

文章编号:1007-2780(2019)09-0921-07

基于 PSF 重构和改进的最大后验估计的 自适应光学图像复原算法

武兴睿

(吉林科技职业技术学院, 吉林 长春 130123)

摘要:自适应光学(AO)系统为大气湍流提供实时补偿,但 AO 图像的对比度通常很差,这会导致图像质量下降。本文提出了一种基于点扩散函数(PSF)重构和改进的最大后验概率(MAP)估计的自适应光学图像恢复方法。首先,结合观测条件和 AO 系统的特点,建立基于波前相位信息的 PSF 重构模型;其次,基于本文提出的算法,建立了 AO 图像的迭代求解公式,实现多帧 AO 图像联合去卷积过程。为了验证本文算法的有效性,对仿真的退化 AO 图像进行了一系列复原实验。实验结果表明,以“Man”图像为例,与 Wiener-IBD、RL-IBD 及 FS-MLJD 算法相比,该算法的峰值信噪比(PSNR)测度分别提高了 6.83%,4.47%和 2.28%,拉普拉斯梯度模(LS)值分别提高了 22.2%,17.9%和 12.1%。本文的研究结果对实际的 AO 图像恢复具有一定的应用价值。

关键词:图像复原;自适应光学(AO);点扩散函数(PSF);最大后验概率(MAP)

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193409.0921

Adaptive optical image restoration method based on PSF reconstruction and improved Maximum A Posteriori estimation

WU Xing-rui

(Jilin Science and Technology Vocational College, Changchun 130123, China)

Abstract: The adaptive optics (AO) system can provide real-time compensation for atmospheric turbulence. However, an AO image is usually of poor contrast and brings about a loss in quality. In this paper, a adaptive optical image restoration method was presented *via* the Point Spread Function (PSF) reconstruction and improved Maximum A Posteriori (MAP) estimation. Firstly, combining the observed conditions and AO system characteristics, a predicted PSF model for the wavefront phase effect was developed. Secondly, the iterative solution formulas of AO image was build up based on the proposed algorithm, addressing the implementation process of multi-frame AO images joint deconvolution method. A series of experiments on simulated degraded AO images were conducted to evaluate our proposed algorithm. Compared with the Wiener iterative blind deconvolution (Wiener-IBD) algorithm, Richardson-Lucy IBD algorithm and FS-MLJD algorithm, our algorithm has better restoration effects including higher Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Laplacian Sum (LS) values than the

收稿日期:2019-04-12;修订日期:2019-05-20.

基金项目:吉林省高教学会重点项目(No.JGJX2018C106)

Supported by Higher Education Society Key Project of Jilin Provice(No.JGJX2018C106)

* 通信联系人, E-mail: jltg2019@163.com

others. For “Man” image, the PSNR has improved 6.83%, 4.47% and 2.28%, and the LS value has improved 22.2%, 7.9% and 12.1%, respectively. The research results have a certain application values for actual AO image restoration.

Key words: image restoration; Adaptive Optics (AO); Point Spread Function (PSF); Maximum A Posteriori (MAP)

1 引言

在自适应光学(AO)图像处理中,对无波前测量数据的 AO 图像进行后处理,得到高清晰图像。但由于受大气湍流的影响,这些 AO 图像的点扩散函数(PSF)很难确定,因此必须根据观测图像,联合估计目标图像和点扩散函数来进行复原,即盲图像复原技术^[1]。Ayers 等人提出了基于单帧的盲去卷积方法^[2],该方法对噪声敏感而影响图像的复原效果;Tian 等人提出了一种基于帧选择和多帧盲去卷积方法的 AO 图像复原^[3],帧选择技术有利于提高复原质量;张丽娟等人提出了一种基于改进最大期望的多帧迭代去卷积算法的 AO 图像复原方法^[4],该方法建立代价函数并估计正则项,但其计算速度较慢;Yap 等人提出了一种基于神经网络架构的自适应图像复原方法^[5],该方法的主要优点是优化的正则化向量和局部感知测度之间的经验关系可用于其他退化图像的复原,算法的主要局限性是其收敛速度。

为了提高自适应光学图像的分辨率,本文通过寻找最合适的图像数据集来进行联合最大后验估计(JMAP),同时估计 PSF 和目标图像,解决盲去卷积问题。

2 问题描述

2.1 AO 图像观测模型

盲去卷积描述如下:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y) \quad x, y \in \Omega \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 表示原图像, $h(x, y)$ 表示点扩散函数, $g(x, y)$ 表示采集到的降质图像, $n(x, y)$ 表示噪声, Ω 表示图像的区域, $\otimes$ 表示二维卷积符号。

在实际观测过程中,可以采集同一目标的多帧 AO 图像。定义多帧 AO 图像退化模型为

$$g_m(x, y) = f(x, y) \otimes h_m(x, y) + n(x, y), 1 \leq m \leq M, \quad (2)$$

式中: $g_m(x, y)$ 表示观测的第 m 帧 AO 图像, $h_m(x, y)$ 表示对应的 PSF, M 表示总帧数。因此,本文将使用多帧短曝光图像 $\{g_m\}_{m=1}^M$ 恢复原图像 f 。

2.2 PSF 重建方法

本节提出的 PSF 重建方法属于模型估计方法,将考虑退化原因,包括大气湍流模型,自适应光学系统的参数等^[6]。

为了简化公式,本文使用一维模式描述 AO 图像。理论上, AO 系统闭环校正后的 PSF 数学模型^[6-7]为:

$$h(y) = \left| \int P(u) e^{-\frac{2\pi j y u}{\lambda l}} du \right|^2, \quad (3)$$

式中: $P(u) = \begin{cases} 1 & \text{with the lens aperture} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$ 是望远镜的瞳孔函数, u 是光瞳平面的坐标, λ 是中心波长, l 是 AO 系统的焦距, y 是像素点的坐标。

由于 AO 系统的焦距误差或光学偏差,瞳孔函数应修改为:

$$p(u) = P(u) e^{j\theta(u)}, \quad (4)$$

式中: $\theta(\cdot)$ 是由聚焦误差或光学偏差引起的波前相位误差。

PSF 模型可定义为:

$$h(y; \theta) = \left| p(u) e^{-\frac{2\pi j y u}{\lambda l}} du \right|^2 = \left| P(u) e^{j\theta(u)} e^{-\frac{2\pi j y u}{\lambda l}} du \right|^2, \quad (5)$$

由式(5)可知, PSF 依赖于 $\theta(\cdot)$ 。由于大气湍流的影响,相位误差会随时间而变化,因此定义随时间变化的 PSF 模型:

$$h(y; \theta_t) = \left| \int P(u) e^{j\theta_t(u)} e^{-\frac{2\pi j y u}{\lambda l}} du \right|^2, \quad (6)$$

式中, $\theta_t(\cdot)$ 是由随时间变化的大气湍流引起的相位误差。

3 AO 图像复原的关键算法

大量的盲去卷积工作主要来源于天文学^[8]。盲去卷积方法同时对 PSF 和目标图像进行联合

估计,本文提出的联合估计基于贝叶斯框架的 MAP 估计方法,即

$$(\hat{f}, \hat{h}) = \arg \max_{f, h} p(g, f, h; \theta) = \arg \max_{f, h} p(g | f, h; \theta) \times p(f; \theta) \times p(h; \theta), \quad (7)$$

式中: $p(g, f, h; \theta)$ 表示原图像 g , 观测图像 f 和 PSF h 的联合概率密度。

光学图像的噪声主要服从泊松分布的光子噪声^[8]。AO 图像以强均匀背景为主, 这种情况下,

假设短曝光 AO 图像噪声为服从高斯分布的白噪声, 其方差为 σ^2 。对于目标图像, 选择一个具有协方差矩阵为 R_f , 均值为 f_{mean} 的平稳高斯分布, 如式(8)所示:

$$p(g, f, h; \theta) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^{N^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(g - Hf)^t(g - Hf)\right) \times \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^{N^2} \det(R_f)^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(f - f_{\text{mean}})^t R_f^{-1}(f - f_{\text{mean}})\right), \quad (8)$$

式中: N^2 表示图像像素的个数, $\det(R_f)$ 是矩阵 x 的行列式, H 是 PSF h 的卷积算子。

因此, 可以定义估计目标的代价函数:

$$J(f, h) = -\ln(p(g | f, h; \theta)) - \ln(p(f; \theta)), \quad (9)$$

式中: 第一项是数据保真项, 第二项是正则化项。由式(8), 根据最小化准则求解式(9), 即:

$$J(f, h) = \frac{N^2}{2} \ln \sigma^2 + \frac{1}{2\sigma^2} (g - Hf)^t \cdot$$

$$(g - Hf) + \frac{1}{2} \ln \det(R_f) + \frac{1}{2} (f - f_{\text{mean}})^t R_f^{-1} (f - f_{\text{mean}}) + C, \quad (10)$$

式中, C 是常数。

采用共轭梯度法完成这种最小化任务, 最小化式(10), 得到了提出的迭代算法对目标和点扩展函数的估计, 即:

式中, ξ 是一个常数。根据式(11)和(12), 一定次

$$\hat{f}^{(p+1)}(x) = \hat{f}^{(p)}(x) + \xi (H^t H + \sigma^2 R_f^{-1})^{-1} (H^t g(x) + \sigma^2 R_f^{-1} f_{\text{mean}}), \quad (11)$$

$$\hat{h}^{(p+1)}(x) = \hat{h}^{(p)}(x) + \hat{f}^{(p+1)}(x) * \left[\frac{g(x)}{\hat{h}^{(p)}(x) * \hat{f}^{(p+1)}(x)} \right], \quad (12)$$

数的迭代后可获得目标图像 $\hat{f}$ 和 PSF $\hat{h}$ 的估计。

下面的步骤描述了本文提出的 AO 图像复原算法, 具体过程如算法 1 所示。算法 1 给出了该算法的实现过程。

算法 1 本文复原算法实现的步骤

Step 1: 初始化操作。采用帧选择技术^[3]

选出 M 帧 AO 图像 $(g_1, g_2, \dots, g_M)$, 以 $\hat{f}_0 = (g_1 + g_2 + \dots + g_M) / M$ 。

Step 2: 根据节 2.2 的算法, 获取 PSF 的初始估计 $\hat{h}_0$ 。

Step 3: 迭代计算 $j = 1, 2, \dots, \text{Max_iteration}$ ($\text{Max_iteration} = 100$ 或 200)。

(1) PSF 的内循环计数变量 $h_count = 0$ 。

(2) PSF 估计的迭代过程, $p = 0, 1, \dots, \text{Max_count}$ 。

(a) 基于共轭梯度法优化式(12), 完成 PSF 估计 $\hat{h}^{(p)}$;

(b) $h_count++$; $p++$;

(c) 检查循环变量 p 的值, 如果 $p < \text{Max_count}$, 则继续循环; 否则, 转 Step 3 (3)。

(3) 标估计内循环计数器变量: $f_count = 0$ 。

(4) 目标估计的迭代过程: $q = 0, 1, \dots$, Max_count。

(a) 采用共轭梯度法优化式(12), 实现目标图像估计 $\hat{f}^{(q)}$;

(b) $f_count++$; $q++$;

(c) 检查循环变量 q , 如果 $q < \text{Max_count}$, 则继续循环; 否则, 转 Step 3(5)。

(5) 检查外循环是否结束, 如果 $j > \text{Max_iteration}$, 则转 Step 4。

(6) $j++$, 返回到 Step 4(1)。

Step 4: 算法结束。如果 $j > \text{Max_iteration}$, 输出估计图像 $\hat{f}$, 结束算法; 否则转 Step 3。

4 仿真实验结果与分析

4.1 客观评价

由于缺乏理想图像参考, 本文采用峰值信噪比(PSNR)^[9]和拉普拉斯梯度模(LS)^[10]作为客观评价准则。PSNR 定义:

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x, y) - \hat{f}(x, y))^2} \right), \quad (13)$$

其中: M 和 N 分别代表图像 x 轴和 y 轴的像素个数; $f(x, y)$ 和 $\hat{f}(x, y)$ 分别是原图像和被评价图像在点 (x, y) 处的灰度值。

LS 定义为:

$$\text{LS} = \frac{\sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} |8g(x, y) - g(x, y-1) - g(x-1, y) - g(x+1, y) - g(x, y+1) - g(x-1, y-1) - g(x-1, y+1) - g(x+1, y-1) - g(x+1, y+1)|}{(M-2)(N-2)}. \quad (14)$$

4.2 仿真 AO 图像复原实验

为验证本文算法的复原效果, 对模拟 AO 图像进行复原实验。测试图像选自文献[11], 选择两幅原图像, 如图 1 所示。将图 1(a) 的原图像(“Man”大小为 256×256 pixel, “House”大小为 256×256 pixel)设置如下参数: PSF 的模糊矩阵为 $[1, 6, 4, 6, 1]^T [1, 6, 4, 6, 1]/256$, SNR 为 25 dB, 对应的噪声标准差 $\sigma^2 = 8$; 同时设置 AO 设备参数, 与云南天文台 1.2 m AO 望远镜参数相同, 即: 大气相干长度 $r_0 = 13$ cm, 望远镜直径 $D = 1.08$ m, 焦距 $l = 22.42$ m, 中心波长 λ 为 700 nm, CCD 像素尺寸为 $7.4 \mu\text{m}$ 。产生了 20 帧湍流退化图像, 为了节省篇幅, 只显示两幅降质

图像, 如图 1(b)、(c) 所示。为验证本文提出的图像复原算法的有效性, 与迭代盲去卷积(IBD)算法进行比较, 即基于 Richardson-Lucy 迭代去卷积方法(RL-IBD)^[12], 基于 Wiener 滤波的盲去卷积方法(Wiener-IBD)^[13]和 FS-MLJD^[14]进行比较。图 2 为算法复原结果, 图 2(a)为 RL-IBD 方法的复原结果, 图 2(b)为 Wiener-IBD 方法的复原结果, 图 2(c)为 FS-MLJD 的复原结果, 图 2(d)为本文方法的复原结果, 其中, 波前相位误差 $\theta_i(\cdot) = 6.14 \times 10^{-3}$, $\hat{h}_0 = 8.25 \times 10^{-3}$, 实验参数 $\zeta = 0.25$, 外迭代 100 次, PSF 内循环 4 次, 图像循环 2 次, 即总迭代数是 600 次。



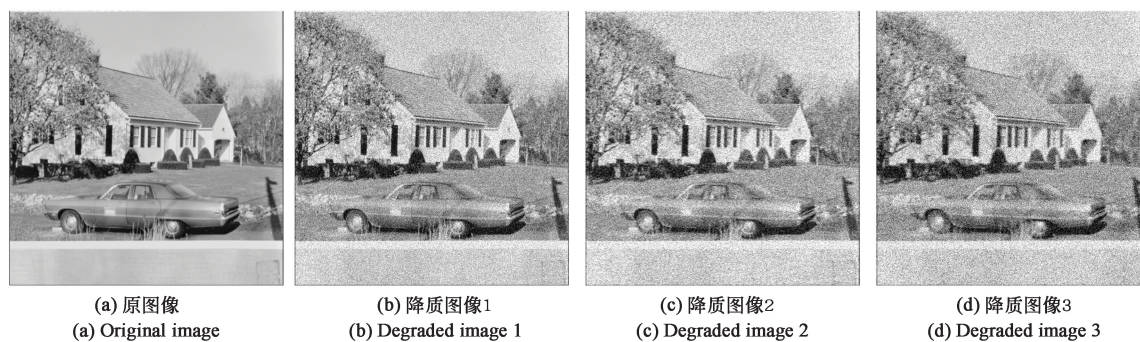


图1 原图像及降质图像序列

Fig.1 Original images and the multi-frame degraded images

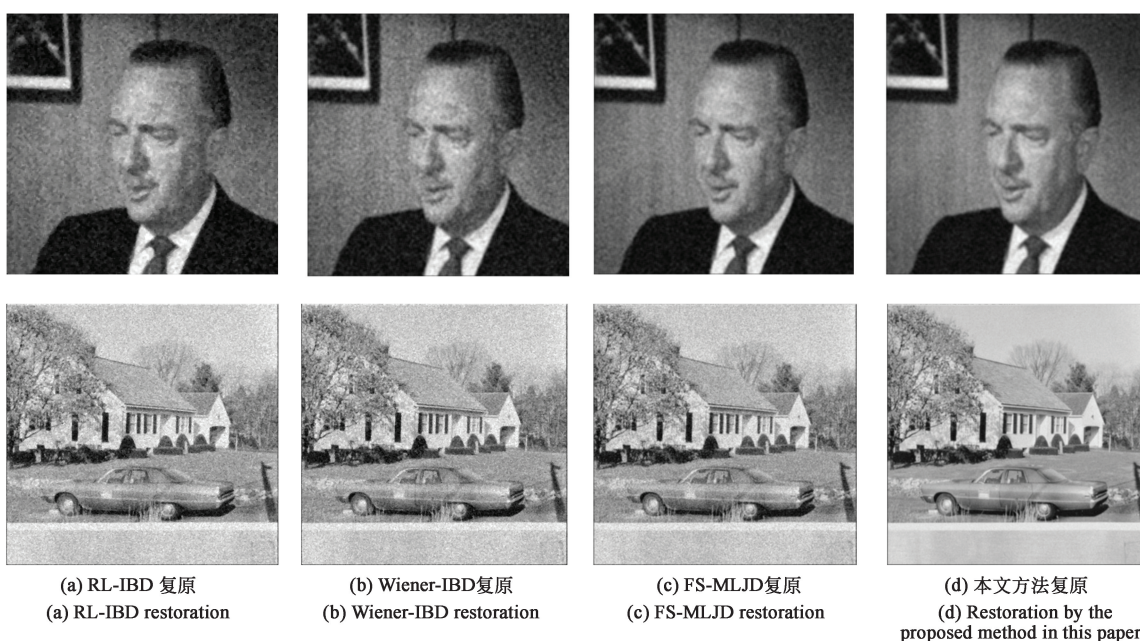


图2 复原算法比较

Fig.2 Comparison for image-restoring methods

采用客观评价标准 PSNR、LS 和计算时间比较本文算法与其他 3 个算法(Wiener-IBD 算法,RL-IBD 算法及 FS-MLJD 算法)进行客观实验比较,结果如表 1 所示。以“Man”图像为例,与 Wiener-IBD 算法,RL-IBD 算法及 FS-MLJD 算法相比,本文算法的

PSNR 测度分别提高了 6.83%、4.47% 和 2.28%,LS 值分别提高了 22.2%、17.9% 和 12.1%。在表 1 中可以看出,本文算法可以获得更高的 PSNR 和 LS。但是该算法的计算量略高于其他 3 种复原算法,所以下一步需要提高算法的性能。

表 1 不同复原算法的 PSNR、LS 及计算时间 3 项评价指标比较结果

Tab.1 Comparison results on PSNR, LS and Computation time of different restoration algorithms

图像名	RL-IBD 算法			Wiener-IBD 算法			FS-MLJD 算法			本文算法		
	PSNR /dB	LS	计算时间 /s	PSNR /dB	LS	计算时间 /s	PSNR /dB	LS	计算时间 /s	PSNR /dB	LS	计算时间 /s
Man	24.245	5.204	12.17	24.793	5.395	12.86	25.324	5.672	13.95	25.901	6.362	13.90
House	26.094	5.891	11.96	26.405	5.986	12.47	26.903	6.001	13.03	27.281	6.531	12.98

从视觉上和客观的评价都可以看出,本文方法可以有效地复原降质的 AO 图像,并且复原后的 AO 图像质量有了明显的提高。

5 结 论

针对自适应光学图像的特点,本文提出了一种基于改进的最大后验估计法的自适应光学图像复原算法,还提出了基于波前相位信息的

点扩展函数重建方法。通过对一组模拟的 AO 图像进行复原实验,与盲去卷积算法 Wiener-IBD、RL-IBD 及 FS-MLJD 3 种算法进行了比较。以“Man”图像的复原结果为例,与上述 3 种算法相比,本文算法的 PSNR 测度分别提高了 6.83%、4.47% 和 2.28%,LS 值分别提高了 22.2%、17.9% 和 12.1%。实验结果表明,本文提出的 AO 图像复原方法在一定程度上实现了高质量的修复效果。

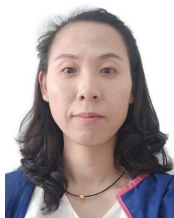
参 考 文 献:

- [1] FAROOQ M, ASLAM A, HUSSAIN B, *et al.* A comparison of image processing techniques for optical interference fringe analysis [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4): 304-311.
- [2] AYERS G R, DAINITY J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. *Optics Letters*, 1998, 13(7): 547-549.
- [3] TIAN Y, RAO C H, WEI K. Adaptive optics image restoration based on frame selection and multi-Frame blind deconvolution [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2009, 33(2): 223-230.
- [4] 张丽娟,杨进华,苏伟.基于改进的期望值最大化自适应光学图像多帧迭代去卷积算法[J].兵工学报,2014,35(11): 1765-1773.
ZHANG L J, YANG J H, SU W. Multi-frame iteration blind deconvolution algorithm based on improved expectation maximization for adaptive optics image restoration [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(11): 1765-1773. (in Chinese).
- [5] YAP K H, GUAN L. Adaptive image restoration based on hierarchical neural networks [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(7): 1877-1890.
- [6] 饶长辉,沈锋,姜文汉.自适应光学系统波前校正残余误差的功率谱分析方法[J].光学学报,2000,20(1):68-73.
RAO C H, SHEN F, JIANG W H. Analysis of closed-Loop wavefront residual error of adaptive optical system using the method of power spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(1): 68-73 (in Chinese).
- [7] 陈波.自适应光学图像复原理论与算法研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2008:44-46.
CHEN B. *The theory and algorithms of adaptive optics image restoration* [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2008: 44-46. (in Chinese)
- [8] HUSSAIN B, MUHAMMAD T, REHAN M, *et al.* Fast processing of optical fringe movement in displacement sensors without using an ADC [J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(3): 241-245.
- [9] LI D M, SU Z B, SU W, *et al.* Research on cross-correlative blur length estimation algorithm in motion blur image [J]. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2016, 20(1): 155-162.
- [10] TANG X J. *Regularization method for image restoration* [D]. Wuhan: Huazhong University, 2006: 101-113.
- [11] ALLAN W. The USC-SIPI image database [EB/OL]. [2019-03-10]. <http://sipi.usc.edu/database/>.
- [12] TSUMURAYA F, MIURA N, BABA N. Iterative blind deconvolution method using Lucy's algorithm [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, 282(2): 699-708.
- [13] 张士杰,李俊山,杨亚威,等.湍流退化红外图像降晰函数辨识[J].光学精密工程,2013,21(2):514-521.
ZHANG S J, LI J S, YANG Y W, *et al.* Blur identification of turbulence-degraded IR images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 514-521 (in Chinese).
- [14] 张丽娟,李东明,杨进华,等.基于帧选择和极大似然估计的自适应光学图像多帧联合去卷积算法[J].吉林大学学

报:理学版,2017,55(5):1199-1206.

ZHANG L J, LI D M, YANG J H, *et al.* Multi-frame joint deconvolution algorithm for adaptive optics images based on frame-selection and maximum likelihood estimation [J]. *Journal of Jilin University: Science Edition*, 2017, 55(5): 1199-1206. (in Chinese)

作者简介:



武兴睿(1982—),女,吉林长春人,讲师,2005 年于长春大学获得学士学位,主要从事计算机大数据技术、图形图像方面的研究。E-mail: jltg2019@163.com