

用于计算成像系统的基于信噪比自适应估计的图像去模糊研究

卢惠民 徐明 李迅

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 实现有效的图像去模糊对提高基于球面光学的计算成像系统性能具有极为重要的意义。分析了球面光学系统中的成像模糊模型,并介绍了基于维纳去卷积的图像去模糊算法。针对基于维纳去卷积的图像去模糊需要准确地估计模糊图像信噪比的问题,提出了一种新的基于图像去噪的图像信噪比自适应估计算法。分别使用 Zemax 光学仿真软件获得的图像和研制的基于球面光学的计算成像系统原理样机获得的图像开展实验研究,结果表明提出的算法能准确地估计出模糊图像的噪声方差和信噪比,利用估计得到的信噪比,使用维纳去卷积能得到比较理想的图像去模糊结果。因此,结合提出的方法,基于球面光学的计算成像系统能得到清晰的高分辨率图像。

关键词 图像处理;计算成像;信噪比估计;维纳去卷积;去模糊

中图分类号 TP391; TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0810002

Image Deblurring with Adaptive Signal-Noise Ratio Estimation for Computational Imaging System

Lu Huimin Xu Ming Li Xun

(School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract It is significant to realize effective image deblurring for improving the performance of the computational imaging system based on spherical optics. The image blurring model in the spherical optics is analyzed, and the image deblurring algorithm based on Wiener deconvolution is introduced. To deal with the problem that the signal-noise ratio (SNR) should be estimated accurately in the image deblurring based on Wiener deconvolution, a novel adaptive SNR estimation algorithm based on image denoising is proposed. The experiments are performed using the images acquired by Zemax software and the implemented prototype of the computational imaging system based on spherical optics. The results show that the noise variance and SNR can be estimated with high accuracy by using the proposed algorithm, and good image deblurring results can be achieved using Wiener deconvolution with the adaptively estimated SNR, so the clear and high resolution images can be acquired by the computational imaging system based on spherical optics after integrating the work presented.

Key words image processing; computational imaging; signal-noise ratio estimation; Wiener deconvolution; image deblurring

OCIS codes 100.1830; 100.2000; 110.1758

1 引言

在很多光学系统应用中视场角和分辨率是两个非常重要的性能指标^[1]。传统光学成像中,要提高

成像分辨率,往往需要减小视觉系统的视场角。此外,受几何像差的影响,即使选用长焦距的镜头和大尺寸的电荷耦合器件(CCD)/互补金属氧化物半导

收稿日期: 2014-03-07; 收到修改稿日期: 2014-04-03

基金项目: 国家 863 计划(2013AAxxxx024K)

作者简介: 卢惠民(1980—),男,博士,讲师,主要从事计算机视觉、图像处理、智能机器人等方面的研究。

E-mail: lhmnew@nudt.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

体(CMOS)靶面,光学系统成像上仍存在极限分辨率的限制^[2]。而小视场高分辨率扫描成像、鱼眼透镜全景成像、折反射式全景成像等传统的大视场光学系统也存在着各自的缺点,如小视场高分辨率扫描成像需要使用扫描机构^[3-4],会导致系统成像实时性降低,且该系统只是在维持原有摄像机成像空间分辨率的情况下,增大系统的观察视场角,即无法提高系统的成像空间分辨率;鱼眼透镜全景成像和折反射式全景成像虽可实现超过 180°的大视场成像,但其成像存在较大的畸变,更重要的是这种系统成像空间分辨率大大降低^[5-6]。

近年来,基于球面光学的计算成像技术突破了传统光学成像中极限分辨率的限制,同时为实现光学系统的大视场和高成像空间分辨率提供了一条有效的途径^[7-8]。在美国国防部高级研究计划局(DARPA)的支持下,Cossairt 等^[2,7]对这种计算成像进行了深入的理论分析,并研制实现了 10 亿像素级的大视场、高分辨率成像系统原理样机。由于球面像差的存在,球面光学系统所获得的图像是模糊的,需要进行去模糊处理以获得清晰的高分辨率图像。目前有研究表明,在球面光学成像系统中,球面像差造成的点扩散函数(PSF)是正态和可逆的,即球面像差造成的图像模糊可以依据计算成像理论去除^[2,7]。对基于球面光学的计算成像系统来说,其成像分辨率取决于去模糊误差。因此,设计实现有效的图像去模糊算法对提高计算成像系统的性能具有极为重要的意义。

2 图像模糊模型和基于维纳去卷积的图像去模糊算法

2.1 球面光学系统中的图像模糊模型

所讨论的球面光学系统成像示意图如图 1 所示,其中 CCD/CMOS 传感器阵列共用一个球形主透镜,平行光经过球形主透镜折射后成像于传感器。系统视场角的大小取决于传感器阵列中的传感器数量。当球形主透镜直径为 100 mm,材质选用 K9 玻璃,孔径光阑直径为 12 mm 时,球形主透镜的焦距为 73.4 mm。通过 Zemax 光学仿真软件,可得该系统的光学传递函数(MTF)曲线如图 2 所示。通过该软件,还可得到该系统成像时的点扩散函数,并仿真模拟出成像效果。当选用的 CCD 或 CMOS 的尺寸为 1/2 inch(1 inch=2.54 cm),像素大小为 3.2 μm 时,可得到该系统的 PSF 如图 3 所示,该 PSF 可表示为一个二维矩阵。当 Zemax 进行成像仿真时选择

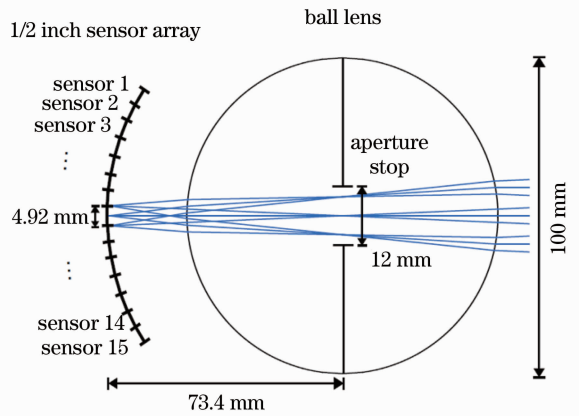


图 1 球面光学系统成像示意图

Fig. 1 Imaging sketch of the spherical optical system

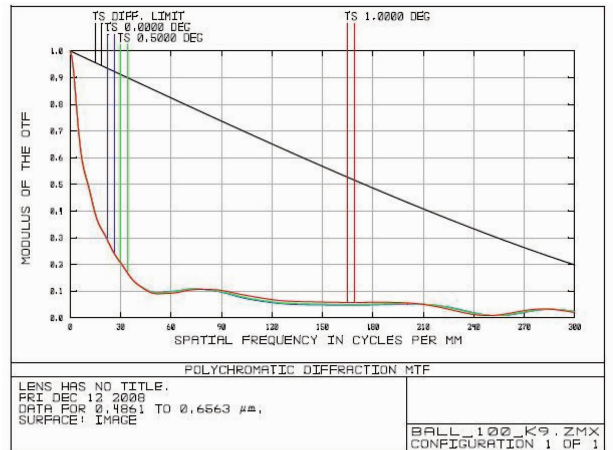


图 2 图 1 所示球面光学系统的光学传递函数 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curve of the spherical optical system in Fig. 1

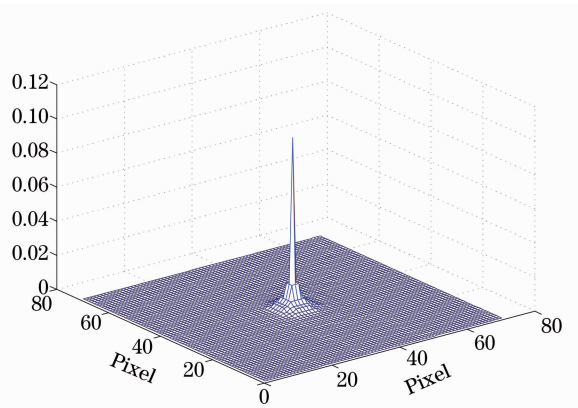


图 3 图 1 所示球面光学系统的点扩散函数 PSF

Fig. 3 Point spread function of the spherical optical system in Fig. 1

的源场景图像如图 4(a)所示时,该球面光学系统仿真输出的图像如图 4(b)所示。图 4(b)中的图像较图 4(a)产生了明显的模糊,这主要是由球面光学系统成像中的球面像差造成的。上述图像模糊过程可表示

为源图像与该系统的点扩散函数 PSF 的卷积，

$$I_B = I_O * \mathbf{H}_{psf}, \quad (1)$$

式中 I_B 为所成模糊图像(无噪声情况下), I_O 为理想无模糊图像或者源图像, \mathbf{H}_{psf} 为点扩散函数 PSF 矩阵, $*$ 表示卷积运算。由于在球面光学系统的实

际成像过程中,还会不可避免的引入噪声,因此球面光学系统的成像模糊模型可描述为

$$I_R = I_B + I_n = I_O * \mathbf{H}_{psf} + I_n, \quad (2)$$

式中 I_R 为球面光学系统实际输出的模糊且带噪声的图像, I_n 为成像过程中引入的噪声。

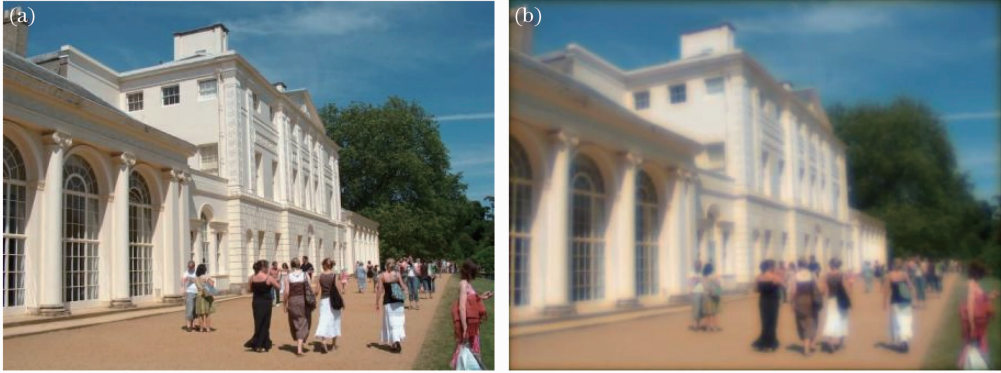


图 4 (a) Zemax 进行成像仿真时选择的源场景图像; (b) 球面光学系统仿真输出的图像
Fig. 4 (a) Source image used in the imaging simulation by Zemax; (b) acquired image from the spherical optical system simulated by Zemax

2.2 基于维纳去卷积的图像去模糊算法

由于球面光学系统存在如(2)式所示的成像模糊模型,因此需要使用图像去模糊算法恢复出清晰

的图像。图像去模糊的目的是尽可能精确地得到对 I_O 的估计 \hat{I}_O 。维纳去卷积能以最小均方误差实现图像去模糊^[9],即找到一个合适的去卷积滤波器矩



图 5 (a) 对图 4(b) 中的模糊图像使用维纳去卷积的结果; (b) 对图 4(b) 中的模糊图像加入均值为 0, 方差为 0.001 的高斯白噪声后的图像; (c) 维纳去卷积滤波器中的 N 为 0 时, 对图 5(b) 去模糊的结果; (d) 维纳去卷积滤波器使用正确的信噪比时, 对图 5(b) 的去模糊结果

Fig. 5 (a) Result of deblurring Fig. 4(b) using Wiener deconvolution; (b) result after adding the Gaussian white noise with 0 mean and 0.001 variance into Fig. 4(b); (c) result of deblurring Fig. 5(b) when N in the Wiener deconvolution filter is set to be 0; (d) result of deblurring Fig. 5(b) when the correct SNR is used in the Wiener deconvolution filter

阵 \mathbf{g} , 以得到 $\hat{I}_O = \mathbf{g} * I_R$, 使得 I_O 和 \hat{I}_O 之间的均方误差最小化, 即 $E\{(I_O - \hat{I}_O)^2\}$ 最小化, 其中 $E\{\cdot\}$ 为期望值。在频域中, 维纳去卷积滤波器可表示为

$$G = \frac{H^*}{|H|^2 + N/S} = \frac{1}{H} \left(\frac{|H|^2}{|H|^2 + N/S} \right) = \frac{1}{H} \left[\frac{|H|^2}{|H|^2 + \frac{1}{S/N}} \right], \quad (3)$$

式中 G 和 H 分别为去卷积滤波器矩阵 \mathbf{g} 和点扩散函数 PSF 矩阵 \mathbf{H}_{psf} 的傅里叶变换, 上标 $*$ 表示共轭, S 为理想无模糊图像 I_O 的功率谱密度, N 为成像过程中所引入噪声 I_n 的功率谱密度, S/N 即为图像的信噪比(SNR)。

在噪声为 0 的情况下, 维纳去卷积滤波器即为点扩散函数 PSF 造成的图像模糊的逆变换, 因此维纳去卷积可近乎完美地实现图像去模糊。在 \mathbf{H}_{psf} 已知且如图 3 所示的情况下, 对图 4(b) 中的模糊图像使用维纳去卷积得到的结果如图 5(a) 所示。当噪声不为 0 时, 如对图 4(b) 中的模糊图像加入均值为 0、方差为 0.001 的高斯白噪声(本文中的图像矩阵为双精度类型, 因此图像像素 RGB 值取值范围为 $[0, 1]$), 所得到的带噪声的模糊图像如图 5(b) 所示。图 5(c) 为利用维纳去卷积滤波器对图 5(b) 进行去模糊时, 直接把(3)式中的 N 置为 0 得到的去模糊处理结果; 图 5(d) 为维纳去卷积滤波器使用正确的信噪比时得到的去模糊处理结果。从图中可看出, 图 5(d) 的结果明显优于图 5(c), 使用正确的信噪比对图像去模糊结果具有重要的影响, 但在实际的光学成像系统中, 噪声往往是未知的, 因此实现图像信噪比的准确估计对提高基于球面光学的计算成像系统的图像质量具有重要的意义。

除维纳去卷积滤波器方法之外, 在图像去模糊复原研究中常用的方法还有 Lucy-Richardson 算法^[10]、基于正则化滤波器的图像去卷积算法等。4.1 节的仿真实验中, 对比分析了这 3 种方法的性能, 验证了在这 3 种方法中, 维纳去卷积滤波器方法是针对本文基于球面光学的计算成像系统图像去模糊复原问题的最优方法。

3 基于图像去噪的图像信噪比估计

3.1 基于图像去噪的图像信噪比估计算法

由上述分析可知, 要从球面光学系统获得的模糊且带噪声的图像中恢复出清晰的图像, 就要估计

出如(3)式所示的维纳去卷积滤波器中的图像信噪比 SNR, 即 S/N 。文献[11]表明图像功率谱密度的积分为图像的方差, 因此

$$S/N = \text{var}(I_O) / \text{var}(I_n), \quad (4)$$

式中 $\text{var}(\cdot)$ 表示计算图像的方差。在(2)式所示的球面光学系统的成像模糊模型中, I_R 已知, 需要估计出 $\text{var}(I_O)$ 和 $\text{var}(I_n)$ 。假设噪声 I_n 与模糊图像 I_B 相互独立, 可得

$$\text{var}(I_R) = \text{var}(I_B) + \text{var}(I_n). \quad (5)$$

如果能找到一种图像去噪算法能很好地去除噪声 I_n 从 I_R 中去除, 去噪后的图像 I_{Rdn} 即可认为是对 I_B 的近似估计, 因此 $\text{var}(\hat{I}_n) = \text{var}(I_R) - \text{var}(I_{\text{Rdn}})$ 可认为是对 $\text{var}(I_n)$ 的近似估计。由于点扩散函数 PSF 矩阵 \mathbf{H}_{psf} 为归一化矩阵, 因此 $\text{var}(I_{\text{Rdn}}) \approx \text{var}(I_B) \approx \text{var}(I_O)$, 即 $\text{var}(I_{\text{Rdn}})$ 为 $\text{var}(I_O)$ 的近似估计。

综上所述, 经过图像去噪后, 球面光学系统获得的模糊且带噪声的图像的信噪比 SNR 可估计为

$$S/N = \frac{\text{var}(I_{\text{Rdn}})}{\text{var}(\hat{I}_n)} = \frac{\text{var}(I_{\text{Rdn}})}{\text{var}(I_R) - \text{var}(I_{\text{Rdn}})}. \quad (6)$$

3.2 信噪比估计实验结果

当图像去噪算法既能有效地去除噪声又能高质量地保持原有图像信息时, 上述基于图像去噪的信噪比估计算法才能很好地估计出图像噪声的方差和信噪比, 因此上述算法对图像去噪的性能提出了很高的要求。近年来随着图像/信号处理研究的深入, 出现了一些高性能的图像去噪算法, 如基于块匹配和三维(3D)滤波的图像去噪算法(BM3D 算法)^[12]、带局部像素分组的主成分分析图像去噪算法(lpgpca 算法)^[13]等。分别使用 BM3D 算法(<http://www.cs.tut.fi/~foi/GCF-BM3D>)和 lpgpca 算法(<http://www.comp.polyu.edu.hk/~cslzhang/LPG-PCA-denoising.htm>)对加入不同程度高斯白噪声的图像进行去噪处理, 并估计出噪声方差和信噪比。

图 4(b) 中的图像中分别加入表 1 所示不同程度的高斯白噪声后, 即可得到不同的 I_R , 再进行去噪处理后, 得到的噪声方差估计结果如表 1 所示。

根据(6)式得到的信噪比估计结果如图 6 所示。图中, 红色曲线表示加入表 1 所示不同程度的高斯白噪声后真实的图像信噪比, 黑色曲线和蓝色曲线分别表示使用 lpgpca 算法和 BM3D 算法进行图像去噪后得到的图像信噪比。

表 1 使用 BM3D 算法和 lpgpca 算法进行图像去噪后的噪声方差估计结果

Table 1 Estimation results of the noise variance after image denoising with BM3D algorithm and lpgpca algorithm

Noise Algorithm	Variance of added Gaussian white noise (mean of 0)										
	0.02	0.015	0.01	0.0075	0.005	0.0025	0.001	0.00075	0.0005	0.00025	0.0001
BM3D estimation result	0.0181	0.0141	0.00973	0.00744	0.0051	0.0027	0.0012	0.00099	0.00075	0.00051	0.00037
Lpgpca estimation result	0.0177	0.0138	0.00992	0.00787	0.0057	0.0035	0.0021	0.00185	0.0016	0.00135	0.00121

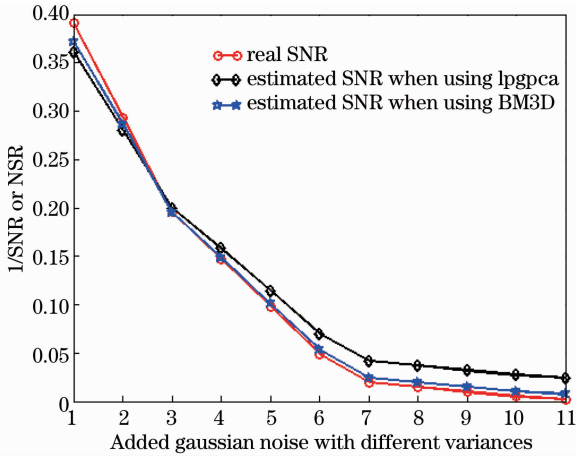


图 6 加入表 1 所示不同程度的高斯白噪声后,使用 BM3D 算法和 lpgpca 算法进行图像去噪后的信噪比估计结果

Fig. 6 SNR estimation results after image denoising with BM3D algorithm and lpgpca algorithm when different Gaussian white noises as shown in Table 1 is added

从表 1 和图 6 可以看出,使用 BM3D 算法和 lpgpca 算法进行图像去噪后,均能较好地估计出图像的噪声和信噪比。在图像噪声很大或者很小的情

表 2 分别使用维纳去卷积滤波器方法、Lucy-Richardson 算法和基于正则化滤波器的图像去卷积算法进行图像去模糊的性能比较

Table 2 Performance comparison when using Wiener filter method, Lucy-Richardson algorithm, and regularized filter method in the image deblurring

Noise Algorithm		Variance of added Gaussian white noise (mean of 0)						
		0.005	0.0025	0.001	0.00075	0.0005	0.00025	0.0001
Wiener filter method	MSE	0.008688	0.006191	0.005069	0.004879	0.004664	0.0044	0.004274
	PSNR	47.701	51.1055	53.0554	53.4202	53.8545	54.4137	54.6823
Lucy-Richardson algorithm	MSE	0.01630	0.008979	0.006029	0.005948	0.005932	0.005937	0.005949
	PSNR	41.1801	47.1629	51.1821	51.3185	51.3441	51.3354	51.315
Regularized filter method	MSE	0.1026	0.06637	0.03302	0.02595	0.01842	0.01004	0.004984
	PSNR	22.7696	27.1285	34.1146	36.524	39.9543	46.0336	53.0833

除维纳去卷积滤波器方法之外,分别使用 Lucy-Richardson 算法和基于正则化滤波器的图像去卷积算法对图 7 中带噪声的模糊图像进行了去模糊复原处理,以比较 3 种方法的性能。由于本仿真

况下,估计误差增大,主要是由于实验中使用的图像去噪算法使用相同的参数,因此存在对大噪声滤波不足和对小噪声滤波过度的问题,使得噪声和信噪比估计误差增大。从实验结果还可看出,使用 BM3D 算法进行图像去噪,能得到更好的噪声和信噪比估计结果。后续实验将使用 BM3D 作为图像去噪算法来进行信噪比估计,并用于基于维纳去卷积的图像去模糊。

4 实验结果与分析

分别使用仿真图像和基于球面光学的计算成像系统原理样机获得的实际图像开展实验研究,以验证所提出算法的有效性,并讨论了算法的计算效率。

4.1 仿真实验结果

实验中基于球面光学的计算成像系统仿真输出的图像图 4(b)被加入了不同程度的高斯白噪声,使用 BM3D 算法对图像进行去噪处理后,估计出信噪比,使用维纳去卷积实现图像去模糊,图像去模糊结果如图 7 所示。实验结果表明,使用提出的方法能对加入了高斯白噪声的模糊图像有效地实现去模糊处理,并且噪声越小,去模糊的效果越好。

实验中存在图 4(a)所示的参考图像,因此还分别使用均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)^[14]作为客观评价标准来比较各方法的去模糊性能,结果如表 2 所示。实验结果表明,使用维纳去卷积滤波器方



图 7 (a1)~(a7)分别为图 4(b)加入了方差为 0.005、0.0025、0.001、0.00075、0.0005、0.00025、0.0001 的高斯白噪声后的图像,(b1)~(b7)分别为使用本文提出的方法去模糊后的结果

Fig. 7 (a1)~(a7) Results after different Gaussian white noises with variance of 0.005, 0.0025, 0.001, 0.00075, 0.0005, 0.00025 and 0.0001 is added into Fig. 4(b) respectively in the left column, and (b1)~(b7) corresponding image deblurring results using the proposed approach

法去模糊后的结果与参考图像相比,具有最小 MSE 和最大 PSNR,因此在这 3 种方法中,维纳去卷积滤波器方法是针对本文基于球面光学的计算成像系统图像去模糊复原问题的最优方法。

4.2 实际系统实验结果

研制了图 1 所示的球面光学成像系统的原理样机,如图 8 所示。该样机系统所使用的球形主透镜由 k9 玻璃加工而成。图 9(a)、(b)是该系统采集到的两幅典型图像,成像的场景分别为距离系统约 4 m 的一张报纸和距离系统 1.5 m 的一本书。使用 BM3D 算法去噪后的图像如图 9(c)、(d)所示,估计出的噪声方差分别为 5.2829×10^{-5} 和 9.7031×10^{-5} ,信噪比分别为 0.0032 和 0.0058。根据估计得到的信噪比,使用维纳去卷积得到的图像去模糊结果如图 9(e)、(f)所示。实验结果表明,结合使用本文提出的图像去模糊方法,基于球面光学的计算成像系统原理样机能得到清晰的高分辨率图像。

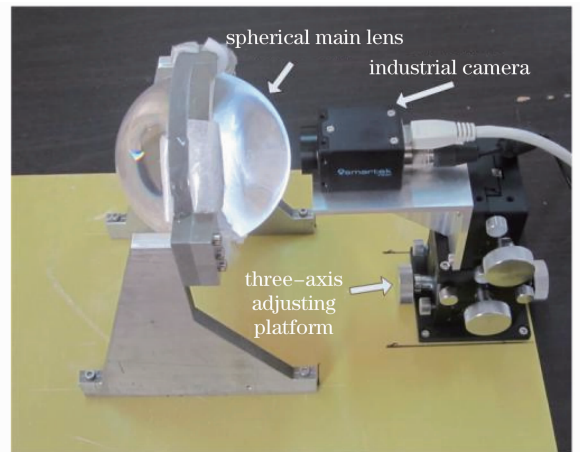


图 8 研制的球面光学成像系统原理样机

Fig. 8 Prototype of the developed computational imaging system based on spherical optics

还分别使用 Lucy-Richardson 算法和基于正则化滤波器的图像去卷积算法对图 9(a)、(b)进行去模糊处理,结果如图 10 所示。与使用维纳去卷积滤波器方法得到的结果相比,Lucy-Richardson 算法得到的结果图像更为模糊,而基于正则化滤波器的图像去卷积算法得到的结果图像包含较多的雪花点噪声。实验表明维纳去卷积滤波器方法是针对本文基于球面光学的计算成像系统图像去模糊复原问题的最优方法。

4.3 算法的计算效率

测试了所提出算法的计算效率。实验中所用计算机配置主频为 2.2 GHz 的 CPU,1.88 G 的内存,

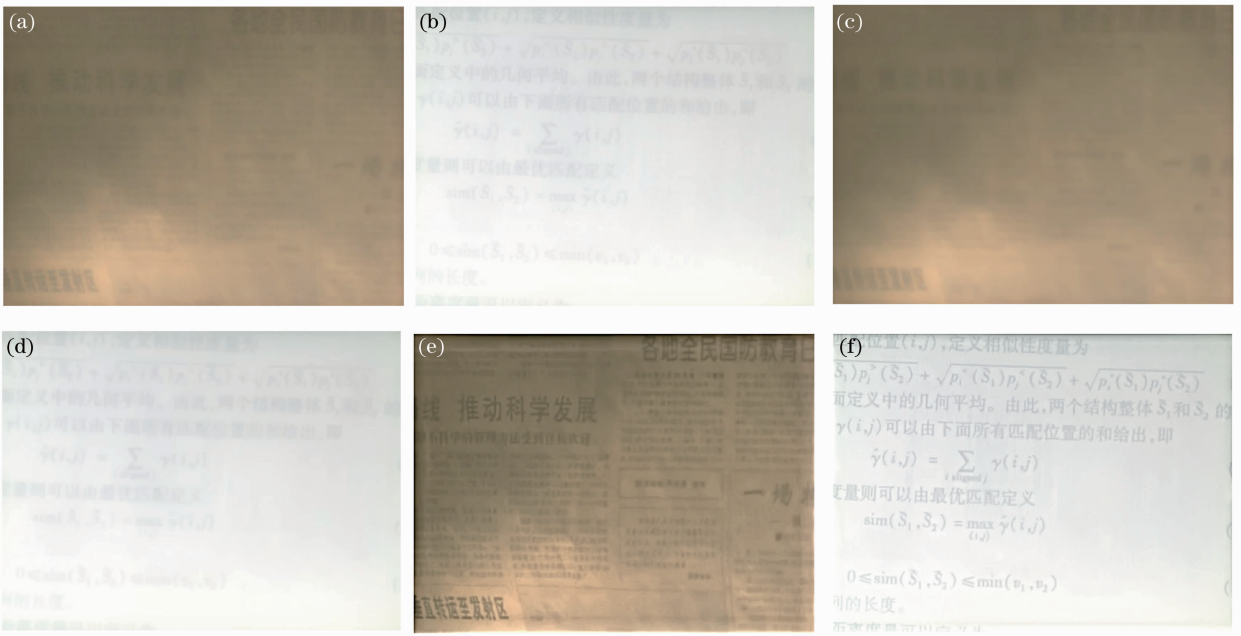


图9 (a)和(b)为图8中的样机系统所采集到的原始图像;(c)和(d)为使用BM3D算法去噪后的结果;
(e)和(f)为估计出信噪比后使用维纳去卷积得到的图像去模糊结果

Fig.9 (a) and (b) are the original images acquired by the implemented prototype; (c) and (d) are the image denoising results using BM3D algorithm; (e) and (f) are the image deblurring results using Wiener deconvolution with the estimated SNR

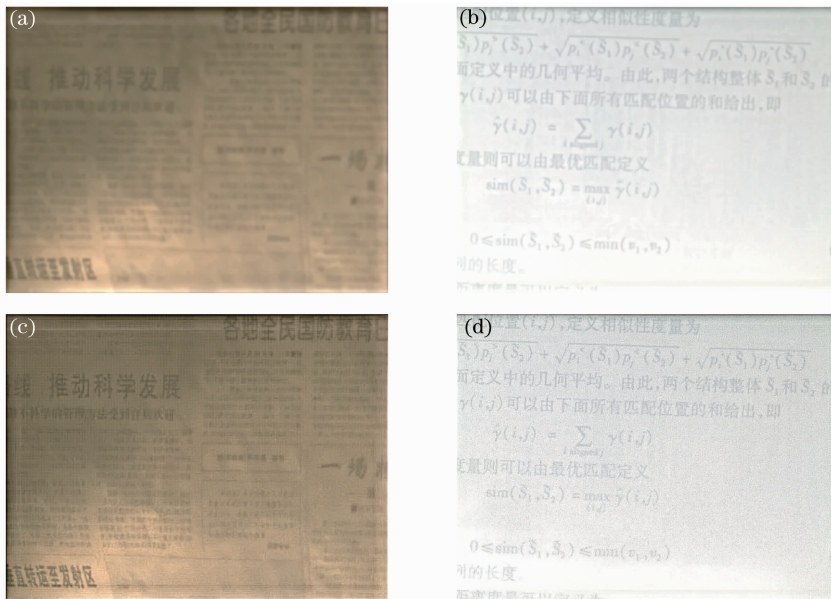


图10 分别使用 Lucy-Richardson 算法和基于正则化滤波器的图像去卷积算法对图9(a)、(b)去模糊后的结果。

(a)和(b) Lucy-Richardson 算法; (c)和(d)基于正则化滤波器的图像去卷积算法

Fig.10 Results after using Lucy-Richardson algorithm and regularized filter method to deblur Figs 9(a) and 9(b).

(a) and (b) Lucy-Richardson algorithm; (c) and (d) regularized filter method

代码运行环境为 Matlab,在处理图像分辨率为 640 pixel×480 pixel 的情况下,使用 BM3D 算法估计噪声和信噪比所需时间为 7~10 s,使用维纳去卷积滤波器完成图像去模糊所需时间仅为 70~

100 ms。可以看出算法运行时间主要消耗于噪声和信噪比估计,这主要是由于目前高性能的图像去噪算法计算量较大。实验结果表明高性能的图像去噪算法还有很大的提升和优化空间,这是下一步的

研究方向。

5 结 论

分析了球面光学系统中的成像模糊模型,并介绍了基于维纳去卷积的图像去模糊算法。由于在该算法中,只有准确地估计出模糊图像的信噪比,才能实现较为理想的图像去模糊,因此提出了一种新的基于图像去噪的图像信噪比自适应估计算法,利用高性能的图像去噪算法在有效地去除噪声的同时,能够高质量地保持原有图像信息,进而估计出模糊图像的信噪比。分别使用 Zemax 光学仿真软件获得的图像和研制的基于球面光学的计算成像系统原理样机获得的图像开展实验研究。结果表明提出的算法能准确地估计出模糊图像中的噪声方差和信噪比,基于估计得到的信噪比,使用维纳去卷积能得到比较理想的图像去模糊结果。结合使用提出的图像去模糊方法后,基于球面光学的计算成像系统原理样机能获得清晰的高分辨率图像。

下一步将针对如何提高高性能图像去噪算法的计算效率展开研究,以提高这种用于计算成像系统的图像去模糊方法的实时性。此外,还将为样机系统增加更多的摄像机传感单元,以完善样机系统,并研究图像拼接技术,构建具有宽视场高分辨率成像能力的计算成像系统。

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0822001.
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨率星载成像光谱仪光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0822001.

- 2 Oliver Cossairt, Daniel Miao, Shree Nayar. Gigapixel computational imaging [C]. 2011 IEEE International Conference on Computational Photography, 2011. 1–8.
- 3 Xu Zhengping, Kuang Haipeng, Xu Yongsen. Multi-model control of dynamic scanning assembly imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1282–1290.
徐正平, 匡海鹏, 许永森. 动态扫描拼接成像系统的多模控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1282–1290.
- 4 Wang Huifeng, Liu Shangqian, Wang Dabao, *et al.*. Panoramic image mosaic method for rotary scanning serial image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1211–1215.
王会峰, 刘上乾, 汪大宝, 等. 旋转扫描序列图像的全景图拼接方法 [J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1211–1215.
- 5 Lu Huimin. The Research on the Omnidirectional Vision System for Autonomous Mobile Robots [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
卢惠民. 自主移动机器人全向视觉系统研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- 6 Li Yongle, Zhang Maojun, Lou Jingtao, *et al.*. Design of catadioptric omnidirectional imaging system for defocus deblurring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0911001.
李永乐, 张茂军, 娄静涛, 等. 去散焦模糊的折反射全向成像系统设计 [J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0911001.
- 7 Oliver Cossairt. Tradeoffs and Limits in Computational Imaging [D]. New York: Columbia University, 2011.
- 8 D J Brady, M E Gehm, R A Stack, *et al.*. Multiscale gigapixel photography [J]. *Nature*, 2012, 486(7403): 386–389.
- 9 Rafael Gonzalez, Richard Woods. *Digital Image Processing* [M]. Uppersaddle River: Prentice Hall, 2003.
- 10 R Fergus, B Singh, A Hertzmann, *et al.*. Removing camera shake from a single photograph [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 787–794.
- 11 T J Pearson. Estimating the Power Spectrum of an Image [J]. California Institute of Technology, 1997. http://www.das.wwhile.cl/-simon/docencia/as735_2004B/ps-estimate.ps.
- 12 K Dabov, A Foi, V Katkovnik, *et al.*. Image denoising with block-matching and 3D filtering [C]. *SPIE*, 2006. 354–365.
- 13 Lei Zhang, Weisheng Dong, David Zhang, *et al.*. Two-stage image denoising by principal component analysis with local pixel grouping [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(4): 1531–1549.
- 14 A M Eskicioglu, P S Fisher. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1995, 43(12): 2959–2965.

栏目编辑: 张浩佳