基于模糊非线性回归算法的图像复原

刘书君，张新征，刘 颖
（重庆大学，重庆 400044）

摘要：为了利用多幅具有相似降质特性的退化图像信息恢复出原图像，提出了一种新的基于模糊参量非线性回归估计的图像盲复原算法。该算法充分利用多幅图像具有的相似降质特征，首先给出一种非理想光照分布参数的模糊非线性回归估计方法，然后通过估计出的参数得到与原图同样大小的非理想光照分布图，最后通过观测图像与非理想光照分布图相消的方法，对退化图像进行复原。实验结果表明，该算法运算快速，对边缘细节及平滑区域均有良好的修复能力，在修复效果上明显优于一般图像修复算法。

关键词：图像复原；光照校正；模糊非线性回归
中图分类号：TS801.3；TS807　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-3563(2013)05-0095-03

Image Restoration Based on Fuzzy Nonlinear Regression Algorithm

LIU Shu-jun, *ZHANG Xin-zheng*, *LIU Ying*
(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to restore image by using the multiframe degraded images of the similar degraded characters, a novel fuzzy parameter nonlinear regression algorithm for blind restoration was presented. The advantage of the similar degraded characters of multiframe images was fully taken. Firstly, the fuzzy value of illumination parameters was estimated through fuzzy nonlinear regression method. Then the nonideal distribution of illumination image was estimated by the parameter gained before. Finally, the degraded image was restored by the contraction between the observed image and the nonideal distribution of illumination image. Results of experiments demonstrated that this method works efficiently; it has better ability in restoring both smooth area and edge-contained area. Compared with others, this method in the repair effect is superior to the general image restoration algorithm.

Key words: image restoration, illumination correction, fuzzy nonlinear regression

图像降质问题存在于许多应用领域中，尤其在光学成像中，一方面光源对目标的照射不均，引起成像结果的明暗差别；另一方面图像的生成和传输过程中的噪声也会对图像质量产生严重影响[1]。如何实现噪声环境下光照不均匀校正，从所得到的退化图像中去除退化因子使其恢复为原始图像，便成为研究的重点。比较有代表性的光照校正方法有双立方插值法[2-4]、同态滤波法[5]和 top-hat 变换法[6-7]等。双立方插值方法将图像的光照模型处理为加法形式，用双立方曲面模型对光照分布作回归估计，通过原始图像减去估计光照来实现图像复原。这种方法对多数图像的复原处理行之有效，但双立方插值的计算量较大，因此不被广泛采用；同态滤波法将图像的光照模型处理为乘法形式，通过对光照模型作对数变换，再对图像作高通滤波来实现图像复原，对于许多光照分布不能满足乘法模型的成像结果，这种方法的复原效果不理想；top-hat 变换法利用了形态学的原理，通过 top-hat 变换来估计光照分布模型，不仅计算量较大，不利于实时处理，而且在背景提取时容易受到噪声干扰，有效性降低。

由于不同目标在成像过程中均处于相同的光照条件下，因此所有图像均具有相似的降质特征，为充

收稿日期：2012-09-07
基金项目：重庆市自然科学基金(cstc2012jjA40001)
作者简介：刘书君(1981-)，女，重庆人，重庆大学讲师，主要研究方向为图像处理及目标检测等。
通讯作者：张新征(1978-)，重庆大学副教授、硕士生导师，主要研究方向遥感信息获取、图像处理及目标特征分析。

分利用这些相似的降质特征信息，笔者提出了一种基于模糊非线性回归的光照分布参数估计算法，通过有效利用光照误差的结构信息，实现了光照整体校正，对边缘细节及平滑区域均有良好的修复能力，在修复时间和修复效果上明显优于一般图像修复算法，尤其是对相干成像中的退化图像进行复原有很好的效果。

1 基于模糊非线性的光照分布估计算法

1.1 模糊非线性回归的基本原理[8]

在经典的回归分析中给定以下模型：

$$y=f(x,\theta)+\varepsilon \tag{1}$$

其中：θ 为 k 维未知参数，模型函数 $f(x,\theta)$ 是 θ 的非线性函数，x,y,ε 均为 n 维向量，随机误差 ε 服从 $N(0,\sigma^2 I)$ 分布。$x\in R^m$ 为实值输入，参变量 θ 和因变量 y 都取模糊值。由于 $f(x,\theta)$ 的函数形式未知，因此该非线性回归问题就为非参数问题[9]。假设 n 次观测结果中实变量 $x_i(i=1,2,\cdots m)$ 和模糊变量 y 的取值分别为：

$$\begin{aligned} &x_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots n)\\ &y_{jp} \quad (j=1,2,\cdots,n;p=1,2,\cdots,g(n)) \end{aligned} \tag{2}$$

其中：下标 j 表示观测次数；$g(n)$ 表示在每次观测中模糊值 y 的维数。对于每一个 $j=(j=1,2,\cdots n)$（第 j 个观测结果），有 $F_j=\{f(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj};\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_k)\}$ 构成一个母体。由于经典非线性回归函数是连续可微的，假设函数 $f(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj};\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_k)$ 对于参数和自变量是连续可微的，则 $y=f(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj};\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_k)$ 可被看作 $[F(R)]^k$ 到 $F(R)$ 的映射。如果假设 $\theta_j=\theta_\mu(a_i,b_i)(i=1,2,\cdots,k)$，则模糊变量 y 在第 j 次的观测结果 $y_{j1},y_{j2},\cdots,y_{jg(j)}$ 即为 $F_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的第 j 次观测结果母体 F_j。根据最大-最小 μ/E 估计[10]，对于多元母体参数，可得：

$$F(a_1,b_1,a_2,b_2,\cdots,a_k,b_k)=\wedge\wedge[f(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj};\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_k)(y_{ji})/E_j] \tag{3}$$

其中 $E_j=\int f(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj};\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_k(t)\mathrm{d}t$ 是母体 F_j 的熵，如果存在 $\theta=(a_1,b_1,a_2,b_2,\cdots,a_k,b_k)$ 使得：

$$F(a_1,b_1,a_2,b_2,\cdots,a_k,b_k)=\max_{a_i\in R,b_i\geqslant 0,j=1,2,\cdots k} F(a_1,b_1,a_2,b_2,\cdots,a_k,b_k) \tag{4}$$

则 $\hat{\theta}_i=\theta_\mu(a_i,b_i)(i=1,2,\cdots,k)$ 被称作对于模糊参数 $\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_k$ 的最大-最小 μ/E 估计值。

1.2 光照分布估计算法

在实际光照分布估计问题中，输出图像的观测值取模糊值，相应的参数估计也为模糊值，正好符合模糊非线性回归模型。将观测图像集中的每幅图像按照同一光照方向分块，分块方式可以灵活处理。采用等间隔分块，光照整体分布的模糊回归模型就由多个子块对应的子模型组合而成，体现了光照系统对所有图像引入的相似降质特征，则光照分布的模糊模型可以改写为：

$$y=f(x_1,x_2,\cdots,x_m,\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_p)+\varepsilon \tag{5}$$

其中：$x\in R^m$ 为实值输入；y 为模糊值输出；θ 为待估计的模糊参数。对所获得的图像观测集，在设定参数阀值后就可得到经聚类后的光照分布矩阵：

$$F=\{\mu(x,\theta)\mid\in\Theta\subset p^p\}\theta\in\Theta \tag{6}$$

式中：$\mu(x,\theta)$ 表示 θ 的隶属度，$\Theta\subset k^k$ 表示 k 维聚类空间。利用每幅观测图像对应子块中像素的灰度值计算本子块光照分布参数的隶属度。将第 j 次观测，第 i 个子块光照参数的隶属度作为输入值的发生概率 $\mu(x_{ij},\theta)$，计算出 $x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj}$ 的同步概率 $\wedge\mu(x_{ij},\theta)$，同时根据 x_{ij} 发生概率计算光照分布矩阵的熵 $E(\theta)$，代入式(4)即可求出光照分布函数参数的模糊估计值 $\hat{\theta}$。

2 基于光照校正的图像复原

从传统的图像复原技术来看，复原质量在很大程度上取决于研究者构造退化模型的精确性，而在很多实际应用中，退化信息是模糊的，无法获得精确的退化模型。基于观测图像间的相似退化特征对非理性光照分布参数进行估计。

当非理想光照引起图像退化后，真实图像和观测图像间的关系：

$$I_o=I_r+I_u \tag{7}$$

其中：I_r 为真实图像；I_u 为非理想光照图像；I_o 为观测到的图像。通常情况下需要成像的目标内容是变化的，而成像系统的光照分布却相对不变，真实图像的变化信息相对于叠加其上的相似光照特征来说可视为噪声。由式(5)可以看出，光照分布校正的问题相当于模糊非线性回归问题。具体的图像复原处理可以归结为以下步骤：

1）将观测图像集中的每幅图像按照同一光照方向等间隔分块，利用每幅观测图像相应子块中像素的灰度值计算本子块光照分布参数的隶属度。

2）将每个子块 x_i 光照分布参数的隶属度作为输入值的发生概率 $\mu(x_i,\theta)$，计算出 $x_1,x_2,\cdots,x_m$ 的同步发生概率 $\wedge\mu(x_i,\theta)$，同时根据 x_i 发生概率计算光照分布矩阵的熵 $E(\theta)$，由式(4)可以求得光照分布函数参数的模糊估计值 $\hat{\theta}$。

3）选取观测图像集，将光照分布参数的模糊估计值 $\hat{\theta}$ 代入式(5)，得到与原图同样大小的非理想光照分布图 I_u。

4）根据式(7)，从观测图像中减去非理想光照分布图，得到真实图像。

3　实验结果与分析

实验在光学成像过程中采用相干光照明，对上述方法进行试验。在光学成像系统中采集到的 3 幅图像，作为试验的观测图像集，见图 1。对比这 3 幅图像



图 1　观测图像集

Fig. 1 A set of observed images

可以看到，每幅图像都具有相似的干涉条纹，干涉条纹出现的位置和干涉程度接近，可以初步判断这些条纹代表了观测图像集的相似降质特征，也就是系统非理想光照分布造成的影响。为方便对比，先采用双立方插值方法对观测图像进行处理，以消除不均匀光照的影响，其结果见图 2。按提出的模糊非线性回归方法，先将观测图像集平均划分成 30×30 的子块，计算出每一子块的光照分布参数隶属度，进而估计出光照分布参数 $\hat{\theta}$，再进行计算处理，处理的结果见图 3。

通过比较可以看到，本方法可以很好地消除非理想光照分布引入的干涉条纹，复原了退化后的大部分图像信息。针对复原前后的图像，采用最小均方误差 MSE 和信噪比增量 DSNR 作为衡量指标进行对比，双立方插值法复原后 DSNR 和 MSE 分别为 6.4208 和



图 2　双立方插值法复原结果

Fig. 2 Restored results by bicubic interpolation



图 3　改进方法复原结果

Fig. 3 Restored results by our technique

15.8214，用文中方法复原后 DSNR 和 MSE 分别为 8.2384和 13.1956，可以看出本方法比双立方插值法的复原效果更好。

4　结论

利用模糊非线性回归算法对光照分布参数进行估计，将其与光照误差的结构信息相结合，并提出光照整体校正的思路，为整个退化区域的修复与图像复原提供了一种有效的方法。实验结果表明：本方法相对于双立方插值法，得到了更好的复原结果，最小均方误差减少了 2.6258，信噪比提高了 1.8176。从计算量上看，本方法也比双立方插值方法小得多，提高了算法性能。无论是空间图像、航拍图像、水下或医学图像，还是一般的摄影图像，只要存在相似降质特征，都可以采用本方法进行图像复原。

参考文献：

[1] 高军，陶娜娜，卢秉恒. 基于小波变换的图像边缘检测算法的研究[J]. 包装工程，2007，28(11)：70-72.
GAO Jun，TAO Na-na，LU Bing-heng. Research on Image Edge Detection Algorithm Based on Wavelet Transformation [J]. Packaging Engineering，2007，28(11)：70-72.

[2] RUDIN L I，OSHER S，FATEMI E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms[J]. Physical (S0167-2789)，1992，60(1/4)：259-268.

(下转第 102 页)

一些,说明 2 款相机对于暖色调处的图像再现比较好,而冷色调色域较小,比如蓝色、绿色区域。

3 结论

对 2 台 1000 万像素的数码相机的颜色复制特性通过主客观相结合的方法做出了评价。数码相机 A 拍摄户外风景最优,其次是人物,最后是室内风景。数码相机 B 拍摄人物最优,其次是室内风景,最后是室外环境。拍摄室内环境和人物照片,数码相机 B 性能优于数码相机 A,拍摄户外照片中数码相机 A 却要略高一筹。从数码相机的相机色差和色域比较,数码相机 A 的色域比数码相机 B 小,但色差要比数码相机 B 小,综合评价而言,相机 A 对颜色的复制更准确。进行色彩管理图像的色差要小于未进行色彩管理图像的色差,说明做过色彩管理的图像要比没有做过色彩管理的图像对于颜色还原要好。实际的工作生活中希望用数码相机得到更符合实际景物的颜色的图像,制作数码相机的特性文件是很有必要的[4]。

实验还有一些不足之处,首先在拍摄过程中受到曝光条件的影响,在拍摄色靶的过程中存在曝光的不均匀现象。另外实验条件有一定影响,使得制作 ICC profile 的环境达不到 ProfileMaker 5.0 软件设计的要求[5]。

基本给出了 2 种相机不同拍摄条件下对不同原稿的再现结果,2 款相机在风景、人物、色差、色域上有差别的方法,具有普遍参考和使用意义。其中数码相机现的颜色复制性能评价体系的形成,可根据后期研究情况,通过测试相机品牌的不断扩大,给其他类型的相机评价提供了一个参考的平台,为今后数码相机的评价提供了可靠的使用方法和相关数据。

参考文献:

[1] 吴丽. 基于数码相机色彩管理的研究[J]. 包装工程, 2008,29(7):80-82.
WU Li. Research on Color Management of Digital Camera [J]. Packaging Engineering,2008,29(7):80-82.

[2] POINTER M R, ATTRIDGE G G, JACOBSON R E. Application of a Color Reproduction Index to Digital Camera Characterization[R]. UK: The Imaging Technology Research Group, University of Westminster, Harrow.

[3] 杨阳,陈琛. 基于神经网络的数码相机颜色空间转换方法研究[J]. 中国印刷与包装研究,2011,5(3):40-45.
YANG Yang, CHEN Chen. Digital Camera Color Space Conversion Based on Neural Networks, China Print and Packaging Study,2011,5(3):40-45.

[4] 何颂华,王利婕,陈琪莎. 基于数码相机特性文件的色彩校正和色彩管理研究[J]. 包装工程,2005,26(5):78-81.
HE Song-hua, WANG Li-jie, CHEN Qi-sha. Study of Color Correction and Management Based on Color Profile of Digital Camera[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 78-81.

[5] 邓倩,王娜. 基于 CIECAM02 色貌模型的数码相机色彩管理[J]. 包装工程,2012,33(5):115-118.
DENG Qian, WANG Na. Color Management of Digital Camera Based on CIECAM02 Color Appearance Model[J]. Packaging Engineering,2012,33(5):115-118.

(上接第 97 页)

[3] WELK Martin, THEIS David, WEICKERT Joachim. Variational Deblurring of Images with Uncertain and Spatially Variant Blurs [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005,3663:485-492.

[4] BAR L, SOCHEN N A, KIRYATI N. Restoration of Images with Piecewise Space-variant Blur[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag,2007,4485:533-544.

[5] COSTELLO Thomas P, MIKHAEL Wasfy B. Efficient Restoration of Space-variant Blurs from Physical Optics by Sectioning with Modified Wiener Filtering[J]. Digital Signal Processing,2003,13(1):1-22.

[6] JACKWAY P T. Improved Morphological Top-Hat[J]. IEEE Electronics Letters,2000,36(14):1194-1195.

[7] SAMARAS D, METAXAS D. Incorporating Illumination Constraints in Deformable Models for Shape from Shading and Light Direction Estimation[J]. IEEE Trans Pattem Analysis and Machine Intelligence,2003,25(2):247-264.

[8] SHI Ben-guang, CHEN Shou-xin. Nonlinear Regression Fuzzy Analysis of Real Variable and Fuzzy Parameter[J]. Chinese Quarterly Journal of Mathematics,2002,17(1):71-76.

[9] CHAN K Y, DILION T S, LING S H, et al. Manufacturing Modeling Using an Evolutionary Fuzzy Regression [C]. Fuzzy Systems,2011,2261-2267.

[10] HAO Pei-yi, CHIANG Jung-Hsien. Fuzzy Regression Analysis by Support Vector Learning Approach [J]. Fuzzy Systems,2008,16(2):428-441.