

# 含运动物体的运动场景模糊图像恢复方法

李晋武<sup>1,2</sup>, 张娟<sup>1,2</sup>, 邹丽晖<sup>1,2</sup>

1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081

2. 自动控制系统北京市重点实验室, 北京 100081

E-mail: {20906056,zhjuan,zoulhui}@bit.edu.cn

**摘要:** 本文分析了云台相机在采集图像时产生的运动模糊现象, 为了对采集时产生的包含运动物体的场景模糊图像进行有效的恢复, 提出了一种恢复方法。首先将运动物体从场景模糊图像中提取出来, 然后对场景模糊图像和运动物体模糊图像分别采用传统恢复方法和盲图像恢复方法进行恢复, 对恢复后运动物体图像进行亮度补偿后, 再将其融合到恢复后场景图像中。实验结果表明, 该方法对含运动物体的场景模糊图像十分有效, 恢复效果良好。

**关键词:** 图像恢复; 运动模糊; 盲图像恢复; 运动物体提取

## Restoration of Motion Blurred Image in Scenes with Moving Objects

LI Jinwu<sup>1,2</sup>, ZHANG Juan<sup>1,2</sup>, ZOU Lihui<sup>1,2</sup>

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, P. R. China

2. Key Laboratory of Automatic Control System of Beijing, 100081, P. R. China

E-mail: {20906056,zhjuan,zoulhui}@bit.edu.cn

**Abstract:** This paper analyze the motion blur that occurs during the process of image sampling by the camera on Turntable. In order to effectively restore scene blurred image with moving objects which is generated in the process, a restoration algorithm is proposed. Firstly, the moving objects are extracted from the scene blurred images. Then the scene blurred images and moving objects blurred images are restored respectively by using classical restoration methods and blind restoration methods. Finally, brightness compensation is used by the restored moving objects image which would be fused into scene image. Experimental results illustrate that the proposed algorithm is effective to the scene blurred image with moving objects and the restoration result is nice.

**Key Words:** Image Restoration, Motion Blur, Blind Image Restoration, Moving Object Extraction

### 1 引言(Introduction)

在相机采集图像过程中, 由于相机与被摄物之间的相对运动, 导致图像质量的下降, 称之为运动模糊<sup>[1]</sup>。运动模糊是成像过程中一种普遍存在的现象, 在飞机、快速行驶的汽车或者宇宙飞行器上拍摄图像, 拍摄对象相对速度过快或者拍摄时抖动都会导致运动模糊的产生。运动模糊现象影响了获取的图像的质量, 对后续处理和分析带来了很大的困难, 故对运动模糊图像进行恢复成为一个重要的课题, 近年来国内外涌现出了很多的运动模糊图像恢复算法<sup>[2-6]</sup>。

目前, 大部分运动模糊图像恢复方法都是针对整个静态场景与成像装置发生相对运动所形成的场景模糊图像的, 已经形成了一些经典的常用图像恢复算法<sup>[2,3]</sup>, 如无约束最小二乘法、有约束最小二乘法方法、逆滤波、维纳滤波、最大熵复原法等, 至今仍被

广泛使用。这些经典的图像恢复算法需要得到运动模型 PSF (Point Spread Function, 点扩展函数), 但是在大部分的情况下, 运动模型 PSF 是未知的, 故产生了一种在运动模型 PSF 未知的情况下对图像进行恢复的方法—盲恢复方法。现有的运动模糊盲恢复算法<sup>[6]</sup>研究主要有两类, 一类是采取将运动模型 PSF 与恢复图像相分离, 先对 PSF 进行辨识, 然后用经典恢复算法进行恢复。另外一类是将 PSF 辨识和图像恢复同时进行, 这类方法基本上是采用迭代的方法来对 PSF 不断修正, 尽可能使恢复图像的质量达到最好。

本文对云台相机在采集图像的过程中产生的运动模糊进行分析, 研究了对采集时产生的运动模糊图像有效地进行恢复的方法。在相机采集图像的过程中, 由于云台的转动, 相机所成的图像不可避免的会产生运动模糊, 如果被摄场景内存在运动物体, 则由于运动物体与云台之间的相对运动, 会产生异于场景模糊的运动物体模糊。如果对这种图像采用传统的恢复方法进行恢复, 运动物体模糊势必得不到恢复或者

此项工作得到省部级重点基金项目基金资助, 项目批准号: 9140A17051010BQ0104

恢复质量很差,故需采用一种针对此类图像的新的恢复方法。

本文针对含运动物体的场景模糊图像进行了恢复方法的研究,提出一种新的恢复方法,具体是将运动物体从整体图像中提取出来,将其与场景模糊图像相分离,并分别对提取出的运动物体模糊图像和场景模糊图像采用不同方法进行恢复,恢复之后将二者融合成完整的图像。在以下各节中将展开介绍。

2 问题分析(Problem Analysis)

2.1 系统描述(System Description)

成像系统是由高精度云台和面阵相机组成的,如图 1 所示。工作时,高精度云台匀速转动,搭载在其上的面阵相机在云台转动的同时进行图像采集,采集到的图像序列用于后续处理。在采集过程中,由于云台的转动,相机与所摄场景存在相对运动,则不可避免的引入运动模糊,对所成图像造成影响。当云台转动速度较慢或者曝光时间较短时,所引起的图像运动模糊比较轻微,基本不影响所采图像的质量;当云台转速较快或者曝光时间较长时,所引起的图像运动模糊就不可忽视,对所采图像的质量造成严重影响,形成运动模糊图像。



图 1. 系统示意图

2.2 问题分析(Problem Analysis)

图 1 所示的成像系统在采集图像过程中所形成的运动模糊图像可分为两类:场景模糊图像和含运动物体的场景模糊图像。第一类即在云台转动过程中,相机所摄区域为静态场景,静态场景中没有运动物体,或者物体运动幅度较小,即可认为整个场景与相机产生了一致的相对运动,所形成的运动模糊图像称之为场景模糊图像;第二类即在云台转动过程中,相机所摄的静态场景中存在运动幅度较大的物体,例如在公路上疾驶的汽车,则静态场景和运动物体与相机产生了不一致的相对运动,所形成的图像称之为含运动物体的场景模糊图像,如图 2 所示。

图 2 是所采集到的道路实况图像,高精度云台由右向左转动,则场景相对于相机由左向右运动,场景中的 A 车的运动方向与场景相对于相机的运动方向相反,则它所造成的运动模糊被削弱,成像比较清晰;而 B 车的运动方向与场景相对于相机的运动方向

相同,则它所造成的运动模糊被加强,成像比静态场景更加模糊。



图 2. 模糊图像

如果对图 2 采用传统的运动模糊图像恢复算法恢复,则会造成运动物体模糊图像无法恢复或者恢复质量很差。对图 2 采用维纳滤波进行恢复,恢复后的图像如图 3 所示,由图可见虽然静态场景得以恢复,但是对于图像中的重要信息—轿车而言,恢复后质量比恢复前更差,所以对这类图像采用传统的全局运动模糊恢复算法进行恢复往往会丢失图像的主要信息,达不到图像恢复的目的,故应采用一种新的恢复方法对这类图像进行恢复。



图 3. 维纳滤波方法恢复图像

2.3 解决方案(Solution)

针对上述问题,本文采取以下的解决方案,如图 4 所示。

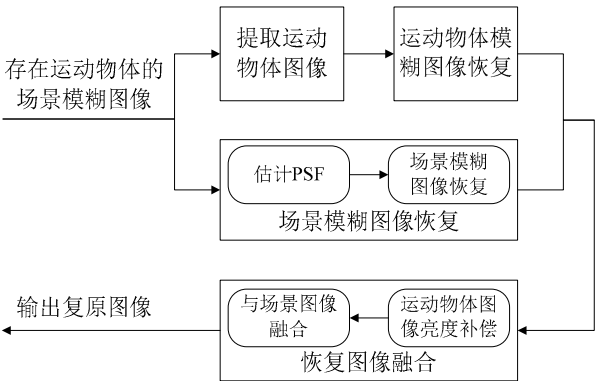


图 4. 解决方案

对于采集的含运动物体的场景模糊图像,首先将运动物体模糊图像提取出来,与场景模糊图像相分

离, 然后对提取出的运动物体模糊图像进行恢复, 同时利用系统信息估计场景模糊图像运动模型 PSF, 并采用常用恢复算法对场景模糊图像进行恢复, 恢复后对运动物体图像进行亮度补偿后再将其与场景图像相融合, 输出复原图像。本文采用的方法可避免采用传统方法恢复时无法恢复运动物体模糊图像的问题, 对图像中的静态场景和运动物体图像都进行了恢复, 避免了丢失图像的重要信息, 提高了图像整体质量。

### 3 恢复方法(Restoration Methods)

#### 3.1 运动物体图像提取 (Moving Object Image Extraction)

由于整个场景相对于相机是运动的, 并且对于运动幅度较大的运动物体, 采用帧差法可以快速方便的从图像中检测和提取运动物体, 故本文采用帧差法来提取运动物体图像。

系统所采集的序列图像中相邻帧图像是按序排列的, 考虑序列图像中的相邻帧图像  $I(t_i)$  和  $I(t_j)$ , 根据计算出的全局运动估计结果, 我们可以得出两相邻帧图像的重叠区域图像  $I'(t_i)$  和  $I'(t_j)$ , 二者相减得到差值图像  $d_{ij}$ , 对差值图像  $d_{ij}$  进行阈值化处理, 如下式所示:

$$d_{ij}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I'(x, y, t_i) - I'(x, y, t_j)| > T_g \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $(x, y)$  是  $I(t_i)$  和  $I(t_j)$  重叠区域中的点,  $T_g$  是给定的阈值。差值图像中不为 0 的像素点表明由于物体的运动导致该部位发生了可辨别的变化<sup>[8]</sup>。对阈值化处理之后的差值图像  $d_{ij}$  进行开闭运算之后再再进行水平和垂直投影, 即将差值图像的每一个像素点的灰度值水平和垂直投影在水平轴和垂直轴上, 通过对两根轴上的灰度值进行非零判断即可得出运动物体所在的矩形区域。利用得出的矩形区域, 就可把运动物体图像从场景模糊图像中提取出来。

#### 3.2 场景模糊图像恢复 (Scene Blurred Image Restoration)

根据相机信息和采集到的图像序列信息等系统信息, 可以估计出场景模糊的 PSF, 从而利用经典恢复方法对场景模糊图像进行恢复。

图像的运动模糊降质模型如下式所示:

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

式中  $f(x, y)$  是原图像,  $g(x, y)$  为运动模糊图像,  $h(x, y)$  为点扩散函数(Point Spread Function, PSF),  $n(x, y)$  为加性噪声。两边进行傅里叶变换, 得:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

式中  $G(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 、 $F(u, v)$  和  $N(u, v)$  分别表示  $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 、 $f(x, y)$  和  $n(x, y)$  的傅里叶变换。

系统在采集图像过程中, 云台是匀速转动的, 所成的运动模糊图像可等效成匀速直线运动模糊图像。设运动方向与 X 轴的夹角为  $\theta$ 。模糊长度为  $L$ , 则它的 PSF 模型可表示为下式<sup>[7]</sup>:

$$h(x, y) = \begin{cases} 1/L & y = x \tan \theta, 0 \leq x \leq L \cos \theta \\ 0 & y \neq x \tan \theta, -\infty \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (4)$$

由上式可以看出, 当模糊角度  $\theta$  和模糊长度  $L$  确定时, 即可得到确定的点扩展函数 (PSF)。

设相机采集图像的帧率为  $P$ , 曝光时间为  $T$ , 序列图像中相邻两幅图像之间的偏移量可用相位相关法求得, 设为  $(X, Y)$ , 则模糊长度  $L$  与模糊角度  $\theta$  分别为:

$$L = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{1/P} \times T = \sqrt{X^2 + Y^2} \times P \times T \quad (5)$$

$$\theta = \arctan \frac{Y}{X}$$

得到估计的 PSF 之后即可采用常用的运动模糊恢复方法来对场景模糊图像进行恢复, 本文采用了维纳滤波方法对场景模糊图像进行恢复。

#### 3.3 运动物体模糊图像恢复 (Moving Object Blurred Image Restoration)

对于提取出的运动物体模糊图像, 由于运动物体的运动信息是未知的, 无法得出准确的 PSF, 故需采用盲图像恢复算法对其进行恢复。

非负支持域递归逆滤波算法 (NAS-RIF)<sup>[9,10]</sup>是目前比较成功的盲图像恢复算法之一, 它很好的克服了盲解卷积的收敛性较差和模拟退火算法计算量太大的缺点<sup>[10]</sup>, 不过它也有一些限制条件, 比如说要求图像的背景是黑色、灰色或者是白色的, 本文采取把提取出的运动物体模糊图像叠加在一幅灰色的背景图像上形成灰色背景的运动物体模糊图像, 应用 NAS-RIF 方法来对其进行恢复。

NAS-RIF 算法的流程如图 5 所示, 其中  $u(x, y)$  为一自适应有限脉冲响应(FIR)滤波器, NL 代表一非线性滤波器, OM 代表最优化方法, 误差信号  $e(x, y)$  通过共轭梯度最小化法或最速下降法等最优化方法来调整  $u(x, y)$  的滤波器系数。

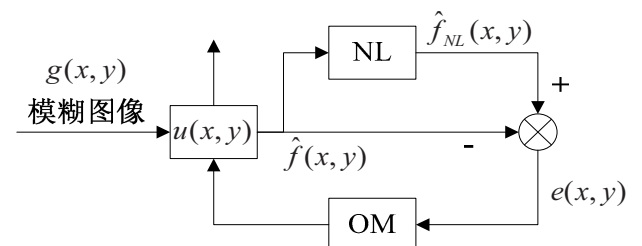


图5. NAS-RIF算法流程图



采用如下的非线性滤波器:

$$\hat{f}_{NL}(x, y) = \begin{cases} \hat{f}(x, y) & (x, y) \in U_{sup} \\ L_B & (x, y) \notin U_{sup} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $U_{sup}$  代表目标所在的支持域,  $L_B$  则是背景像素的灰度值。

在最优化解法中所用的代价函数如下<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} J(u) &= \sum_{\forall(x, y)} e^2(x, y) + \gamma [u(x, y) - 1]^2 \\ &= \sum_{(x, y) \in U_{sup}} \hat{f}^2(x, y) \left[ \frac{1 - \text{sgn}(\hat{f}(x, y))}{2} \right] + \\ &\quad \sum_{(x, y) \in \bar{U}_{sup}} [\hat{f}(x, y) - L_B]^2 + \gamma \left[ \sum_{\forall(x, y)} u(x, y) - 1 \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\bar{U}_{sup}$  是  $U_{sup}$  之外的区域, 变量  $\gamma$  则是只有在  $L_B$  为零(即背景为黑)时才有非零的值。由于本文采用的背景为灰色, 则  $\gamma = 0$ , 则上式可简化为:

$$\begin{aligned} J(u) &= \sum_{(x, y) \in U_{sup}} \hat{f}^2(x, y) \left[ \frac{1 - \text{sgn}(\hat{f}(x, y))}{2} \right] + \\ &\quad \sum_{(x, y) \in \bar{U}_{sup}} [\hat{f}(x, y) - L_B]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

由于上式的代价函数是凸的, 所以该算法保证收敛至全局最小点<sup>[9]</sup>。将图像恢复转化为代价函数优化问题, 采用共轭梯度法来优化代价函数, 当达到迭代步数或者代价函数值小于给定误差限, 即停止迭代, 输出结果。

### 3.4 恢复图像融合(Restored Images Fusion)

分别对运动物体模糊图像和场景模糊图像进行恢复后, 将恢复后图像融合在一起, 形成完整的复原图像, 根据提取运动物体图像的结果, 将恢复后的运动物体图像嵌入到场景图像里, 由于二者所采用的恢复方法的差异, 融合后必将造成图像分层的现象, 分层现象主要是由于恢复后运动物体图像和场景图像的亮度差异比较大所造成的, 故需对融合后的图像进行处理, 消除分层现象, 使整幅图像浑然一体。

为解决这一问题, 在将恢复后的图像融合之前, 以提取出的运动物体图像的平均亮度为基准亮度, 对恢复后的运动物体图像进行亮度补偿, 再将补偿过的运动物体图像与场景图像相融合。

## 4 实验结果与分析(Experimental Results and Analysis)

为了验证算法的有效性, 在 PIV2.6GHzCPU, 2G 内存的 PC 机上, 在 Win XP 系统下用 MATLAB 对算法进行编程实现, 用图 1 所示的成像系统采集道路实况模糊图像, 在 MATLAB 平台下分别采用本文方法

和采用维纳滤波 ( $k=0.1$ )、盲恢复方法对所采模糊图像进行恢复, 并采用无参考图像评价方法基于灰度平均梯度 (GMG) 方法<sup>[11]</sup>对结果进行评价。

图 6 是采集到的道路实况模糊图像, 大小为  $656 \times 494$ , 图 7、8、9 分别为图像整体采用维纳滤波方法 ( $k=0.1$ )、整体采用 NAS-RIF 方法和本文方法对图 6 进行恢复处理之后的图像。本文方法对提取出的运动物体模糊图像进行恢复时迭代次数和整体采用 NAS-RIF 方法进行盲恢复的迭代次数均为 70 次。



图 6. 模糊图像



图 7. 维纳滤波恢复图像



图 8. 盲恢复图像



图 9. 本文方法恢复图像

灰度平均梯度 (GMG) 能较好的反映图像清晰度和纹理变化特征, 尤其是图像边沿信息。GMG 值越大表示图像对应像素点的边沿越清晰, 图像的品质也越好<sup>[11]</sup>, 公式表述为:

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[f(x, y+1) - f(x, y)]^2 + [f(x+1, y) - f(x, y)]^2}{2}} \quad (9)$$

式中  $f(x, y)$  表示待评价图像的某像素点,  $f(x, y+1)$  和  $f(x+1, y)$  是该像素点的邻近像素点,  $M$ 、 $N$  分别表示图像的宽度和高度。图像边沿越清晰, 则每一像素附近的灰度值变化越大, 即 GMG 值就越大<sup>[11]</sup>。

表 1. 评价结果

待评价图像	GMG	运行时间(s)
模糊图像	2.8727	—
维纳滤波恢复图像	2.3038	0.4136
盲恢复图像	6.9666	191.5609
本文方法恢复图像	5.6356	15.6330

实验结果表明, 维纳滤波方法运行时间短, 但是恢复效果不好, 对图像中的运动物体模糊恢复效果较差。采用盲恢复方法对整幅图像进行恢复, 虽然取得了一定的效果, 但计算量很大, 实时性太差, 不太实用, 并且由于该方法不使用系统已知的先验知识, 造

成了信息资源的浪费。本文方法从恢复效果和实时性两方面考虑,充分利用系统已知的先验知识,在保证恢复效果的同时,运行时间也较短,综合这两方面考虑,本文方法优于维纳滤波和盲恢复方法。从主观的观察和表1的评价结果看,对含运动物体的场景模糊图像,采用本文方法恢复是行之有效的。

## 5 结论(Conclusion)

本文提出一种针对含运动物体的场景模糊图像的恢复方法,该方法将运动物体模糊图像从场景模糊图像中提取出来,并分别采用不同方法对场景模糊图像和运动物体模糊图像进行恢复,恢复后对运动物体图像进行亮度补偿,并将其与场景图像融合,形成完整的恢复图像。通过对采集的含运动物体的场景模糊图像进行恢复,并比较了三种不同方法的恢复效果,结果表明本文方法具有良好的恢复效果,不足之处在于算法的实时性还有待改进且分层现象尚未完全消除,下一步将就这几个问题对方法进行优化。

## 参考文献(References)

- [1] 张秉仁, 陈里铭, 高游. 运动模糊图像的降质过程分析与恢复技术研究[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(7): 815-819.
- [2] 沈岨, 李舜酩, 毛建国, 辛江慧. 数字图像复原技术综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(9): 1764-1775.
- [3] 周玉, 彭召意. 运动模糊图像的维纳滤波复原研究[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(19): 181-183.
- [4] 黎明和, 何斌, 岳继光, 秦健铭. 基于Z变换的局部匀速运动模糊图像恢复算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1193-1197.
- [5] Babacan S, Molina R, Katsaggelos A. Parameter estimation in TV image restoration using variational distribution approximation[J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2008, 17(3): 326-339.
- [6] 张航, 罗大庸. 图像盲复原算法研究现状及其展望[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(10): 1145-1152.
- [7] Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 第2版. 阮秋琦, 阮宇智译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] Zou Li-hui, Chen Jie, Zhang Juan, Lu Jing-hua. Real-Time Wide-Field Monitoring System Based on Image Mosaicing Technique and Its Application[C]// *Proceedings of the 18th IFAC World Congress. 2011: (In Press)*.
- [9] Kundur D, Hazinakos D. A novel blind deconvolution scheme for image restoration using recursive filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(2): 156-161.
- [10] 李东兴, 赵剡, 许东. 基于非负支持域递归滤波技术的湍流退化图像复原算法[J]. *宇航学报*, 2009, 30(5): 2062-2067.
- [11] 王彪, 姜志国, 赵丹培. 遥感图像运动模糊恢复方法及评价标准研究[J]. *航天返回与遥感*, 2009, 30(2): 18-25.