

辐射状图像模糊程度与复原效果的质量评价方法

曹峰梅 张欢欢 张颖颖

(北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

摘要 为定量评价摄像机与景物高速相向运动中造成的图像辐射状模糊的退化程度,以及科学地评价相关复原算法的有效性,针对径向模糊度函数和基于图像结构信息的图像质量评价方法进行了研究。文章通过建立径向模糊度函数,对不同场景图像的模糊度进行了定量描述,得出该函数在描述该问题时具有一定不稳定性的结论。从辐射状模糊机理和人眼的视觉特性出发,提出了可在无标准参考图像情况下,用于评价辐射状模糊图像复原效果的基于图像结构信息的质量评价方法;并运用该方法证明了正则化迭代法在复原辐射状模糊图像时表现了很好的容错性,在工程实际应用中可行性较强。

关键词 图像处理; 图像质量评价; 径向模糊度函数; 图像结构信息; 辐射状模糊; 图像复原

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0139

Quality Evaluation Method of Radiant Blurred Images/ Fuzzy Degree and Restoration Effect

Cao Fengmei Zhang Huanhuan Zhang Yingying

(The Information Science Technology College, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The methods to evaluate image quality based on the radial fuzzy degree function and structural information of images respectively to evaluate the degradation degree of radiant blurred images result in the high speed forward motion between the camera and the target, are studied. The conclusion that it is unstable to describe the fuzzy degree of images with different prospect quantitatively by radial fuzzy degree function, is got. According to imaging mechanism of radiant blurred images and human visual characteristics. The method based on structural information of images put forward, which can evaluate restored images' quality of radiant blurred images, without the clear image; Using it, when the normalized iterative method is used to restore radiant blurred images, its excellent fault tolerance ability and good feasibility in practical engineering application are exhibited.

Key words image processing; image quality assessment; radial fuzzy degree function; structural information of the image; radiant blurred image; image restoration

1 引 言

在航天、高速成像制导等许多成像过程中,摄像机和目标之间的相向运动会造成图像的辐射状模糊,从而减小有效视场,影响成像质量。为解决这种空变的运动模糊问题,课题组开展了对高速相向运动图像的退化过程进行数学建模,通过计算机仿真得到退化图像,搭建实验室条件下的仿真实验平台得到辐射状模糊图像,以及对退化图像进行仿真复原的系列研究工作^[1~5]。如何估算辐射状图像的退

化程度,评价相应的复原效果,是进一步解决图像辐射状模糊问题的重要理论依据。本文针对相关的评价方法及评价效果展开研究。

2 径向模糊度函数评价辐射状图像模糊程度的科学性分析

为评价辐射状图像的退化程度及复原效果,考虑到模糊图像的辐射对称性,文献[2]曾以图像中心为原点,提出径向模糊度函数 M 的概念,即

基金项目: 国家自然科学基金(60502025)资助课题。

作者简介: 曹峰梅(1970—),女,博士,副教授,主要从事光电成像、图像处理、光电检测及光电显示相关的科研与教学工作。E-mail: liuba@bit.edu.cn

$$G(\rho) = \frac{1}{K} \sum_{\forall (\rho-1) < \sqrt{m^2+n^2} < \rho} [f(m,n) - g(m,n)]^2, \quad (1)$$

式中 ρ 为径向距离, K 为以像素边长为步长, 做同心圆环, 落入圆环中的像素个数, $f(m,n), g(m,n)$ 分别表示运动模糊图像和静止清晰图像对应点的灰度值, 显然, $G(\rho)$ 就是在径向位置 $(\rho-1, \rho)$ 区间内的两图像对应像素灰度值的差平方和与该区间内像素数的商。该函数从辐射状图像的模糊机理出发, 反映了辐射状图像径向空变模糊的特点。

表 1 典型高速成像制导武器成像过程图像模糊度计算实例^[4]

Table 1 Fuzzy degree calculation examples of radiant blurred images due to imaging of typical high speed guided weapon

The number of clear pixels is less than	The blurred degree ξ	Velocity v /Ma	Integration time T /s	Relative distance L /m
20×20	0.1	8	0.04	1088
		7	0.04	952
10×10	0.2	8	0.04	544
		7	0.04	476
6×6	0.3	8	0.04	362.7
		7	0.04	317.3

如文献[1,4]所述, 相向运动图像的退化程度由摄像系统与场景间的运动速度 v , 系统积分时间 T 和积分初始时刻的相对距离 L 三个参数共同影响的 $\xi=vT/L$ 决定。依据表 1 给出的高速成像制导武器相对目标在常规成像参数下的运动模糊程度, 以文献[5]中的图像退化模型为退化仿真算法, 得出了不同 ξ 下的计算机仿真结果(见图 1)。图 1(a)为静止图像, 即 $\xi=0$; 图 1(b)~图 1(d)是图 1(a)景象在不同相向运动条件下产生的模糊图像, ξ 分别为 0.1、0.2、0.3, 对应的径向模糊度函数 G 如图 2 所示。

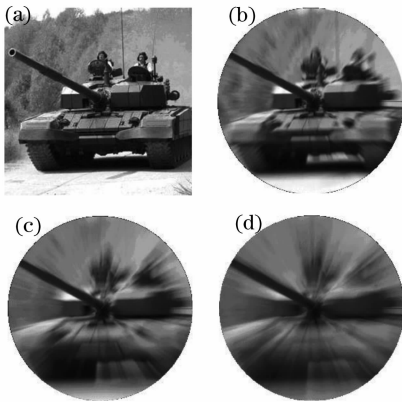


图 1 ξ 不同的计算机仿真模糊图

Fig. 1 Simulated blurred images with different ξ

由图 2 可知, 三条函数曲线的变化规律大体相同: 距图像中心距离一致处, 径向模糊度函数 G 值随 ξ 的增加而增大; 当半径增加时, 三条径向模糊度函数值在宏观上呈上升的趋势, 但在局部区域, 函数有骤升、骤减的趋势, 这可能是坐标转换过程中引入的误差造成的。

为验证径向模糊度函数的评价稳定性, 又针对不

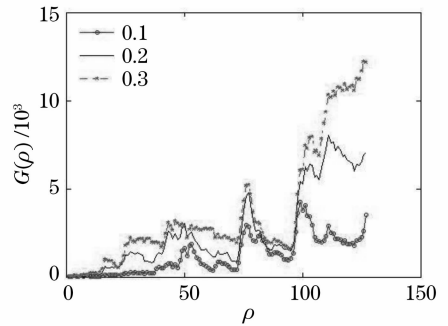


图 2 ξ 不同的辐射状图像的径向模糊度函数

Fig. 2 Radial fuzzy degree function of radiant blurred images with different ξ

同场景, 采用同样的参量 ξ 做仿真, 对计算的结果进行了考察。图 3(a)、图 3(c)是两幅摄像机静止时拍摄的清晰图像, 与它们对应的 ξ 为 0.2 的辐射状图像分别为图 3(b)、图 3(d)。图 3(b)、图 3(d)的径向模糊度

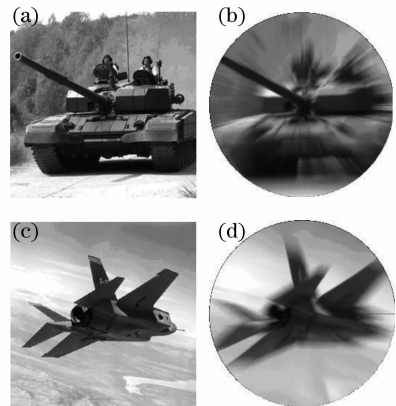


图 3 不同景象在 ξ 相同条件下的计算机仿真模糊图

Fig. 3 Different images' simulated blurred images with the same ξ

函数 G 如图 4 所示。

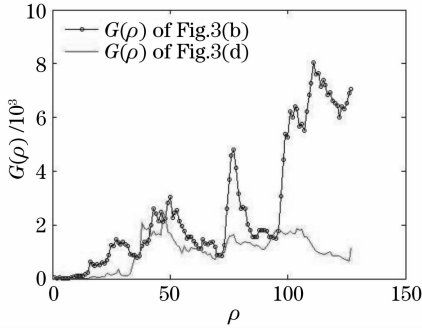


图 4 ξ 相同的辐射状图像的径向模糊度函数
Fig.4 Radial fuzzy degree function of different radiant blurred images with the same ξ

由图 4 知,图 3(b)和图 3(d)的径向模糊度函数曲线的变化规律不尽相同,尤其是半径较大时,二者的变化规律甚至截然相反。看来,径向模糊度函数仅在评价某些场景图像的辐射状模糊程度时,具有较好的效果,而针对图像边缘地带原本细节就较少的图像,评价结果与视觉效果却呈现较大差异,这是一个值得进一步研究的问题。

3 极坐标下基于图像结构信息的图像质量评价方法

3.1 极坐标下基于图像结构信息的图像质量评价算法内容详述

在一般实际应用中,图像复原的目的是为了恢复到人眼能够正确探测识别出目标的效果,而不一定是越接近原始图像越好,毕竟这里面有计算成本的问题。所以需要考虑人类视觉系统(HVS)的特点,从人眼的实际感受角度出发去得到更符合人眼特征的图像复原评价方法。对于没有清晰图像作为参考的实际情况,研究图像的退化和复原问题,建立复原图像质量与相关参量的函数关系,对于实现快速图像复原,达到探测识别目标的目的具有重要意义。

由辐射状模糊图像形成机理可知^[1~3,5],辐射状图像像素的灰度值实质上是沿着半径运动方向的模糊路径上各像元灰度值的加权叠加,即图像质量的退化和恢复在这类模糊问题中均表现为径向相关参量的变化,故研究从极坐标系出发,对比复原前后图像的对列像素灰度值之间的相关性、对比度和平均亮度的变化规律,结合人眼视觉系统模型,选择质量评价指标 Q ^[5] 来描述该过程的图像质量。对于在极坐标系下 M 行 N 列的复原图像

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Q(j), \quad (2)$$

$Q(j)$ 是复原图像第 j 列的质量评价指标,其定义为

$$Q(j) = \frac{\sigma_{f_j r_j}}{\sigma_{f_j} \sigma_{r_j}} \frac{2 \overline{f(i,j)_j} \overline{r(i,j)_j}}{\overline{f(i,j)_j}^2 + \overline{r(i,j)_j}^2} \frac{2\sigma_{f_j} \sigma_{r_j}}{\sigma_{f_j}^2 + \sigma_{r_j}^2}, \quad (3)$$

其中

$$\overline{f(i,j)_j} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f(i,j), \quad (4)$$

$$\overline{r(i,j)_j} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r(i,j), \quad (5)$$

$$\sigma_{f_j}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [f(i,j) - \overline{f(i,j)_j}]^2, \quad (6)$$

$$\sigma_{r_j}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [r(i,j) - \overline{r(i,j)_j}]^2, \quad (7)$$

$$\sigma_{f_j r_j} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [f(i,j) - \overline{f(i,j)_j}] \cdot [r(i,j) - \overline{r(i,j)_j}], \quad (8)$$

式中 $f(i,j)$ 、 $r(i,j)$ 分别表示在极坐标系下模糊图像 f 和复原图像 r 第 i 行第 j 列的像素灰度值。

$Q_1(j) = \frac{\sigma_{f_j r_j}}{\sigma_{f_j} \sigma_{r_j}}$ 是模糊图像与复原图像第 j 列列向量 $f(i,j)_j$ 与 $r(i,j)_j$ 的相关系数,当 $f(i,j)_j$ 和 $r(i,j)_j$ 是线性关系时, $Q_1(j)$ 取得最佳值 1;

$Q_2(j) = \frac{2 \overline{f(i,j)_j} \overline{r(i,j)_j}}{\overline{f(i,j)_j}^2 + \overline{r(i,j)_j}^2}$ 是 $f(i,j)_j$ 与 $r(i,j)_j$ 的平均亮度的接近程度,当 $\overline{f(i,j)_j} = \overline{r(i,j)_j}$ 时 $Q_2(j)$ 取得最佳值 1;

$Q_3(j) = \frac{2\sigma_{f_j} \sigma_{r_j}}{\sigma_{f_j}^2 + \sigma_{r_j}^2}$ 可看作是 $f(i,j)_j$ 与 $r(i,j)_j$ 的对比度相似程度,当 $\sigma_{f_j} = \sigma_{r_j}$ 时 $Q_3(j)$ 取得最佳值 1。

3.2 极坐标下基于图像结构信息的图像质量评价方法的实验分析

由于改进信噪比(ISNR)计算简单,能够总体上反映复原图像与清晰图像的偏离程度,它被广泛地应用于评价图像复原的实验中^[6]。但考虑到对实际辐射状模糊图像进行复原时,无法预知退化图像的本来面目,也就无法应用 ISNR 方法来评价复原效果,本文提出了应用基于极坐标下图像结构信息的质量评价方法对复原图像进行评价,并将其评价结果与 ISNR 方法进行对比分析。

利用现有的实验条件,在已搭建的实验平台^[4]上拍摄靶标 1,获得的实际运动模糊图像如图 5(a)所示;分别采用最小二乘法^[3]、奇异值分解法^[5]、正则化

参数为 0.001 的正则化最速下降迭代法^[5]得到复原图 5(b)~图 5(d);摄像机在静止情况下获得的清晰图像是图 5(e),可将其视为理想复原图像。

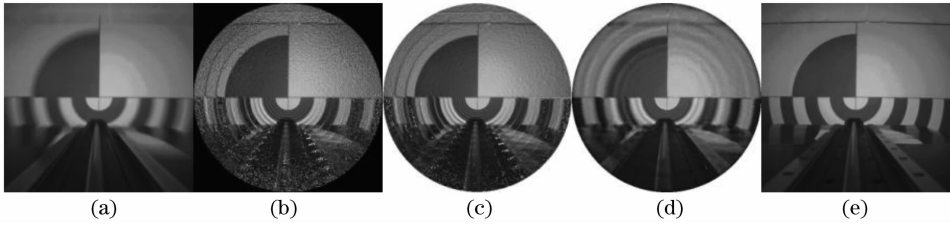


图 5 靶标 1 的实验仿真图

Fig. 5 Target 1's experiment simulated images

表 2 靶标 1 的不同复原算法的质量评价结果

Table 2 The evaluation parameters of target 1's different restored images

Image statistical information	Fig. 5(b)	Fig. 5(c)	Fig. 5(d)	Fig. 5(e)
Q	0.518	0.775	0.8069	0.925
ISNR	-11.708	-6.850	-13.6709	∞

表 2 显示,各图像的 Q 值从左到右依次变大,这种增长趋势与 ISNR 的评价结果有相当的一致性。

为进一步验证基于图像结构信息的质量评价方法在评价不同场景、不同复原算法的复原图像时的可行性和稳定性,又进行了下一步工作:在已搭建的实验平台上拍摄另一个靶标,获得的实验模糊图像

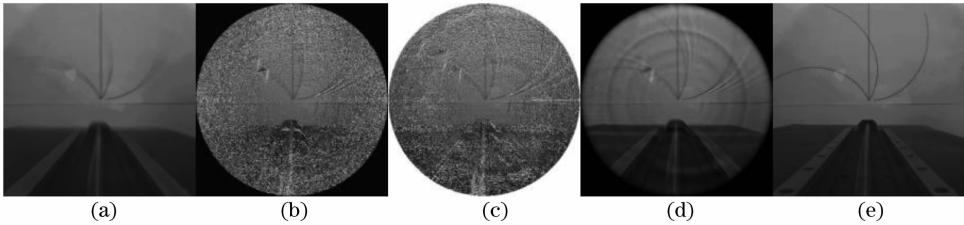


图 6 靶标 2 的实验仿真图

Fig. 6 Target 2's experiment simulated images

与前面的分析结果类似,随着 ISNR 的增加,Q 呈增加的趋势,复原图像的视觉质量逐渐提高。

从表 2、表 3 还可明显看出,针对同一模糊场景,正则化复原算法的效果最明显,这也与视觉效果很一致。可以得出初步结论,针对辐射状模糊图像的正则化最速下降迭代法是上述三种复原算法中最有效的。

4 图像结构信息参量评价正则化复原算法的稳定性

在实际应用中,往往不能精确得到辐射状图像的退化参量 ξ ,即图像复原前,需预估成像参量

目视观察,图 5(b)~图 5(d)的主观视觉质量明显不同,采用在极坐标系下基于图像结构信息的质量评价方法评价图 5 中各复原图像,结果如表 2 所示。

如图 6(a)所示^[5];分别采用最小二乘、奇异值分解、正则化参数为 0.1 的正则化最速下降迭代法得到复原图 6(b)~图 6(d);摄像机静止时获得的清晰图像是图 6(e)。

用同样的方法得到图 6(b)~图 6(e)的质量评价结果如表 3 所示。

表 3 靶标 2 的不同复原算法的质量评价结果

Table 3 The evaluation parameters of target 2's different restored images

Image statistical information	Fig. 6(b)	Fig. 6(c)	Fig. 6(d)	Fig. 6(e)
Q	0.0363	0.098	0.448	0.533
ISNR	-17.345	-13.906	-7.031	∞

(v, T, L),而该参量的估计误差可能直接导致某一种复原算法失效,这就要求满足实际需要的复原算法应具有一定的稳定性,或称容错性。

以评价正则化参数为 0.001 的正则化最速迭代法为例^[5],在计算机仿真环境下,用上面提出的质量评价指标进行测试验证。图 7(a)为依据表 1 中参数得到的辐射状图像,其成像参量为 $v=8 \text{ Ma}$ (2720 m/s), $T=0.04 \text{ s}$, $L=544 \text{ m}$;图 7(e)为输入的成像参量没有误差的复原图像;图 7(b)~图 7(d)是输入的成像参量有误差的复原图像,为表述方便,令其成像参量中 T 和 L 均相同,速度分别为 2220 m/s、2520 m/s、2920 m/s。图 7(b)~图 7(e)的质量评价参量如表 4 所示。

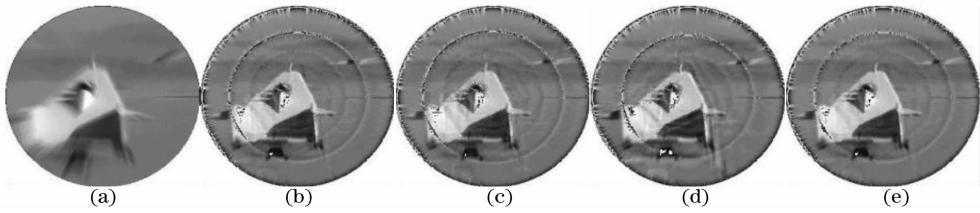


图 7 计算机仿真图(1)

Fig. 7 Simulation images of group 1

表 4 图 7 中复原图像的质量评价参量

Table 4 The evaluation parameters of restored images in Fig. 7

Image statistical information	Fig. 7(b)	Fig. 7(c)	Fig. 7(d)	Fig. 7(e)
Q	0.7709	0.7031	0.6656	0.7242
ISNR	-3.4028	-3.993	-4.1886	-3.595

图 7(b)~图 7(e)的视觉感知质量虽然不同,但是差别很小;它们的质量评价参数 Q 值(如表 4 所示)也相差很小。上面的分析表明,即使输入的成像参量有误差,正则化迭代复原法获得的复原效果仍

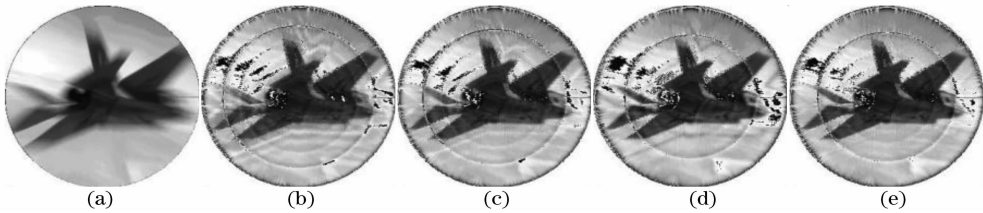


图 8 计算机仿真图(2)

Fig. 8 Simulated images of group 2

然很好,该算法具有所需的稳定性。

同理,在与图 7 相同的成像参量下,运用相同的算法复原另一幅辐射状图像图 8(a),得到图 8(b)~图 8(e)。它们的质量评价参量如表 5 所示。

表 5 图 8 中复原图像的质量评价参量

Table 5 The evaluation parameters of restored images in Fig. 8

Image statistical information	Fig. 8(b)	Fig. 8(c)	Fig. 8(d)	Fig. 8(e)
Q	0.768	0.7602	0.7084	0.7569
ISNR	-4.7213	-4.2735	-5.4	-4.1259

表 5 中图 8(b)~图 8(e)的 Q 值也非常接近,并且变化的趋势也有很大的相似性,图 8 中各复原图像的视觉感知质量也很相似,这证明针对不同场景,正则化最速迭代复原法都具有很好的稳定性。

5 结 论

径向模糊度函数反映了辐射状模糊图像的成像过程,是图像退化模型正确性的判定准则之一,对后续的理论研究具有重要意义;根据辐射状模糊图像的形成机理和人眼的视觉特性,提出了基于图像结构信息的质量评价方法,该方法不需要原始图像作为参考,而且评价结果与改进信噪比和人眼视觉感知质量一致;运用该方法对正则化迭代复原法的稳定性进行了评价,证明了正则化迭代复原算法在工程实际中具有较好的可行性。

参 考 文 献

1 Huang Fei, Jin Weiqi, Cao Fengmei *et al.*. Simulation and restoration study on radiant degradation image under lengthwise relative motion

[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, **33**(9): 1170~1171
 黄 飞,金伟其,曹峰梅 等. 相向运动条件下图像的辐射状退化及其复原研究[J]. *电子学报*, 2005, **33**(9): 1170~1171
 2 Chen Xichun, Cao Fengmei, Jin Weiqi. Recursive model of forward motion blurred image based on polar coordinates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 552~553
 陈喜春,曹峰梅,金伟其. 基于极坐标的相向运动图像模糊的递归模型[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 552~553
 3 Cao Fengmei, Chen Yixing, Zhang Yingying *et al.*. Restoration of forward motion blurred image based on polar coordinates[J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2008, **28**(2): 157~159
 曹峰梅,陈奕惺,张颖颖 等. 基于坐标变换的相向运动图像模糊复原方法[J]. *北京理工大学学报*, 2008, **28**(2): 157~159
 4 Cao Fengmei, Zhang Yingying, Chen Yixing. Design and realization of high forward motion image degradation experiment simulation system [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2008, **28**(Suppl. 1): 99
 曹峰梅,张颖颖,陈奕惺. 高速相向运动图像模糊实验仿真系统的设计与实现[J]. *北京理工大学学报*, 2008, **28**(Suppl. 1): 99
 5 Zhang Yingying. The experimental emulation of image degradation process in forward motion and research on radiant blurred image's restoration [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008
 张颖颖. 相向运动图像退化过程的实验验证及图像复原研究[D]. 北京:北京理工大学, 2008
 6 Miao Qing, Yang Linge. Restoration method of blurred image based on regularization in spatial domain [J]. *J. Foshan University (Natural Science Edition)*, 2008, **26**(2): 6
 苗 晴,杨灵娥. 基于空域正则化的模糊图像复原方法[J]. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2008, **26**(2): 6