

文章编号 1004-924X(2011)08-1973-09

运动成像混合模糊的全变分图像复原

石明珠^{1,2}, 许廷发^{1,2*}, 张 坤^{1,2}

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 10081;

2. 北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了实现运动成像中视频帧内复原, 研究了帧内运动模糊和离焦模糊两种常见模糊类型带来的混合模糊问题。首先, 依据模糊图像的频谱特性定性判定模糊类型, 利用倒谱分析的方法定量估计模糊模型点扩散函数, 依据工程实际选取模糊参数进行仿真实验, 实现点扩散函数估计方法的准确性验证。然后, 采用耦合梯度保真项的改进型全变分图像复原算法, 约束点扩散函数估计误差对图像复原的影响, 并采用适应 L^1 范数的 Split-Bregman 算法完成复原算法的数值实现。最后, 对算法性能进行验证, 完成仿真和实拍混合模糊图像的复原。实验结果表明, 倒谱分析估计点扩散函数的准确率达到 90%。复原算法能保持图像边缘和细节, 并有效抑制振铃效应, 帧内稳像的图像峰值信噪比为 28.92 dB。

关键词: 运动模糊; 离焦模糊; 倒谱; 全变分图像复原; 梯度保真项

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1973

Total variation image restoration for mixed blur in moving image

SHI Ming-zhu^{1,2}, XU Ting-fa^{1,2*}, ZHANG Kun^{1,2}

(1. School of Optics and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of the Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: ciom_xtf1@bit.edu.cn

Abstract: In order to restore the image in the video frame of a moving image, the mixed blur that combines two common blur types, motion blur and defocus blur, was discussed. Firstly, blur types were determined according to the difference in spectrum features and the Point Spread Function (PSF) was estimated quantitatively using the cepstrum analysis. Blur parameters in simulation experiments were chosen based on engineering to verify the accuracy of the cepstrum analysis in the PSF estimation method. Then, a gradient fidelity term was coupled with total variation image restoration algorithm to constrain the impact of the PSF estimation error on image restoration and the Split-Bregman algorithm that is compatible with the L^1 norm was adopted to accomplish the numerical computing in restoration algorithm. Finally, the simulation experiments and the real image restoration were carried to verify the performance of the algorithm. The results show that cepstrum analysis for estimating the PSF has

收稿日期: 2011-06-09; **修订日期:** 2011-07-01.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB72400603); 国家自然科学基金重点项目 (No. 61027002); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60972100)

an accuracy rate of 90%. The proposed algorithm can preserve edges and details, inhibit the ringing effect effectively and shows its Peak Signal to Noise Rate (PSNR) to be 28.92 dB.

Key words: motion blur; defocus blur; cepstrum; Total Variation (TV) image restoration; gradient fidelity term

1 引言

当摄像机在成像过程中的曝光时间内发生快速移动时,图像在一帧内的位移会超过一个像素,易造成动态图像的帧内模糊现象。这种由相机运动引起的图像帧内模糊,每一帧图像都是模糊的,即图像函数整个空间均被模糊了,需要对图像逐帧进行去模糊处理。帧内复原方法分为两步:首先,估计出模糊模型的点扩散函数(Point Spread Function, PSF);然后,根据图像退化的逆过程,在 PSF 指导下采用相应的图像复原算法进行复原。模糊模型 PSF 的不准确估计会导致复原图像存在振铃效应、伪影等现象^[1],严重影响了复原图像的质量,尤其表现在需要在频域中完成的复原算法上,如维纳滤波、最小二乘法 and Lucy-Richardson (L-R) 迭代算法等。因此,准确得出模糊模型的 PSF,并有效选择图像复原算法成为运动成像混合模糊图像复原的关键。

针对帧内模糊,主要考虑两种最常见模糊类型:运动模糊和离焦模糊,这两种模糊类型的频域特征差异明显,容易鉴别,但是对于两者共同作用的混合模糊,其频谱是两种模糊特征的混叠,难以辨识。近年来,涌现出多种鉴别模糊类型、模糊模型 PSF 的方法^[2-5]和运动成像图像复原算法^[6-8],但是多数只是针对某一特定的模糊类型,所应用的图像复原算法只能解决特定的问题,有一定的局限性,难以解决混合模糊的情况,特别是在模糊参数难以辨识,模糊类型的 PSF 估计误差不可避免的情况下。本文利用倒谱分析的方法定量估计模糊类型的 PSF。提出了一种耦合梯度保真项的全变分(Total Variation, TV)图像复原方法。在复原算法的数值实现上,采用适合解决 L^1 正则化且收敛速度快的 Split-Bregman 算法。

2 帧内运动混合模糊模型及其 PSF 估计

运动图像的退化过程可以用图 1 所示模型来描述:

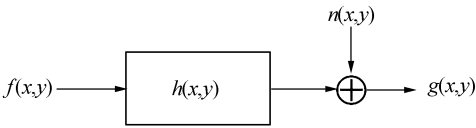


图 1 图像的退化模型
Fig. 1 Image degradation model

其中, $g(x,y)$, $f(x,y)$ 和 $h(x,y)$ 分别表示模糊图像、原始图像和退化模型的 PSF, $n(x,y)$ 为加性噪声。假设退化系统为线性空间不变系统,可用公式表示为:

$$g(x,y)=f(x,y)*h(x,y)+n(x,y) \text{ , (1)}$$

在本文中,除非特殊声明,忽略噪声项。傅里叶变换形式为:

$$G(u,v)=H(u,v)F(u,v) \text{ , (2)}$$

图 2 为运动成像模糊帧内复原流程图,主要分为 PSF 估计和耦合梯度保真项的全变分模糊图像复原两个主要步骤。

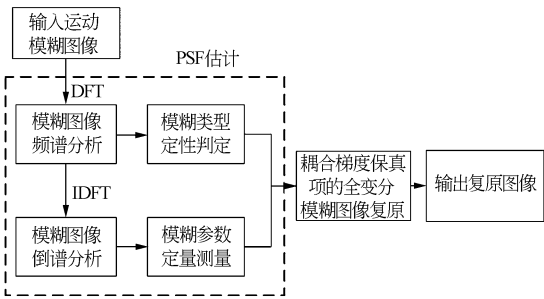


图 2 运动成像模糊复原流程图
Fig. 2 Block diagram of blur image restoration in motion imaging

2.1 模糊类型

针对帧内模糊的两种形式:离焦模糊和运动模糊,以及二者产生的混合模糊进行分析。

2.1.1 离焦模糊

离焦模糊 PSF 定义为一个对称的圆形区域,在连续域定义为:

$$h_d(x,y)=\begin{cases} 1/\pi r^2 & \sqrt{x^2+y^2}\leq r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

其傅里叶变换为一阶第一类贝塞尔函数,表示为:

$$H_d(u,v)=F[h_d(x,y)]=2\pi r \frac{j_1(r\sqrt{u^2+v^2})}{\sqrt{u^2+v^2}}. \quad (4)$$

2.1.2 运动模糊

为方便分析,假设运动模糊图像的模糊长度为 L ,模糊角度,运动模糊 PSF 定义为:

$$h_m(x,y)=\begin{cases} 1/L & \sqrt{x^2+y^2}\leq L/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

其傅里叶变换为 sinc 函数,表示为:

$$H_m(u,v)=F[h_m(x,y)]=\frac{\sin(\pi L\omega)}{\pi L\omega}, \quad (6)$$

式中: $x/y=-\tan \theta, \omega=ucos \theta+v\sin \theta$, sinc 函数零值发生在 $\omega=\pm 1/L, \pm 2/L, \dots$

2.1.3 混合模糊

由上述分析知,混合模糊 PSF 为:

$$h(x,y)=h_d(x,y)*h_m(x,y), \quad (7)$$

其傅里叶变换为:

$$H(u,v)=H_d(u,v)H_m(u,v). \quad (8)$$

2.2 PSF 参数倒谱估计

图像的倒谱通常用下式计算:

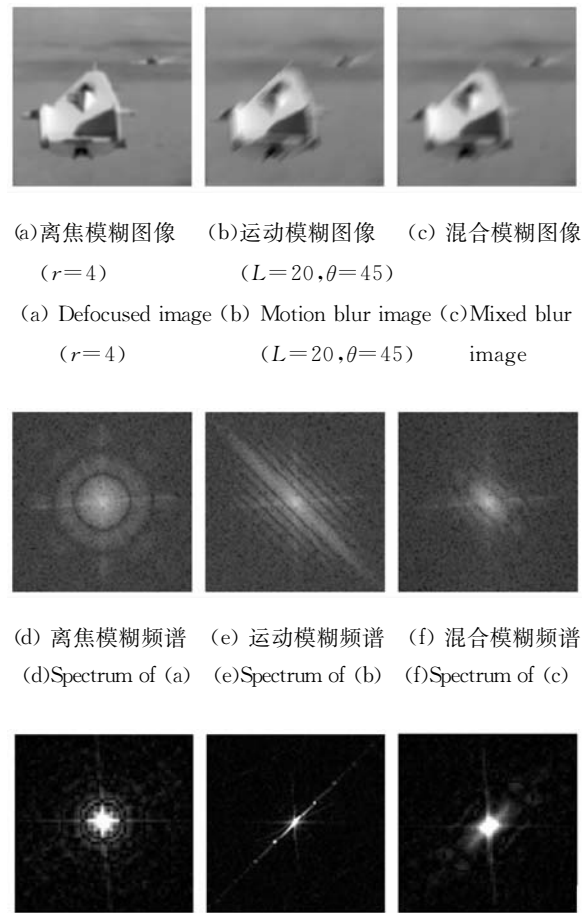
$$C_g(p,q)=F^{-1}\{\lg(1+|G(u,v)|)\}, \quad (9)$$

在实际工程应用中,采用如下定义:

$$C_g(p,q)=F^{-1}\{||\lg(1+|G(u,v)|)|^2\}. \quad (10)$$

图 3 为 Lifting Body 在各模糊模型作用下的图像及其频谱和倒谱图。图 3(a)为模糊半径为 4 像素的离焦模糊图像;图 3(b)为运动模糊图像,其中模糊距离为 20 像素,模糊角度为 45° ;图 3(c)为混合模糊图像。从图 3(d)和图 3(e)中可以看出,离焦模糊和运动模糊在频域中有较明显的特征,同心圆环的半径反映了离焦的程度,平行条

纹的间距反映了运动模糊的模糊距离,其垂直方向为运动模糊方向,图 3(f)中综合了两个模型的特性。如图 3(g)所示,离焦模糊的倒谱是一系列能量不断衰减的周期性圆环,第一个中心圆的半径通常等于 $2r-1$ 。图 3(h)中,运动模糊的倒谱在其运动方向上有不断衰减的周期性亮点出现,其中最近的亮点到中心的距离通常等于运动模糊距离 L 。混合模糊的倒谱如图 3(i)所示,离焦模糊的特征圆被弱化,运动模糊特征部分被保留。



(g) 离焦模糊倒谱 (h) 运动模糊倒谱 (i) 混合模糊倒谱
(g)Cepstrum of (a) (h)Cepstrum of (b) (i)Cepstrum of (c)

图 3 模糊图像及其频谱、倒谱图
Fig.3 Spectra and cepstra of blur images

本文采用倒谱进行 PSF 参数辨识的过程如下:

- (1)对倒谱图进行 Radon 变换来鉴别运动模糊的方向 θ ;
- (2)将倒谱图旋转 θ 角,使其转换成在水平方向上的运动模糊,从而进行模糊距离的鉴别。倒

谱具有中心对称性,可以只考虑右半部分,由中心到第一个亮点的距离为运动模糊距离 L ;

(3)在倒谱图中,沿着 $\theta+90^\circ$ 方向检测离中心最近的亮点到中心的距离 R ,离焦模糊半径 $r=(R+1)/2$ 。

混合模糊倒谱鉴别参数的结果如图 4 所示,图 4(a)为运动模糊方向鉴别结果,根据 Radon 变换检测直线的原理可知,最高亮度处对应的角度即为运动模糊角度, $\theta'=45^\circ$;图 4(b)为图 3(i)中倒谱图在运动方向上像素分布,鉴别运动模糊距离 $L'=19$,存在鉴别误差;图 4(c)为倒谱图垂直运动方向上为像素分布,中心到第一个亮点的距离 $R=7$,则离焦半径 $r'=4$ 。

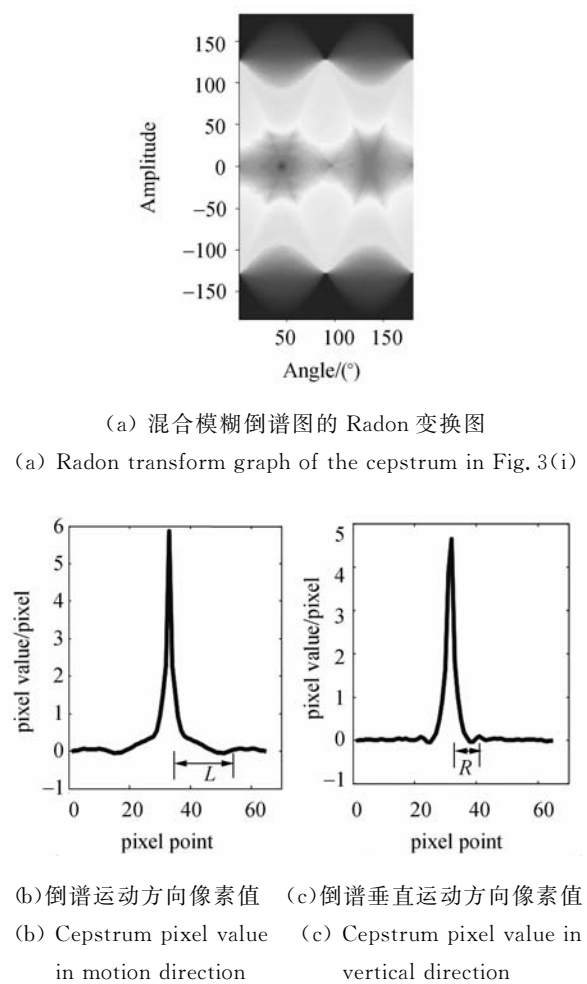


图 4 混合模糊的 PSF 参数鉴别

Fig. 4 Identification of PSF parameters of mixed blur

为验证该方法的准确性,依据工程实际选择模糊参数范围,进行了大量的仿真实验,鉴别结果统计如表 1 所示。

表 1 倒谱法鉴别 PSF 参数结果统计		
Tab. 1 Results of PSF parameters using cepstrum		
鉴别范围	正确鉴别率	最大鉴别绝对误差
$0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	90 %	2°
$5 \leq L \leq 40$	90 %	2
$0 \leq r \leq 8$	95 %	1

3 耦合梯度保真项的全变分图像复原

在实际应用中,针对某一项具体的图像复原任务,模糊模型的 PSF 很难得到绝对精确的估计,这样势必会影响后续图像复原的效果。因此,选择合适的图像复原算法成为图像复原一直以来的研究热点。为了改善模糊模型 PSF 估计不准带来的图像复原问题,本文提出一种耦合梯度保真项的全变分图像复原方法。

3.1 全变分图像复原模型

本文提出的耦合梯度保真项的全变分图像复原模型的能量泛函为:

$$E(f) = \int |\nabla f| \, d\Omega + \lambda \int [h * f - g]^2 \, d\Omega + \alpha \int \|\nabla f - \nabla g\|^2 \, d\Omega, \quad (11)$$

其中,第一项为变分项,采用具有较强保护边缘能力的 L^1 范数 $\int |\nabla g|$;第二项为数值保真项,描述的是待复原图像与理想图像在能量强度上的一致性;第三项为梯度保真项,使得图像的梯度变化尽量一致。可以证明梯度保真项的引入不会改变复原模型全局最优解得存在性和唯一性^[9]。对于引入梯度保真项的作用以及复原模型的参数选取准则,作者已在文献[10]中阐明,此处不再赘述。

通过泛函求变分,得到其 Euler-Lagrange 方程为:

$$-\operatorname{div}\left(\frac{\nabla f}{|\nabla f|}\right) + \lambda h * (h * f - g) + \alpha(\Delta f - \Delta g) = 0. \quad (12)$$

可采用多种数值算法求解这一 Euler-Lagrange 方程,如人工时间演化法^[11]、线性固定点算法^[12]、原始对偶算法^[13]等。然而这些传统数值算法存在收敛速度慢、迭代次数多的问题,计算效率较低。为简化实现和提高计算效率,本文利用

Split-Bregman 算法收敛速度快和适合解决 L^1 正则化问题的优点^[14],实现全变分最小化的求解。Split-Bregman 算法使得基于变分法的图像复原模型对简化计算和处理质量都有很大的提高^[15-18]。

$$E(f^{n+1}, w^{n+1}) = \int (|\omega_1| + |\omega_2|) d\Omega + \lambda \int [h * f - g]^2 d\Omega + \alpha \int \|w - \nabla g\|^2 d\Omega + \frac{1}{2\beta} \int (w - \nabla f - b^{n+1})^2 d\Omega, \tag{13}$$

其中 $\frac{1}{2\beta} \int (w - \nabla f - b^{n+1})^2 d\Omega$ 为引入的二次惩罚项。

该能量泛函的极值问题通过交替迭代实现,相应子能量泛函为:

$$E_1(w^{n+1}) = \int (|\omega_1| + |\omega_2|) d\Omega + \alpha \int \|w - \nabla g\|^2 d\Omega + \frac{1}{2\beta} \int (w - \nabla f - b^{n+1})^2 d\Omega, \tag{14}$$
$$E_2(f^{n+1}) = \lambda \int [h * f - g]^2 d\Omega + \frac{1}{2\beta} \int (w - \nabla f - b^{n+1})^2 d\Omega. \tag{15}$$

分别求各子能量泛函的 Euler-Lagrange 方程,对变量 w 的 Euler-Lagrange 方程为:

$$w_i^{n+1} = (\nabla f + b^{n+1} + 2\alpha\beta\Delta g)_i - \beta(1 + 2\alpha) \frac{w_i}{|w_i|}, \tag{16}$$

其中, $i=1,2; (\nabla f)_2 = f_y$, 由收缩算子^[19]得到解为:

$$w_i^{n+1} = shrink((\nabla f + b^{n+1} + 2\alpha\beta\Delta g)_i, \beta(1 + 2\alpha)), \tag{17}$$

对变量 f 的 Euler-Lagrange 方程为:

$$(\lambda\beta h^T h - \Delta) f^{n+1} = \lambda\beta h^T g + \nabla \cdot b^{n+1} - \nabla \cdot w, \tag{18}$$

此方程的求解采用半隐式差分格式的 Gauss-Seidel 迭代算法。

- 算法的数值实现步骤为:
- (1)初始化: $n=0, f^0 = (g_x, g_y)^T, b^0 = 0$;
 - (2)迭代:对求得的子能量泛函的 Euler-Lagrange 方程按下式迭代更新:
- $$b^{n+1} = b^n + \nabla f^n - w^n, \tag{19}$$
- (3)重复过程(2),至 $|g^{n+1} - g^n| \leq \text{tol}$ 时,迭代停止。通常设 $\text{tol} = 10^{-3}$ 。

4 实验结果与分析

4.1 仿真实验

利用上文中对 LiftingBody 图像被混合模糊

3.2 Split-Bregman 算法的数值实现

引进辅助变量 $w = (\omega_1, \omega_2)^T, \omega_1 = f_x, \omega_2 = f_y$ 和 Bregman 迭代参数 $b = (b_1, b_2)^T, b^{n+1} = b^n + \nabla f^n - w^n$, 当 $|\nabla f| \approx |f_x| + |f_y|$ 时,式(11)转化为如下的等价形式:

作用时估计出的 PSF 进行复原,各种复原算法的效果如图 5 所示。

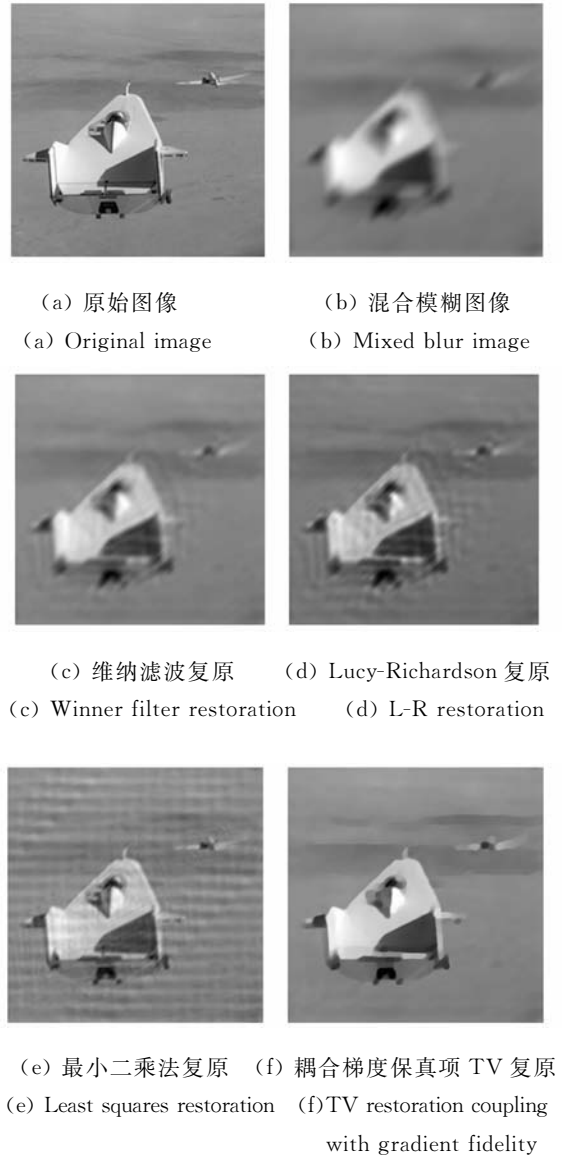


图 5 各复原算法复原效果
Fig. 5 Images restored by kinds of algorithms

仿真结果表明,当 PSF 存在估计误差时,维纳滤波、Lucy-Richardson 迭代方法以及最小二乘

法都有不同程度的振铃效应,本文提出的算法能够很好地保护图像锐利边缘和细节,并在一定程度上抑制振铃效应,取得了较好的视觉效果。

为了说明问题,针对不同类型的 PSF 估计误差进行仿真实验,以峰值信噪比(Peak Signal to Noise Rate, PSNR)作为算法效果评价的度量。其中,定义:

误差 Δ =真实值-测得值 . (20)

所得结果如表 2 所示。

表 2 PSF 存在误差时各复原算法所得 PSNR(dB)
Tab.2 Restored PSNR of kinds of algorithms using error PSF

误差类型 ($\Delta r, \Delta L, \Delta \theta$)	维纳 滤波	L-R 滤波	最小二 乘法	全变分
(0,0,0)	22.20	27.13	26.40	29.60
(1,0,0)	7.67	27.12	25.45	28.50
(0,1,0)	13.68	27.03	18.44	28.92
(0,0,1)	18.85	27.05	27.57	29.40
(1,1,0)	7.07	26.85	18.87	28.09
(0,1,1)	9.69	26.87	23.34	28.53
(1,0,1)	7.39	27.05	26.27	28.48
(1,1,1)	6.46	26.78	22.68	27.76

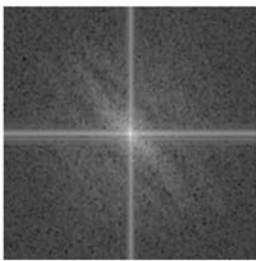
4.2 实拍模糊图像的复原

此实拍图像没有任何先验信息,利用本文提出的方法进行复原。

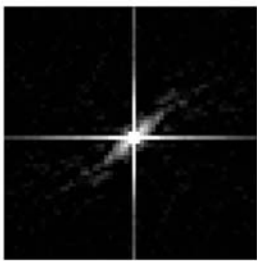
首先,利用实拍模糊图像进行倒谱分析,从而估计模糊模型的 PSF,如图 6 所示。由图 6(b)可知,依据灰度模糊图像频谱图仅能判断出图像存在运动模糊,同时还存在其他形式的模糊;图 6(c)中的倒谱图给出运动模糊的模糊方向和模糊长度的信息,且发生了少许扩散,初步断定存在离焦模糊,依据所能获取的信息,考虑混合模糊;对倒谱图进行 Radon 变换,鉴别运动模糊方向,如图 6(d)所示;为了方便观察,做出Radon变换的



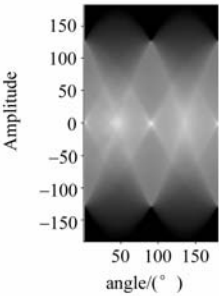
(a) 原始模糊图像
(a) Original blur image



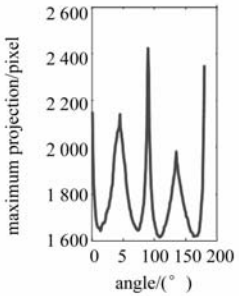
(b) 灰度模糊图像频谱图
(b) Spectrum of grayscale (a)



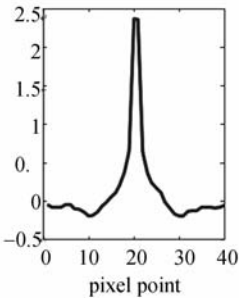
(c) 灰度模糊图像倒谱图
(c) Cepstrum of grayscale (a)



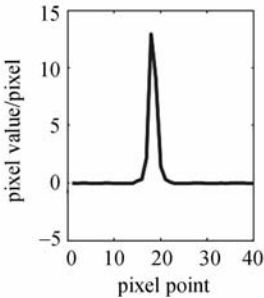
(d) 倒谱的 Radon 变换图
(d) Radon transform graph of (c)



(e) Radon 变换极值投影曲线
(e) Projection curve of maxima in Radon transform graph



(f) 倒谱图运动方向上像素
(f) Cepstrum pixel value in motion direction



(g) 倒谱图垂直运动方向上像素分布
(g) Cepstrum pixel value in vertical direction

图 6 实拍图像模糊模型的 PSF 估计

Fig.6 PSF identification of real blur images

极值投影曲线,如图 6(e)所示,忽略 0°,90°和 180°处极值点,可得运动模糊角度为 45°;由图 6(f)和图 6(g)中倒谱在运动方向和垂直运动方向的像素分布情况可以得出,运动模糊距离为 10 pixel,模糊半径为 2 pixel。

利用估计出的 PSF 进行图像复原,各复原算法所得复原图像如图 7 所示,对比可得,本文提出

的耦合梯度保真项的全变分复原算法,在保护图像边缘和细节的同时抑制了振铃效应,有更好的复原效果。

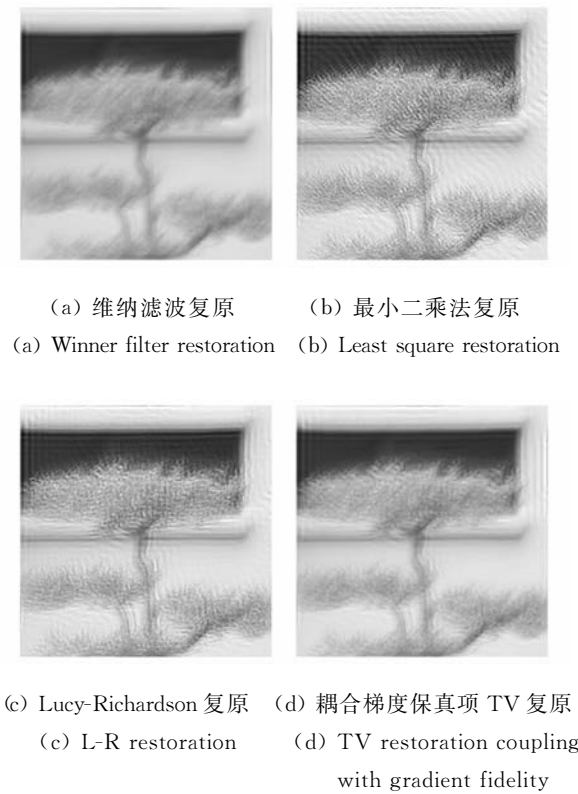


图 7 实拍模糊图像的复原效果

Fig. 7 Images restored by kinds of algorithms

参考文献:

[1] 王永攀,冯华君,徐之海,等. 模糊核估计不准确下的振铃效应修正[J]. 光电工程, 2009,36(8):105-111.

WANG Y P, FENG H J, XU ZH H, *et al.*. Reducing impact of the ring artifacts under the condition of the inaccurate blurring kernel[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(8): 105-111. (in Chinese)

[2] 段彩艳,李一民,潘晓露,等. 基于频谱分析的退化图像模糊类型识别[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2009,31(S2):9-11.

DUAN C Y, LI Y M, PAN X L, *et al.*. Blur identification of the degraded images based on Fourier analysis[J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2009, 31(S2): 9-11. (in Chinese)

[3] 许元男,赵远,刘丽萍,等. 基于双谱的点扩展函数

5 结 论

本文研究了运动成像中最为常见的两种模糊类型,运动模糊和离焦模糊,带来的帧内运动模糊图像复原方法。利用倒谱分析法估计模糊模型 PSF,根据工程实际选择模糊参数进行仿真实验,准确度达 90%。考虑到在具体的图像复原任务中,任何点扩散函数的估计方法都可能存在估计误差,提出了一种耦合梯度保真项的全变分复原算法。实验结果表明,该复原算法能够有效保护图像边缘和细节,并在一定程度上抑制了振铃效应,即使是在 PSF 存在估计误差的情况下也能获得较好的复原效果,峰值信噪比达 28.92 dB。尽管本文的方法对于解决复杂运动平台成像条件下是有一定局限性的^[20], (因为导致帧内模糊的因素多种多样,模糊模型的建立十分困难,仅仅依靠模糊图像本身难以较难模糊类型),但是对于大多数工程应用具有实用价值,而对于复杂运动平台下的模糊图像复原,无需确定模糊类型和鉴别模糊参数,直接估计 PSF 将是图像复原进一步研究的方向^[21]。

参数辨识[J]. 光电工程, 2009,36(5):72-76.

XU Y N, ZHAO Y, LIU L P, *et al.*. Bispectrum-based parameter identification of the point spread function [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(5):72-76. (in Chinese)

[4] 赵琳,金伟其,黄有为,等. 离焦模糊图像超分辨率盲复原算法分析[J]. 光学技术, 2010,36(1):75-78.

ZHAO L, JIN W Q, HUANG Y W, *et al.*. Analysis on super-resolution blind restoration algorithm of defocus blurred image [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(1):75-78. (in Chinese)

[5] 郭永彩,郭瑞瑞,高潮. 运动模糊图像点扩展函数的参数鉴别[J]. 仪器仪表学报, 2010,31(5):1052-1057.

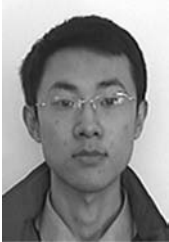
GUO Y C, GUO R R, GAO CH. Identification of blur parameters from motion blurred images [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5):1052-1057. (in Chinese)
- [6] 王晶, 李仕. 运动模糊视频图像在图形处理器平台上的实时恢复[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(10): 2262-2268.
- WANG J, LI SH. Real-time restoration of motion-blurred video images on GPU [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2262-2268. (in Chinese)
- [7] DOBES M, MACHALA L. Blurred image restoration: a fast method of finding the motion length and angle [J]. *Digital Signal Processing*, 2010, 20(6):1677-1686.
- [8] KANO H, HATANAKA H, FUKUMOTO S, *et al.*. Motion blur estimation of handheld camera using regular- and short-exposure image pair [C]. *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Image Processing, Cairo, Egypt: ICIP*, 2009:1309-1312.
- [9] ZHANG L X, XIA D SH. Staircase effect alleviation by coupling gradient fidelity term [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(8):1163-1170.
- [10] SHI M ZH, XU T F. Adaptive total variation image restoration coupling with a gradient fidelity term [C]. *Proceedings of the Third International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, Yantai, P. R. China: CISP, 2010:821-825.
- [11] RUDIN L, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D*, 1992, 60:259-268.
- [12] VOGEL C R, OMAN M E. Iterative methods for total variation denoising [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1996, 17(1):227-238.
- [13] CHAN T F, GOLUB G H, MULET P. A nonlinear primal-dual method for total variation-based image restoration [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1998, 20(6):1964-1977.
- [14] GOLDSTEIN T, OSHER S. The split bregman method for L1-regularized problems [J]. *SIAM Journal on Imaging Science*, 2009, 2(2):323-343.
- [15] LIU X W, HUANG L H. Split bregman iteration algorithm for total bounded variation regularization based image deblurring [J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2010, 372(2): 486-495.
- [16] SETZER S, STEIDL G, TEUBER T. Deblurring poissonian images by split bregman techniques [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2010, 21(3):193-199.
- [17] MING L. A fast algorithm for color image enhancement with total variation regularization [J]. *Science China-Information Science*, 2010, 53(9): 1913-1916.
- [18] CAI J F, OSHER S, SHEN Z W. Split bregman methods and frame based image restoration [J]. *Multiscale Modeling and Simulation*, 2009, 8(2): 337-369.
- [19] YI D, LEE S. Fourth-order partial differential equations for image enhancement [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 175: 430-440.
- [20] 李仕, 张葆, 孙辉. 航空多重模糊图像的恢复[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(5): 1161-1170.
- LI SH, ZHANG B, SUN H. Restoration of aerial multiple blurred images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1161-1170. (in Chinese)
- [21] 张玉叶, 周晓东, 王春歆. 应用像素运动模糊特征分割的空间移变降质复原[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(5):1119-1126.
- ZHANG Y Y, ZHOU X D, WANG CH X. Space-variant blurred image restoration based on pixel motion-blur character segmentation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1119-1126.

作者简介:



石明珠(1985—),女,山东菏泽人,博士研究生,2008 年于西安工业大学获得学士学位,研究方向为高分辨率光学遥感运动成像图像复原、多模式电子稳像算法技术及硬件实现。E-mail: shimingzhu1@163.com



张 坤(1982—),男,河北三河人,博士研究生,主要从事图像处理与电子稳像软件算法及硬件实现的研究。E-mail: 508740368@qq.com

通讯作者:



许廷发(1968—),男,黑龙江肇东人,教授,博士生导师,主要从事光电成像探测与识别等方面的研究。Email: ciom_xtf1@bit.edu.cn

● 下期预告

空间相机颤振成像 MTF 及仿真实验研究

张 影

(长春理工大学,吉林 长春 130022)

研究了空间相机颤振与成像调制传递函数(MTF)下降的关系,以实现对卫星平台力学环境的合理约束。通过理论分析,建立了基于统计矩方法的颤振传递函数的数学模型,可实现特定函数振动和已知振动曲线情况下 MTF 下降曲线的计算。针对某空间相机,利用 MATLAB 软件的图形用户接口(GUI)编制了颤振成像 MTF 计算软件,计算了在包含随机噪声的正弦型振动情况下,不同振动幅值和频率对应的 MTF 值。得出该相机对于平台颤振的要求应在 0.04 ms 积分时间内使振动角幅值小于 0.05",并避免相机产生 200 Hz 以上的振动。通过半物理仿真实验,对非函数形式的任意振动导致的传递函数下降进行了分析,在图像的像质退化与振动传递函数之间建立了联系。通过图像分析的方法计算了传递函数,与数学模型计算得到的传递函数趋势一致。