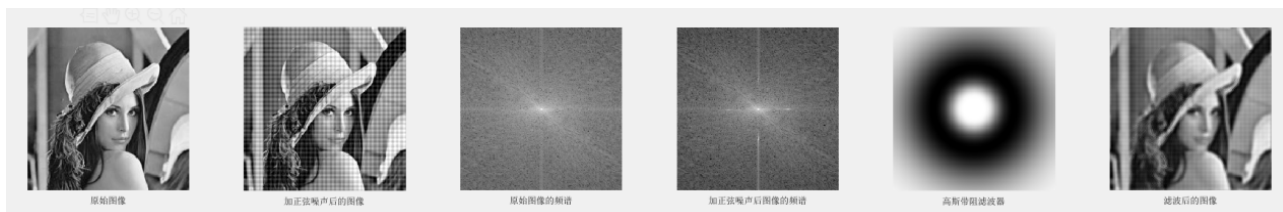


图 3.4 width=50

均值滤波器的处理效果不是很好，但是中值滤波器的效果很好，尤其是二次中值滤波器效果比一次中值滤波器更好，图 3.2 所示。

(二) 周期噪声

给图像添加正弦周期噪声，通过不同的模板对复原后的图像进行分析。图 3.3 中的模板 width=5，图 3.4 中的模板 width=50，图 3.5 中的模板 width=100。从三幅图像来看，使用高斯带阻滤波器可以消除噪声，在图 3.3 中模板 width=5，小模板是不能取得很好的复原效果；

图 3.4 中模板 width=50，能够取得较好的复原效果，但仍然存在周期性噪声；图 3.5 中模板 width=100，能够取得很好的复原效果，没有周期噪声，但是模板过大，滤波后的图像会过度平滑，会造成图像更加模糊，因此不可取。

(三) 运动模糊加噪声

图像经过运动模糊退化和噪声处理，采用逆滤波和维纳滤波两种形式（具有信噪比和自相关函数）对图像进行复原。对比下图中的三种还原结果：逆滤波是完全无法复原的，经过逆滤波器复原后

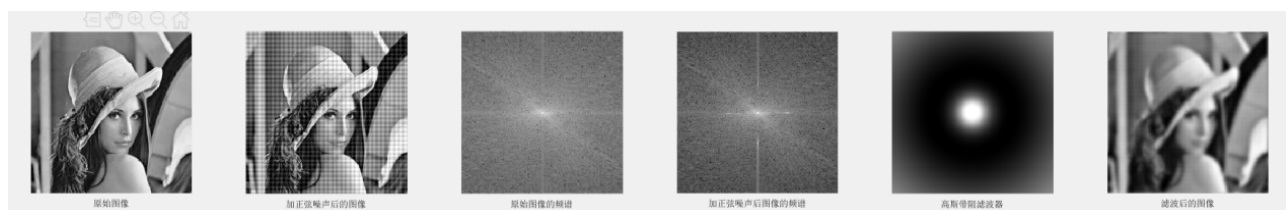


图 3.5 width=100

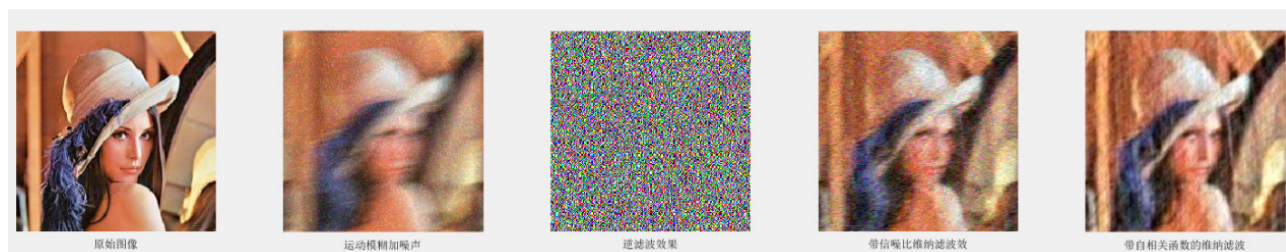


图 3.6

也是噪声；具有信噪比的维纳滤波器可以复原图像，具有自相关函数的维纳滤波器的复原效果优于具有信噪比的维纳滤波器，下图 3.6 所示。

四、论文小结

本文介绍了图像退化和图像复原的基本理论，并对图像复原方法进行了详细分类，讨论了噪声模型的估计、退化函数模型的估计以及三种类型的复原方法。复原方式分为：一是只有噪声的影响，没有退化函数；二是存在退化函数，退化函数模型已知；三是存在退化函数，但退化函数模型难以确定。前两个类别是非盲恢复图像。本文应用了非盲恢复图像的示例，包括随机噪声、周期性噪声和运动模糊加噪声。但是对于有退化函数的情况，很难确定模型的情况，即图像盲复原，本文只是基本介绍，没有应用实现，未来需要加强对图像盲复原的研究与实现。

参考文献：

[1] 李韦. 基于统计先验的图像恢复及其深度学习算法 [D]. 南京邮电大学, 2021.

[2] 贾格. 图像实时复原的研究与应用 [D]. 中国科学院大学, 2016.

[3] 张薇, 于硕. 数字图像处理综述 [J]. 通讯世界, 2015:16-17.

[4] 高海韬, 李丹宁, 王彬, 等. 运动模糊图像 PSF 参数估计方法改进及图像复原 [J]. 计算机工程, 2021:21-23.

[5] 王允森, 王勇, 左晨, 等. 基于维纳滤波和综合评价因子的遥感图像复原 [J]. 空间电子技术, 2021(3):45-46.

[6] 王曼威. 基于先验约束的遥感图像盲复原算法研究 [D]. 黑龙江大学, 2021.

基金项目：2018 年贵州师范学院一流教学管理团队项目“电子信息类专业实践教学管理团队”研究成果，项目编号：2019 (35) 号

作者简介：付诗君 (1989-)，男，土家族，贵州省贵阳人，硕士研究生，从事大学电子类专业教学与研究，现就职于贵州师范学院。