第 11 卷 第 6 期
2003 年 12 月

光学 精密工程
Optics and Precision Engineering

Vol. 11 No. 6
Dec. 2003

文章编号 1004-924X(2003)06-0621-05

一种像场弯曲的图像复原方法

朱 俊,文玉梅,李 平
(重庆大学 光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:提出了一种用于像场弯曲图像的复原方法,分析了该方法的原理。将光学成像系统传递函数的逆函数按泰勒级数展开,它与获得图像的傅氏变换的乘积就是复原图像的傅氏变换,再经过反傅氏变换则可以最终用获得图像与其各阶导数的线性组合近似表示复原图像。将该方法应用于镜头存在场曲的数码相机照片的修正,大量实验结果表明,修正后照片清晰度基本上均匀一致。

关 键 词:场曲;移变系统;图像复原
中图分类号:O438 **文献标识码**:A

Restoration of field-curved images

ZHU Jun, WEN Yu-mei, LI Ping

(College of Optoelectronic Engineering, The Key Lab of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A restoration scheme is proposed for space-variant image degradation resulting from curvature of field in imaging systems. Providing that the inverse transfer function of an imaging system is represented as the Taylor polynomial series, due to the fact that the product of the inverse transfer function and a degraded image is the Fourier transform of the corresponding restored image, and consequently, the image is restored by computing the linear combination of the original image and its derivative images. The actual restoration results demonstrate that the restoration scheme makes the definition of a space-variant degraded photo roughly uniform in the entire image region.

Key words: curvature of field; space-variant system; image restoration

1 引 言

场曲(像场弯曲)是光学系统常见的像差之一,当光学系统存在严重场曲时,就不能使物体在平面上完全清晰成像,若中心调焦清晰,边缘就变得模糊,反之,边缘清晰则中心变模糊[1]。常见的模糊图像复原方法大多基于逆滤波原理:对于移不变(space-invariant)系统,图像的退化过程可以描述为输入信号与光学系统点扩散函数的卷积,退化图像的傅氏变换即为输入信号的傅氏变换与系统传递函数的乘积。若已知退化图像的傅氏变换和系统传递函数则可以求出复原图像的傅氏变换,再经过反傅氏变换得到复原图像的空域信号。存在场曲的光学系统是一个典型的移变(space-variant)系统,系统点扩散函数还是物平面坐标的函数,因此基于逆滤波的方法很难直接应用于移变模糊图像的复原。若考虑将图像分割成若干区

收稿日期:2003-04-13;**修订日期**:2003-10-14.

域,认为每个局部区域的系统传递函数是不变的,那么在各个局部区域的边界又将产生难以消除的寄生波纹[2]。Sawchuk 等人曾提出针对移变模糊的坐标变换复原(coordinate-transformation restoration,CTR)技术,将移变模糊分解为几何畸变和均匀模糊,然后再进行逆滤波处理[3],但该方法计算复杂,并且会改变图像噪声分布,常常使平稳的噪声变得非平稳。

根据光学成像系统的传递函数,可以确定其逆函数即逆滤波函数,若将逆滤波函数按 n 阶泰勒级数展开,复原图像就是获得图像的傅氏变换和逆滤波函数乘积的反傅氏变换,于是复原图像可以近似表示为获得图像与其 n 阶导数的线性组合,组合系数由逆滤波函数的参数确定。复原过程的所有运算均在空间域进行,场曲系统的点扩散函数是随空间连续变化的,可以在复原运算过程中令复原参数随空间坐标连续变化,从而实现类似场曲这样的移变模糊复原,以下详细讨论该方法的原理及其实现。

2 系统逆传递函数多项式近似图像复原原理

设 $f(x,y)$ 为原始不失真图像,$g(x,y)$ 为降质的模糊图像,$F(\omega_u,\omega_v)$ 和 $G(\omega_u,\omega_v)$ 是他们的傅氏变换,那么光学系统的退化模型可以描述为

$$g(x_1,y_1) = \iint_{\Omega} h(x_1,y_1;x_2,y_2)\, f(x_2,y_2)\,\mathrm{d}x_2\mathrm{d}y_2, \quad (1)$$

式中,$h(x_1,y_1;x_2,y_2)$ 是移变点扩散函数,(x_1,y_1) 和 (x_2,y_2) 分别是像平面和物平面的二维坐标,Ω 是图像支持域。对于移不变系统,式(1)中的积分关系成为卷积:

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y), \quad (2)$$

将式(2)作傅氏变换,得到

$$G(\omega_u,\omega_v) = H(\omega_u,\omega_v)\cdot F(\omega_u,\omega_v), \quad (3)$$

决定系统点扩散函数的因素比较多,常见的散焦模糊图像,系统的点扩散函数可以描述为一个圆盘函数,但对于大多数的光学成像系统,众多因素综合的结果通常使点扩散函数趋于 Gauss 型[4]。二维高斯函数可以表示为

$$h(x,y) = K\exp[-a(x^2+y^2)], \quad (4)$$

式中 a 与 Gauss 函数方差 σ^2 的关系为:$a=\frac{1}{2\sigma^2}$,K 是归一化系数,且 $K=\frac{a}{\pi}$。Gauss 函数的傅氏变换仍然是一个 Gauss 函数,所以系统传递函数

$$H(\omega_n,\omega_v) = \exp[-\frac{1}{4a}(\omega_u^2+\omega_v^2)], \quad (5)$$

系统逆传递函数 $H_1(\omega_u,\omega_v)$ 应满足 $H\cdot H_1=1$,所以

$$H_1(\omega_u,\omega_v) = \exp[\frac{1}{4a}(\omega_u^2+\omega_v^2)], \quad (6)$$

因为

$$F(\omega_u,\omega_v) = F(\omega_u,\omega_v)\times H(\omega_u,\omega_v)\times H_1(\omega_u,\omega_v), \quad (7)$$

根据式(3),可得

$$F(\omega_u,\omega_v) = G(\omega_u,\omega_v)\times H_1(\omega_u,\omega_v), \quad (8)$$

若 $H_1(\omega_u,\omega_v)$ 在图像频率支持域 n 阶偏导数存在,则可将 $H_1(\omega_u,\omega_v)$ 在点(0,0)处进行 n 阶二维泰勒展开:

$$H_1(\omega_u,\omega_v) = H_1(0,0) + (\omega_u\frac{\partial}{\partial\omega_u}+\omega_v\frac{\partial}{\partial\omega_v})H_1(0,0) + \frac{1}{2!}(\omega_u\frac{\partial}{\partial\omega_u}+\omega_v\frac{\partial}{\partial\omega_v})^2H_1(0,0) + \cdots + \frac{1}{n!}(\omega_u\frac{\partial}{\partial\omega_u}+\omega_v\frac{\partial}{\partial\omega_v})^nH_1(0,0) + R_n, \quad (9)$$

其中余项

$$R_n = \frac{1}{(n+1)!}(\omega_u\frac{\partial}{\partial\omega_u}+\omega_v\frac{\partial}{\partial\omega_v})^{n+1}\times H_1(\theta\omega_u,\theta\omega_v) \quad 0<\theta<1, \quad (10)$$

将式(6)代入式(9),由于二维 Gauss 函数在(0,0)点奇次阶偏导数为 0,所以得到

$$H_1(\omega_u,\omega_v) = 1+\frac{1}{4a}(\omega_u^2+\omega_v^2) + \frac{1}{32a^2}(\omega_u^2+\omega_v^2)^2+\frac{1}{384a^3}(\omega_u^2+\omega_v^2)^3+\cdots, \quad (11)$$

再将式(11)代入式(8)得到

$$F(\omega_u,\omega_v) = G(\omega_u,\omega_v)+\frac{1}{4a}(\omega_u^2+\omega_v^2)\times G(\omega_u,\omega_v)+\frac{1}{32a^2}(\omega_u^2+\omega_v^2)^2\times G(\omega_u,\omega_v)+\frac{1}{384a^3}(\omega_u^2+\omega_v^2)^3\times G(\omega_u,\omega_v)+\cdots, \quad (12)$$

将式(12)作反傅氏变换,可以得到

$$f(x,y) = g(x,y) - \frac{1}{4a}\nabla^2 g(x,y) + \frac{1}{32a^2}\nabla^2[\nabla^2 g(x,y)] - \frac{1}{384a^3}\nabla^2\{\nabla^2[\nabla^2 g(x,y)]\} + \cdots, \quad (13)$$

其中 Laplace 算子 ∇^2 定义为: $\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$。

根据式(13),复原图像 $f(x,y)$ 可以表示为模糊图像 $g(x,y)$ 及其 n 阶 Laplace 算子的线性组合。若舍去 H_1 中的 n 阶余项,则可得到近似复原图像,可以证明,用 2 阶近似,复原后的系统频率带宽是原带宽的 1.7～1.9 倍,4 阶近似复原是原带宽的 2.3～2.5 倍,而 6 阶近似复原却只提高到原带宽的 2.5～2.7 倍。因此可以取 4 阶近似作为复原图像信号:

$$\tilde{f}(x,y) = g(x,y) - \frac{1}{4a}\nabla^2 g(x,y) + \frac{1}{32a^2}\nabla^2[\nabla^2 g(x,y)], \quad (14)$$

3　场曲复原及其仿真实验

式(14)是基于移不变模糊复原得到的,但他对于移变模糊复原同样适用。由于场曲图像的模糊程度是从图像中心到边缘连续变化的,可以认

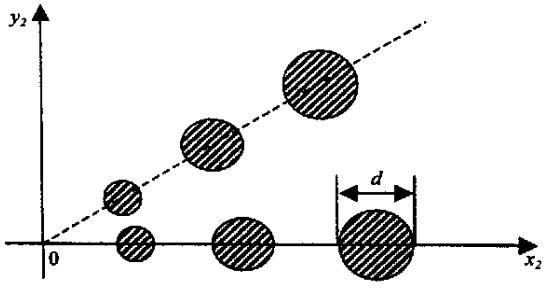
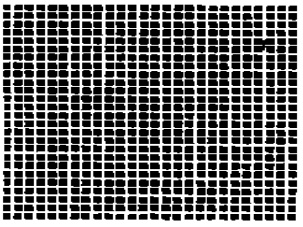


图 1　场曲的移变点扩散函数

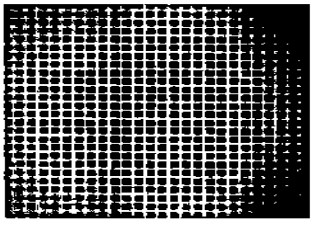
Fig. 1　SVPSF of the curvature of field

为在图像每一足够小的局部区域内,系统点扩散函数是参数不变的 Gauss 型,Gauss 函数的参数随物平面坐标连续变化,即扩散半径是物平面坐标的连续函数,如图 1 所示。由于复原运算完全在空间域进行,在利用式(14)进行复原运算的过程中,可以对获得图像每一个像素点根据其空间位置取相应的复原参数 a,从而达到移变复原的目的。



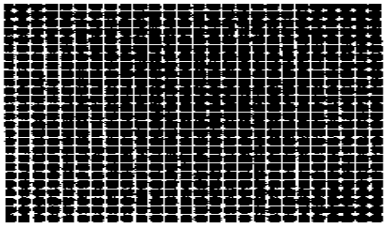
(a) 原始标准图像

(a) Original standard image



(b) 场曲退化图像

(b) Blurred image



(c) 复原图像

(c) Restored image

图 2　场曲复原仿真

Fig. 2　Simulated restoration of the curvature of field

降质系统的退化模型通常可以通过直接测量和间接估计来获取[5-6]。设图像中心点为原点,任一像素到中心点的距离为 r,认为场曲图像的参数 a 仅仅是 r 的函数,a 与 r 的具体关系可以通过实验估计,一种典型的关系为:

$$d \propto r^{2[7]}, \quad (15)$$

d 是图 1 中所示的模糊直径,定义为 Gauss 函数标准差 σ 的 6 倍,根据 σ 与 a 的关系,有

$$d = 6\sigma = \frac{6}{\sqrt{2a}}, \quad (16)$$

令

$$\frac{d}{r^2} = \sqrt{\lambda}, \quad (17)$$

将式(16)代入,得到

$$a = \frac{18}{\lambda r^4} \quad (\lambda > 0) . \tag{18}$$

式中,λ 是与场曲程度有关的常数。图 2 是仿真复原实验的结果。

4 场曲复原方法在数码照片修正中的应用

低档数码相机的镜头常常存在不同程度的场曲像差,因此获得的照片中间清晰而边缘模糊。为了改善照片的清晰度,利用式(14)对图像场曲进行校正。由于复原过程需对图像信号作高阶微分运算,运算结果对噪声很敏感,因此滤噪过程是十分必要的。

均值滤波是抑制图像随机噪声最常用的方法之一[8],其缺点在于抑制噪声的同时,平滑了图像细节。采用 3 ×3 加权均值滤波,适当增大模板中心点的权重系数,可以在抑制随机噪声的同时,尽可能保持图像细节。图像滤噪及场曲校正的具体算法如下,令

$$g_1 = \nabla^2 \bar{g}(x, y) , \tag{19}$$

$\bar{g}(x, y)$ 是 $g(x, y)$ 加权均值滤波后的结果,令

$$g_2 = \nabla^2 \bar{g}_1 , \tag{20}$$

$\bar{g}_1$ 是 g_1 滤波后的结果,令

$$g_{12} = -\frac{1}{4a} g_1 + \frac{1}{32 a^2} g_2 , \tag{21}$$

$$\tilde{f}(x, y) = g(x, y) + \bar{g}_{12} , \tag{22}$$

$\bar{g}_{12}$是矩阵 g_{12}滤波后的结果。整个滤噪过程总共做了 3 次滤波去噪运算,3 次去噪的必要性可以通过图 3 所示复原结果和表 1 中的数据来说明。图 3 的复原运算采用式(23)计算参数 a,λ 的取值见式(24)。1 次去噪指只对原始图像矩阵 g 去噪,2 次去噪指对 g 和 g_1 去噪,3 次去噪指对 g、g_1 和 g_{12} 去噪。可以将图像景物区域和平坦区域的灰度值方差分别作为信号方差与噪声方差,并将他们的比值作为图像的信噪比,则由此计算出原始图像和几种复原图像的信噪比,计算结果见表 1。

(a) 未去噪复原图像

(a) Restored image with no filtering noise

(b) 3 次去噪复原图像

(b) Restored image with 3 times filtering noise

图 3　未去噪复原和去噪复原结果比较

Fig. 3　Comparing restoration of filtering noise with that of no filtering noise

表 1　图像的方差和信噪比

Tab. 1　Variance and SNR of the images

	信号方差	噪声方差	信噪比(dB)
原始图像	2971.3	81.265	15.631
未去噪复原图像	3697.8	2499.7	1.700 5
1 次去噪复原图像	3276.5	172.13	12.796
2 次去噪复原图像	3247.8	97.273	15.236
3 次去噪复原图像	3163.7	84.934	15.711

表 1 中的数据显示,3 次去噪复原图像的信噪比达到了原始图像信号的水平,大大高于未去噪复原的结果,噪声方差也得到了较好的抑制。因此,采用式(22)作为最终的复原公式。

运用复原公式还需获得参数 a。a 表示图像的模糊程度,系统的模糊参数 a 越小则退化图像越模糊,反之亦反。一个 Gauss 函数可以分解成两个 Gauss 函数的乘积,由于 Gauss 函数的傅氏变换仍然是 Gauss 型,所以 Gauss 函数也可以分解成两个 Gauss 函数的卷积。这表明,一个 Gauss 型系统可以分解为两个串联的 Gauss 系统,复原过程也可以分解,假定复原时选取的模糊参数 a 比实际退化的模糊参数大,虽然复原图像的清晰程度达不到原始信号的水平,但应该比退化的模

糊图像有所改善,至少不会使信号质量恶化,这是由 Gauss 函数的可分解性决定的。由于 Gauss 函数的这一优良性质,参数 a 可以通过实验来估计,根据图像信号的容噪能力及实际复原效果,在大于实际模糊参数的范围内逐渐逼近。

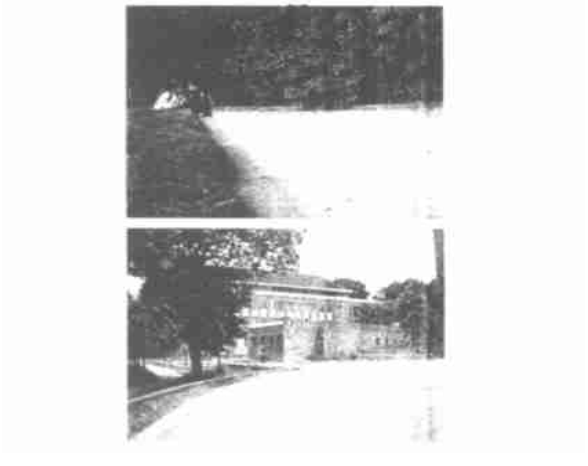
在场曲复原中,参数 a 是像素点到图像中心距离 r 的函数。通过多次实验发现,采用近似关系 $d \propto r$ 较之式(15)更能符合场曲的实际情况,然后根据式(16)、(17)、(18)计算得到

$$a = \frac{18}{\lambda r^2} \quad (\lambda > 0) \ , \tag{23}$$

对于同一个成像系统,λ 是确定不变的,实验采用的照片都是由同一台数码相机获得,通过大量实验确定场曲系数 λ:

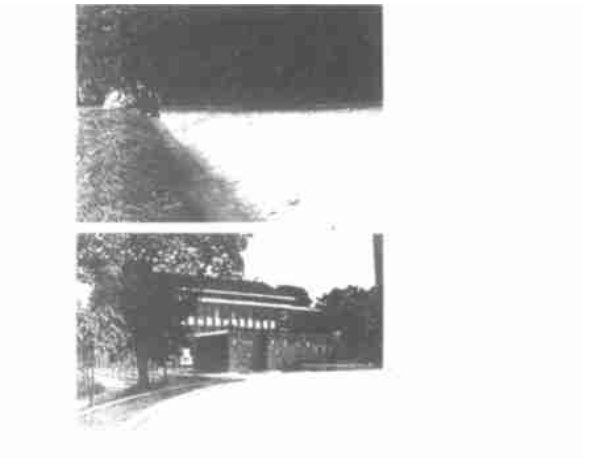
$$\lambda = [\lambda_r \lambda_g \lambda_b] = [1.5 \ 1.3 \ 1.8] \times 10^{-3}, \tag{24}$$

其中 λ_r、λ_g、λ_b 分别表示红、绿、蓝 3 个颜色分量对应的场曲系数。



(a) 场曲图像

(a) Blurred images



(b) 复原图像

(b) Restored images

图 4　实际场曲图像复原

Fig. 4　Restoration of a practical image

根据场曲系数计算所有像素对应的 a 值。图 4 是 2 幅由低档数码相机获取的场曲图像的复原结果,(a)组是原始场曲图像,(b)组是复原图像。

5　结束语

图 4 所示的复原结果表明,场曲近似复原方法在实际应用中提高了图像清晰度,改善了图像的视觉效果。该复原方法所涉及的全部运算都在空间域进行,可以很方便地控制复原参数随空间位置的变化,很适合应用于移变模糊图像的复原。同时,高阶微分运算对图像噪声比较敏感,因此需要针对实际图像的信噪比采取有效的滤噪方法对噪声加以控制。

参考文献:

[1] 张明慧,徐卫,张尧禹,等. 航空照片的图像增强研究[J]. 光学 精密工程, 2002,10(2):194-200.
ZHANG M H, XU W, ZHANG Y Y, *et al*. Research on image enhancing for aerial photographs[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(2):194-200. (in Chinese)

[2] PICCOLOMINI E, ZAMA F. Parallel image restoration with domain decomposition[J]. *Real-Time Imaging*, 2001,7(1):47-57.

[3] SAWCHUK A A. Space-variant image restoration by coordinate transformations[J]. *J Opt Soc Am*, 1974,42(2):138-144.

[4] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社,2001. 184-287.
ZHOU M Y. *Deconvolution and signal restoration* [M], Beijing: National Defence Industry Press, 2001,184-287.

[5] 张鲁江,付忠良. 退化模型未知的图像复原方法[J]. 计算机应用,2001,21(1):44-48.
ZHANG L J, FU ZH L. Approaches to image restoration without knowing the models degradations[J]. *Computer Applications*, 2001,21(1):44-48.
[6] TEKALP A M, KAUFMAN H, WODDS J W. Identification of image and blur parameters for the restoration of noncausal blurs[J]. *IEEE Trans Acoust Speech, Signal Processing*, 1986,34(4):963-971.
[7] SAWCHUK A A, PEYROVIAN M J. Restoration of astigmatism and curvature of field[J]. *J Opt Soc Am*, 1975,65(6):712-715.
[8] 孙俊喜,陈亚珠. 一种具有边缘保持特性的超声图像小波域阈值去噪新方法[J]. 光学 精密工程, 2002,10(5):430-433.
SUN J X, CHEN Y ZH. Novel speckle reduction for medical ultrasound images based on edge presevation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(5):430-43

作者简介:朱　俊(1980 -),男,湖北武汉人,重庆大学硕士研究生,研究方向为数字图像处理。

美国研制的第一架激光动力飞机

由美国国家航空航天局(NASA)马歇尔航天飞行中心、达莱登(Dryden)飞行研究中心以及阿拉巴马州大学组成的研究小组正在研究使用激光作为飞机动力,并完成了以激光为动力的试飞。

该小组研制并演示的这种小型飞机,只采用地基激光器提供动力。激光器在飞行过程中对飞机进行跟踪,将激光束指向飞机上的光电电池,为飞机提供动力。只要激光束不中断,就能使飞机一直持续飞行。由达莱登研究中心设计并制造的小型激光动力飞机翼展约 1.5m,重约 0.26kg,为轻木结构,采用碳纤维管路,外表附有聚酯薄膜涂层,并通过无线电进行遥控。参与该计划的阿拉巴马州大学人员选择并试验的专用光电电池可有效地将激光能量转换成电能,为飞机上的小型电动机提供能源。

在演示试验中,飞机在马歇尔中心的室内飞行,以防止受到风力和天气的影响。当飞机从室内的发射平台上释放后,激光束开始指向飞机上的电池面板,使飞机上的螺旋桨开始旋转,推进飞机飞行,一旦关闭激光束,飞机便开始滑翔降落。

由于飞机上无需携带燃料和电池,因此可携带科学和通信设备,并能在空间飞行任意时间。该技术方案为遥控和远程通信业提供了潜在的商用价值。例如,远程通信公司可在这种飞机上安装转发器,并使飞机在城市上空飞行,飞机可执行从中继移动电话信号到有线电视或因特网接入等一系列任务。

激光能源束技术是一项用于未来飞机设计和运行的很有前景的技术,并还可为 NASA 开发创新性航空航天技术提供支持。