

相关系数分析在模糊图像参数识别中的应用

周 曲, 颜国正, 王文兴

(上海交通大学 精密工程及智能微系统研究所, 上海 200240)

摘要:介绍一种在图像频域应用相关系数分析方法来识别模糊参数的方法。该方法用一系列同一类型但不同参数的模糊模型来第二次模糊图像,然后在频域中分析两次模糊图像之间的相关系数。实验结果表明,这种方法既适合于散焦模糊模型也适合于运动模糊模型的参数识别,有一定的准确性和计算上的简便性。

关键词:点扩散函数(PSF); 模糊图像; 散焦模糊; 运动模糊; 相关系数

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A

Application of correlation analysis to parameter recognition for blur image

ZHOU Qu, YAN Guo-zheng, WANG Wen-xing

(*Institute of Medical Precision Engineering & Intelligent System,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: A practical method for estimating the blur parameters using correlation analysis is proposed. In the frequency domain the correlation between the original blurred images and the second blurred images is analyzed after blurring the original images by a series of Point Spread Functions(PSFs) with various parameters of same model. The experimental results indicate that the algorithm is suitable for the parameter recognition of both defocus and motion blur models and has higher precision and less computational cost.

Key words: PSF; blur image; defocus blur; motion blur; correlation

1 引 言

图像反降晰最初是从空间探索计划提出来的,其获得图像的代价十分高昂,所以图像降晰造成的科学意义上的损失也是十分巨大的。目前图像反降晰的研究已扩展到很多与图像有关的领域。散焦模糊和运动模糊是两种最常见的模糊模型,许多论文在航空成像^[1,2]或自动调焦^[3]等领域

对这些模糊模型进行反降晰研究,具有很好的实际应用价值。恢复一幅模糊图像往往需要了解模糊模型的点扩散函数(PSF)的参数信息,然而,在实际应用中人们一般没有有关模糊参数的先验知识。于是有很多方法被用于识别模糊参数,但一般都是针对某一种模糊模型。例如一种比较容易实现而且经常被提到的是用边缘检测方法来判断模糊的程度^[4,5],但是这种方法对于平滑边缘的图像有一定的局限性,另外还不适合于运动模糊

模型。有些论文提出了以各种矩的分析来评估模糊的程度^[6],但一般也是用来分析散焦模糊模型。另外一个经典的方法是傅里叶变换方法,尽管散焦模糊和运动模糊模型在频域中的特征在物理上易于被理解,但是对于计算机自动识别来说仍是比较困难的。因为傅里叶方法在理论上的准确性和对这两种模型的通用性,一些论文提出了许多基于频域的方法来识别其模糊参数^[7,8]。鉴于散焦模糊和运动模糊模型在频域中的特征比较明显,而相关系数分析方法也被广泛用来搜索空间域或频域^[9,10]的某些匹配信息,本文提出在频域应用相关系数分析方法来识别参数,这种方法既适合于散焦模糊也适合于运动模糊模型的参数识别,而且易于实现。

2 模糊模型的频域特征

除非文中有特别声明,本文假设模糊图像是

无噪而且是离散的。为了讨论方便,文中所有信号包括一维二维信号都被假设是中心对称的。一个无噪声的模糊或降晰图像 $g[n_x, n_y]$ 在空间域可以表达为:

$$g[n_x, n_y] = f[n_x, n_y] * h[n_x, n_y], \quad (1)$$

其中 $f[n_x, n_y]$ 表示原始清晰图像, $h[n_x, n_y]$ 是散焦模糊模型的 PSF。* 表示二维卷积。对式(1)进行离散傅里叶变换(DFT):

$$G[k_x, k_y] = F[k_x, k_y] \cdot H[k_x, k_y], \quad (2)$$

其中 $G[k_x, k_y]$ 表示 $g[n_x, n_y]$ 的 DFT, $F[k_x, k_y]$ 为 $f[n_x, n_y]$ 的 DFT, $H[k_x, k_y]$ 为 $h[n_x, n_y]$ 的 DFT。

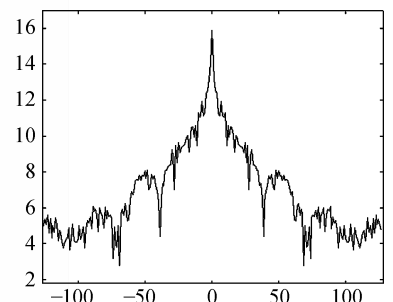
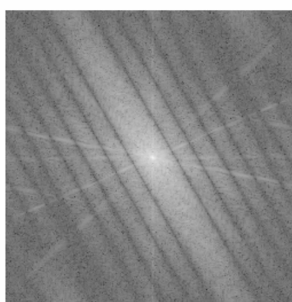
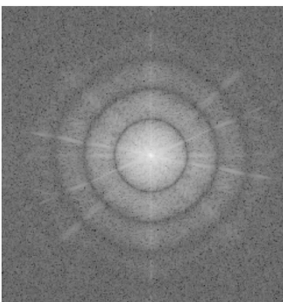
为了更好地观察傅里叶分量,通常在频域再进行一次对数变换 $\log |G[k_x, k_y]|$ 。图 1(d)(e) 是对数化的傅里叶谱图。散焦模糊模型的基本原理是物体的一个点投射到底片上成了一块圆形的斑点。运动模糊模型的基本原理是物体上的一个



(a) 原始清晰图像
(a) Original sharply focused image

(b) Blurred image by a defocus PSF
(r=5)

(c) Blurred image by a motion PSF
(d=15, $\theta=30^\circ$)



(d) 图(b)的 DFT
(d) DFT of Fig. (b)

(e) 图(c)的 DFT
(e) DFT of Fig. (c)

(f) 图(d)的一条过中心剖面线
(f) A profile through the center point of Fig. (d)

图 1 不同模糊模型图像及其对数化的傅里叶谱

Fig. 1 Blurred images with different blur models and their logarithmic DFT images

点投射到底片上成了一条线。本文中的符号 r , d , θ 分别代表散焦模糊的半径、运动模糊的运动距离和运动方向的角度。

在图 1(d)中,中心第一个圆环的半径反映了散焦模糊的程度。在图 1(e)中,栅栏的密度和方向也可以推导出运动模糊的运动距离和角度。图中还有其它一些突出的成分,如图中的白线条,对人眼来说,他们一般都不会构成操作人员准确测量圆环半径的障碍。但是对计算机来说则不然,如果采用剖面线方法进行分析,如图 1(f),又以什么标准来区分图中倒置的尖峰哪些是属于散焦模糊特征圆环的边界,哪些是属于其它成分的突起呢?更何況不同的图像内容,其在频域里的外形都不一样,因此很难为剖面线分析方法提出一种通用的区分方法。本文提出一种适应性比较强的分析方法:相关系数分析,它也要利用频域中模糊模型的一些特征。

3 相关系数分析

这种算法的主要原理是应用两个相同或不同的模糊模型去两次模糊一幅清晰图像,那么当这两种模糊模型一样且他们的参数都相同或最接近时,第一次模糊图和第二次模糊图的频谱图是最相似的。这种相似性可以用它们之间的相关系数值来评价。假定第一次模糊模型的参数是未知的,可以采用搜索的方法,让第二个模糊模型的参数在一定范围内变化,当第一次模糊图和第二次模糊图的频谱图的相关系数为最大值时,可以将第二个模糊模型的参数值作为第一个未知模糊模型参数估计值。实际应用中,为了避免二维离散卷积的长度问题,本文采用在频域中的加法操作,即将第二次模糊模型经过对数变换后的频谱图加到第一次模糊图像经过对数变换的频谱图上,来形成第二次模糊图像经过对数变换的频谱图。第二次模糊模型如图 2 中的 $Tst[.]$ 也被称做测试模型,它以原图像的大小来进行离散傅里叶变换以便在频域进行加法操作。

3.1 模糊模型识别

第一步是要识别模糊的类型,图 2 是分析流程图:

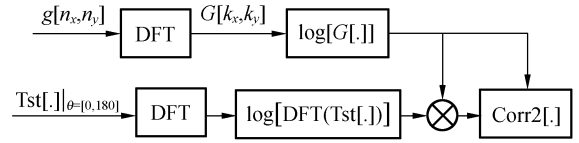
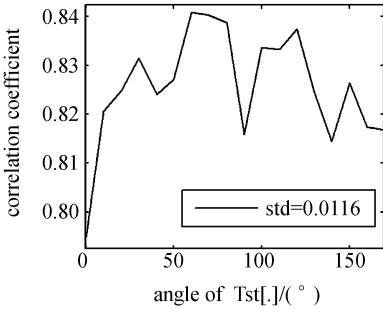


图 2 相关系数分析法的模型识别流程图

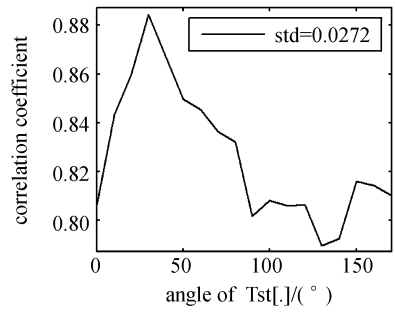
Fig. 2 Flowchart of correlation analysis for blur model recognition

其中 $Tst[.]$ 表示一系列测试模型的 PSF。 $Corr2[.]$ 表示 $\log[G[.]]$ 和 $\log[G[.]] + \log[DFT(Tst[.])]$ 之间的相关系数。模型识别的主要原理是:假设 $Tst[.]$ 是一系列运动模糊模型,他们的运动距离 d 相等但角度 θ 不同, $g[n_x, n_y]$ 是一幅未知参数的运动模糊图像。当 $Tst[.]$ 的 θ 从 0° 变化到 180° , $Corr2[.]$ 将出现大的波动。尽管它们的 d 不一定相等, $Corr2[.]$ 的最大值将出现在 $Tst[.]$ 的 θ 等于 $g[n_x, n_y]$ 的 θ 的地方。然而,如果 $g[n_x, n_y]$ 是散焦模糊图像, $Corr2[.]$ 波动的幅度就比较小(本文仅考虑区分散焦模糊和运动模糊模型)。那么就可以用 $Corr2[.]$ 标准差的大小来区分这两种模糊模型。以图 1(d)(e) 为例,定义 $Tst[.]$ 为一系列运动模糊模型,它们的 d 都等于 10(根据经验设置),而 θ 从 0° 变化到 180° , θ 的递增幅度 T_θ 取决于对未知运动模糊模型角度识别所需的精度。本文对 T_θ 取值为 10° , 假如 $g[n_x, n_y]$ 属于运动模糊模型图像,那么该模型角度的识别结果会是 10° 的整数倍。测试图 1(d)、(e) 所得的相关系数曲线图如图 3 所示。

图 3(a) 中的标准差明显小于图 3(b)。一般来说,测试散焦模糊模型所得的相关系数曲线的标准差小于测试运动模糊模型的曲线标准差。可以设置一个门限 0.02 来区分这两种模糊模型,小于这个门限值的就认为模糊图像 $g[n_x, n_y]$ 所用的是散焦模糊模型,反之认为是运动模糊模型。如果被识别为运动模糊图像,那么其角度 θ 也可以随之确定下来,就是在 $Corr2[.]$ 出现最大值时的 θ 值,如图 3(b) 中就可以判断出 $\theta = 30^\circ$, 刚好是用来模糊图 1(c) 的角度参数。



(a)图 1(b)与测试模型之间的相关系数曲线
(a) Correlation coefficient curve between Fig. 1 (b) and test PSF



(b)图 1(c)与测试模型之间的相关系数曲线
(b) Correlation coefficient curve between Fig. 1 (c) and test PSF

图 3 当 $TstD[.]$ 的 $d=10, \theta$ 从 0° 变化到 170° 时的模型测试相关系数曲线

Fig. 3 Correlation coefficient curves when θ of $TstD[.]$ varies from 0° to 170° and d equals 10

3.2 散焦模糊模型的相关系数分析

假如第一步模型测试的结果是散焦模糊模型,那么接下来就要识别其散焦半径。图 4 是其分析流程图。

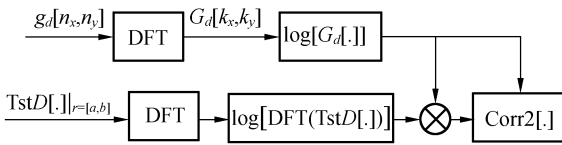


图 4 相关系数分析法的散焦模糊参数识别流程图
Fig. 4 Flowchart of correlation analysis for defocus blur model

其中 $g_d[n_x, n_y]$ 表示散焦模糊图像。 $TstD[.]$ 表示一系列针对散焦模糊模型的测试模型的 PSF, 它们同样都是散焦模糊模型,但是它们的散焦半径 r 不同且在 a 到 b 之间变化。 a 到 b 的区间指示了搜索的范围。当 $TstD[.]$ 的半径 r 等于 $g_d[n_x, n_y]$ 所用的模糊半径时, $Corr2[.]$ 的值将达到

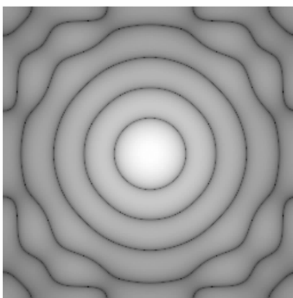


图 5 测试模型的对数化傅里叶谱 ($r=5$)
Fig. 5 Logarithmic DFT image of test PSF ($r=5$)

最大。图 6 中,相关系数最大值对应的散焦半径为 5,这刚好是用来模糊图 1(b)的参数。

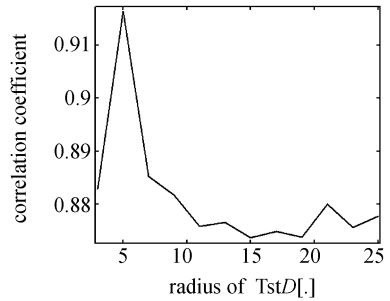


图 6 图 1(b)与测试模型之间的相关系数曲线 ($r=3\sim 25$)
Fig. 6 Correlation coefficient curve between Fig. 1 (b) and test PSF ($r=3\sim 25$)

3.3 运动模糊模型的相关系数分析

假如第一步模型测试的结果是运动模糊模型,其运动角度 θ 也同时被确定了,那么接下来就要识别其运动距离 d ,图 7 是其分析流程图。

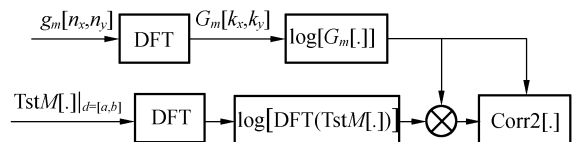


图 7 相关系数分析法的运动模糊参数识别流程图
Fig. 7 Flowchart of correlation analysis for motion blur model

其中 $g_m[n_x, n_y]$ 表示运动模糊图像。 $TstM[.]$ 表示一系列针对运动模糊模型的测试模型的 PSF, 它们同样都是运动模糊模型,其角度 θ 都等于已

经识别的值,但是它们的运动距离 d 不同且在 a 到 b 之间变化。当 $TstM[.]$ 的 d 等于 $g_m[n_x, n_y]$ 所用的运动距离时, $Corr2[.]$ 的值将达到最大。在图 8 中,相关系数最大值对应的运动距离 d 为 15,这刚好是用来模糊图 1(c) 的运动距离参数。

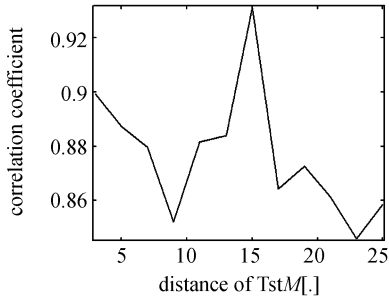


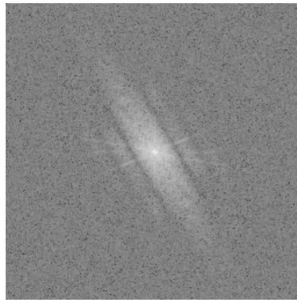
图 8 图 1(c) 与测试模型之间的相关系数曲线 ($d=3\sim 25$)
 Fig. 8 Correlation coefficient curve between Fig. 1(c) and test PSF ($d=3\sim 25$)

3.4 相关系数分析的适应性

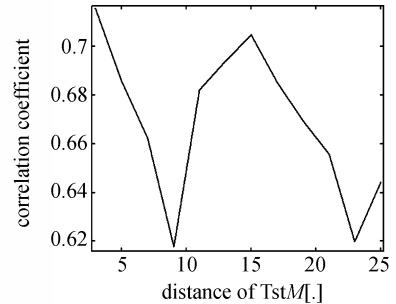
在应用中通常遇到的一个问题是噪声污染问题。本文的方法并不适用于被噪声严重污染的模糊图像,这是因为其噪声在频域中的分量会将散焦模糊或运动模糊的显著特征淹没掉,从而没法进行分析。下面考察一下相关系数分析方法对轻度噪声污染情况的适应能力。用均值为 0、方差为 0.0005 (归一化表示) 的加性高斯噪声去污染图 1(c) 和图 1(b), 得到图 9(a) 图 10(a)。频域中散焦模糊对应的圆环以及运动模糊对应的栅栏特征都被不同程度地弱化了。相关系数分析法的效果也不及前述例子,特别是对于运动模糊模型参数的识别更是如此。因此在噪声环节下,用相关系数分析法来识别模糊模型以及运动模糊的参数是不太可靠的。相对图 8 而言,图 9 中的相关系数曲线有两个特点:一是平均值低,另外是曲线的最大值的位置不一定对应着运动模糊的距离参数 d 。



(a) 加噪声图 (均值为 0, 方差为 0.0005)
 (a) Image corrupted by noise
 (mean is 0, and variance is 0.0005)



(b) 傅里叶图谱
 (b) DFT



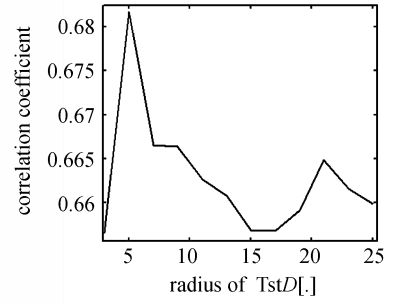
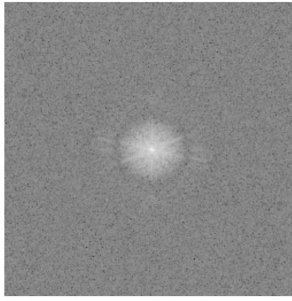
(c) 相关系数曲线 ($d=3\sim 5$)
 (c) Correlation coefficient curve ($d=3\sim 5$)

图 9 图 1(c) 的高斯噪声污染图像的相关系数数据
 Fig. 9 Data of correlation coefficient of Fig. 1(c) corrupted by white Guassian noise

然而,被轻度高斯噪声污染的散焦模糊图像的识别要好些。图 10(c) 中,虽然相关系数曲线的均值比图 6 的低,但是其基本轮廓还是差不多,仍然可以从图中识别出散焦模糊半径 $r=5$ 。

小结:相关系数分析方法对于被轻度噪声污

染的模糊图像的参数识别有一定的局限性。对于轻度噪声环境下模型的识别以及运动模糊的参数识别任务不太可靠,但对散焦模糊的参数识别仍然有比较好的识别率。



(a)加噪声图(均值为 0,方差为 0.000 5)

(b)傅里叶图谱

(c)相关系数曲线($r=3\sim 5$)

(a)Image corrupted by noise

(b)DFT

(c)Correlation coefficient curve($r=3\sim 5$)

(mean is 0, and variance is 0.000 5)

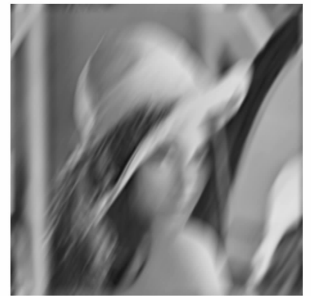
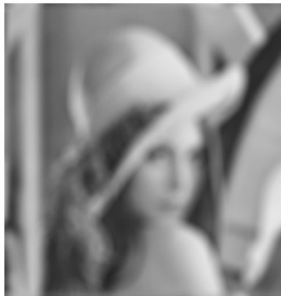
图 10 图 1(b)的高斯噪声污染图像的相关系数法数据

Fig. 10 Data of correlation coefficient of Fig. 1(b) corrupted by white Gaussian noise

4 实 验

下面将这种算法应用到其它模糊图像分析上来验证其适应性和可行性。图 11(a)是经典的 Lena 原图,用半径 $r=7$ 的散焦模糊模型来模糊

它得到图 11(b),用 $d=21, \theta=60^\circ$ 的运动模糊模型来模糊它得到图 11(c),然后分别做相关系数分析。图 11(d)中相关系数曲线的标准差小于门限值 0.02,因此认为对应的图 11(b)是散焦模糊图像。而图 11(e)中的标准差大于 0.02,故认为对



(a)原清晰图像

(b)散焦模糊图像(散焦半径 $r=7$)

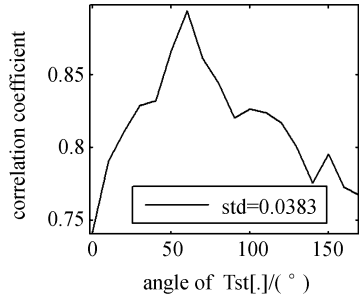
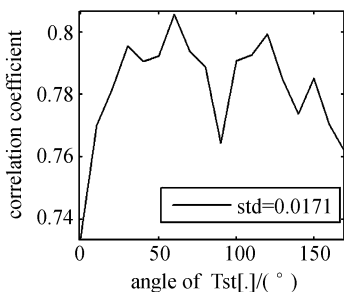
(c)运动模糊图像($d=21, \theta=60^\circ$)

(a)Original sharply focused image

(b)Blurred image by a defocus PSF($r=7$)

(c)Blurred image by a motion PSF

($d=21, \theta=60^\circ$)



(d)图(b)的相关系数曲线($\theta=0^\circ\sim 170^\circ$)

(e)图(c)的相关系数曲线($\theta=0^\circ\sim 170^\circ$)

(d)Correlation coefficient curve of Fig. (b) ($\theta=0^\circ\sim 170^\circ$)

(d)Correlation coefficient curve of Fig. (c) ($\theta=0^\circ\sim 170^\circ$)

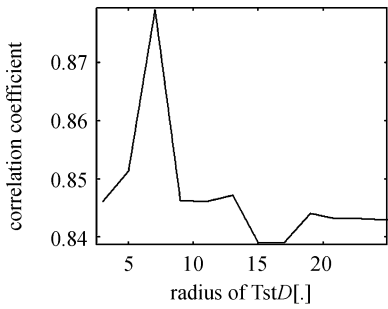
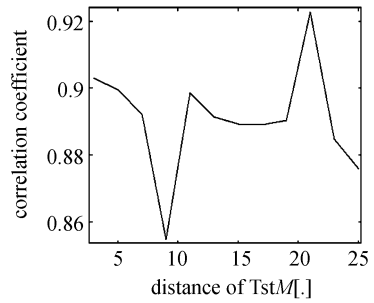
(f)图(b)的相关系数曲线($r=3\sim 25$)(f)Correlation coefficient curve of Fig. (b) ($r=3\sim 25$)(g)图(c)的相关系数曲线($d=3\sim 25$)(f)Correlation coefficient curve of Fig. (c) ($d=3\sim 25$)

图 11 Lena 图像的相关系数法实验

Fig. 11 Experiment of correlation coefficient method of Lena image

应的图 11(c)是运动模糊图像,而且可以判断出其运动角度 $\theta=60^\circ$ 。区分好模糊模型后,接下来就要对单独的模糊模型的参数进行识别。对于散焦模糊模型来说,图 11(f)很明显地指示出散焦模糊半径等于 7,这刚好是散焦模糊图 11(b)所用的模糊参数。在图 11(g)中,也显示出运动模糊距离 d 等于 21,结合第一步中识别出来的运动角度 $\theta=60^\circ$,这也正是运动模糊图 11(c)所用的模糊参数。

5 结 论

本文所述的相关系数分析用于模糊图像参数识别的步骤小结如下:

(1)识别模糊模型,使用的一系列运动模糊模型 Tst[.]来进行测试,它们的 $d=10$, θ 从 0° 到 180° 变化。以测试得出的相关系数曲线的标准差为标准,以 0.02 为门限,低于这个门限的就认为是散焦模糊图像,其余的被认为是运动模糊图像,并可以通过相关系数最大值的位置同时确定运动模糊的角度 θ 。

(2)为特定的模糊模型评估参数。散焦模糊

图像参数识别使用的是一系列散焦模糊模型 TstD[.]来进行测试,它们的散焦半径 r 从 a 变化到 b ,相关系数分析曲线最大值的位置对应的测试模型的 r 值作为原散焦模糊图像未知模糊半径参数的评估值。运动模糊图像参数识别使用的是一系列运动模糊模型 TstM[.]来进行测试,它们的运动距离 d 从 a 变化到 b ,而 θ 等于第一步模型识别过程中为运动模糊模型识别出的 θ 值,相关系数分析曲线最大值的位置对应的测试模型的 d 值作为原运动模糊图像未知运动距离参数的评估值。 a 到 b 是想要搜索的范围。

除了特殊的图像内容在频域中的特征与散焦模糊或运动模糊的特征十分相似而难以区分的情况,相关系数分析算法通常与图像内容无关。一般来说,散焦模糊半径为 $2\sim 20$ 个像素之间,运动模糊的运动距离一般也为 $2\sim 40$ 个像素之间时,用相关系数分析算法来识别模糊参数有比较好的效果。在实际应用中,这些范围内的模糊是比较常见的。它对于散焦模糊和运动模糊来说是一种比较通用的模糊参数识别方法,能以较少的计算量来达到比较好的识别精度,也易于用软件来实现。

参考文献:

[1] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像移模糊恢复技术[J]. 光学 精密工程,2006,14(4): 697-703.

JIA P, ZHANG B, SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4): 697-703. (in Chinese)

- [2] 孙辉,张葆,刘晶红. 基于维纳滤波的运动模糊消除算法及其在航空成像系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6):735-740.
SUN H, ZHANG B, LIU J H. Restoration of motion-blurred image based on wiener filter and its application in aerial imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):735-740. (in Chinese)
- [3] 段瑞玲,段惠波,李庆祥,等. 基于图像处理的维装配自动调焦系统[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3):468-472.
DUAN R L, DUAN H B, LI Q X, *et al.*. Micro-assembly auto-focusing system based on image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):468-472. (in Chinese)
- [4] SANG K K, TAE K K, JOON K P. A fully digital auto-focusing system based on image restoration[C]. *IEEE Tencon*, 1997.
- [5] CHUNG P C, WANG J M, ROBERT R B, *et al.*. A non-parametric blur measure based on edge analysis for image processing applications[C]. *IEEE Conference on Cybernetics and intelligent Systems*, 2004.
- [6] YAP P T, RAVEENDRAN P. Image focus measure based on chebyshev moments[J]. *IEE Proceedings, Vision, Image and Signal Processing*, 2004, 151(2):128-136.
- [7] PREMARATNE P, KO C C. Image blur recognition using under-sampled discrete fourier transform[J]. *Electronics letters*, 1999, 35(11): 889-890.
- [8] SEZAN M I, PAVLOVIC G, TEKALP A M, *et al.*. On modeling the focus blur in image restoration[C]. *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1991.
- [9] 张志佳,黄莎白,史泽林. 新的基于边缘特征的图像相关匹配方法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6):635-638.
ZHANG ZH J, HUANG SH B, SHI Z L. New image correlation-matching algorithm based on edge extraction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6):635-638. (in Chinese)
- [10] 王博. 频域相关的恒常性特征及其算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(6):798-803.
WANG B. Constancy properties of template matching in fourier domain[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(6):798-803. (in Chinese)

作者简介:周 曲(1975—),男,上海交通大学仪器工程系博士研究生,研究方向为仪器科学与技术。E-mail: zhou_qu@sjtu.edu.cn

(本栏目编辑 黄廉卿)