

湍流退化图像相位恢复算法研究*

王宁宇,张天序,洪汉玉,余国亮

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室,
湖北 武汉 430074)

摘要:为克服气动光学效应对目标图像的影响,把相位恢复算法与气动光学效应机理研究结合起来,用于湍流退化图像的恢复。该算法是通过目标图像的傅里叶变换幅值来恢复目标图像,或等价地,恢复傅里叶变换相位。讨论了两类相位复原算法——迭代傅里叶变换(IFT)和解相关算法。对现有的解相关算法作了改进,采用共轭梯度法解高斯-牛顿方程,可有效提高算法的收敛速度。IFT算法不能保证迭代过程总能收敛到正确解,有时会出现停滞现象,将IFT和解相关算法组合起来,可以克服IFT算法的停滞现象,提高正确收敛率。给出了在信噪比为20 dB情况下的湍流退化仿真图像恢复的实例,目标图像能较清晰地恢复出来。实验结果表明该算法具有较好的稳定性和抗噪声能力。

关键词:相位恢复; 迭代傅里叶变换; 解相关; 图像恢复; 湍流退化

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2776(2005)05-0597-05

Restoration of turbulence-degraded images based on phase retrieval algorithm*

WANG Ning-yu,ZHANG Tian-xu,HONG Han-yu,YU Guo-liang

(Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,China)

Abstract:To suppress the aero-optic effect on object images,the phase retrieval algorithm is applied together with aero-optic mechanism to restore turbulence-degraded images.The principle of this algorithm is to reconstruct object images from their Fourier transform magnitude and is equivalent to the principle of the reconstruction of the Fourier phase.Two methods for phase retrieval,namely the iterative Fourier transform (IFT) algorithm and a new de-autocorrelation algorithm, are discussed.The current de-autocorrelation algorithm is improved by using the conjugate gradient(CG)method to solve the Gauss-Newton equation in order to accelerate convergence.The reconstruction done by the IFT algorithm does not always converge to correct results,but combination of the IFT algorithm and the de-autocorrelation algorithm will reduce the stagnation of the IFT algorithm and increase the effectiveness of phase retrieval.Experi-

收稿日期:2004-12-05; 修订日期:2005-01-10

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(F60135020);航天科技创新基金资助项目(2001042)

作者简介:王宁宇(1977-),女,河南商丘人,硕士,主要从事图像复原、模式识别等方面的研究工作。

mental examples of restoration of a simulated turbulence-degraded image with white noise at signal-to-noise ratio (SNR) of 20 dB are given. The experimental results show that the recommended method is an effective method and less sensitive to noise.

Key words: Phase retrieval; IFT; De-autocorrelation; Image restoration; Turbulence-degraded

0 引言

带有光学成像探测制导系统的高速飞行器在大气层中高速飞行时,光学头罩与大气相互作用,在头罩周围形成一个高温、高压及组份和密度高频变化的复杂激波流场,对光学成像探测系统造成热、热辐射和图像传输干扰,引起目标图像偏移、抖动、模糊,这种效应称为气动光学效应^[1,2]。

为了克服气动光学效应对目标图像的影响,通过对湍流退化图像重建目标图像,我们做了一些研究工作^[3-5]。本文把相位恢复的方法应用于气动光学效应湍流退化图像的恢复。相位恢复是通过目标图像的傅里叶变换幅值来恢复目标图像,或等价地,恢复傅里叶变换相位。因为由傅里叶变换幅值可获得目标的自相关,相位恢复问题又可转化成解相关问题来求解。

一个比较成功的相位恢复方法是 Gerchberg 和 Saxton 提出的目标域和频域交替迭代的 GS 算法^[6],在每个域应用测量到的数据或已知约束,从给定的傅里叶变换恢复目标信号。J.R.Fienup 证明了 GS 算法具有误差下降性质^[7],并对 GS 算法进行改进,提出了 IFT 算法^[8],该算法被认为是目前相位恢复领域中最好的算法。遗憾的是,IFT 算法并不能保证迭代过程总能收敛到正确解,有时会出现停滞现象^[9]。Perez-Illzarbe 等人提出交替使用解相关算法与 IFT 算法可以提高正确收敛率,但他们用模拟退火方法实现解相关^[10],计算量太大,难以达到快速收敛。邹谋炎等人提出一种新的解相关算法^[11],称为修改梯度算法(Modified Gradient Method, MGRD),能提高正确收敛率。本文对 MGRD 算法进行改进,提出一种基于共轭梯度法的解相关算法,可有效提高算法速度。

1 相位恢复算法原理

1.1 迭代傅里叶变换算法

在相位恢复技术领域中,迭代傅里叶变换^[5,6]是

迄今最好的算法。以误差下降法(ER)为例,它由一个基本猜测开始,按下列四步进行迭代:

$$(1) F_k(u,v) = DFT[f_k(x,y)] = |F_k(u,v)| \exp(j\phi_k(u,v))$$

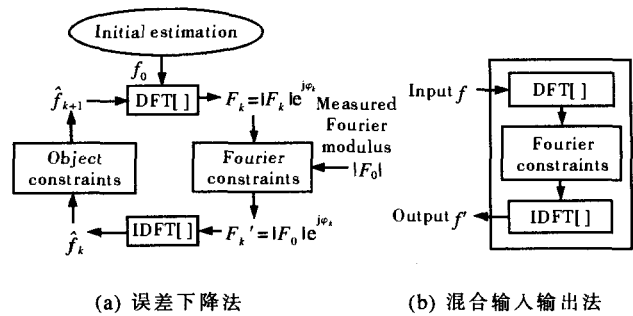
$$(2) F'_k(u,v) = |F_0(u,v)| \exp(j\phi_k(u,v))$$

$$(3) f'_k(x,y) = IDFT[F'_k(u,v)]$$

$$(4) f_{k+1}(u,v) = \begin{cases} f'_k(x,y) & (x,y) \notin \gamma \\ 0 & (x,y) \in \gamma \end{cases}$$

式中 γ 表示 $f'_k(x,y)$ 不满足目标域(空间域)限制的那些点的集合。

其基本框图如图 1 所示:



(a) Error-reduction algorithm (b) Hybrid input-output algorithm

图 1 迭代傅里叶变换算法框图

Fig.1 Block diagram of the iterative Fourier transform algorithm

迭代过程中包含有空间域限制和频域限制。空间域限制主要是正性限制和支持域限制;而频域限制主要是用给定的傅里叶变换幅度替换计算产生的傅里叶变换幅度。

ER 算法具有误差下降性质,但在几步迭代之后收敛就越来越慢。Fienup 对 ER 算法进行了改进,提出 HIO 算法,可加快收敛速度,但不保证误差下降性质。HIO 与 ER 的不同仅在于第四步:

$$f_{k+1}(x,y) = \begin{cases} f'_k(x,y) & (x,y) \notin \gamma \\ f_k(x,y) - \beta f'_k(x,y) & (x,y) \in \gamma \end{cases} \quad (1)$$

式中 β 是一个反馈常数,取值在 0.5~1.0 之间,其典型值为 0.7。

典型的 IFT 算法从 ER 迭代开始,然后用 HIO 和 ER 混合迭代,HIO 可以造成解的扰动,帮助 ER 逃出停滞现象。

1.2 基于共轭梯度(CG)的解相关算法

针对算法收敛速度及正确收敛率的问题,Zou 提出一种新的解相关方法,称为修改梯度算法^[11]。为进一步提高算法的收敛速度,本文对它进行了改进,引入共轭梯度法来求解线性方程。

给定一个维数为 $M \times N$ 的二维序列 $x(m, n)$,记其对应的矢量表达式为 x , x 为 $MN \times 1$ 列矢量,即:

$$x = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}]^T \quad (2)$$

式中 x_i 为 $x(m, n)$ 的第 i 行,

$$x_i = [x(i, 0), x(i, 1), \dots, x(i, N-1)]^T \quad (3)$$

序列的自相关函数也可以记为:

$$r_x = F_x x \quad (4)$$

式中 F_x 是 x 的非周期矩阵; \bar{x} 是 x 的反序序列,通过将 x 反序排列得到。在相位恢复中,通常是由给定目标 $x_0(m, n)$ 的自相关函数 r_0 或其傅里叶幅值去重构和恢复原目标的图像。设给定的自相关函数为 r_0 ,定义误差矢量为:

$$S = F_x x - r_0 \quad (5)$$

原目标函数 $x_0(m, n)$ 和其估计 $x(m, n)$ 的距离为:

$$E_r = \frac{1}{2} |S|^2 \quad (6)$$

令 $x' = x + \Delta x$,可以求得一个新的误差矢量:

$$S' = F_x x + J_x \Delta x + r_{\Delta x} - r_0 \quad (7)$$

式中 $J_x = F_x + \bar{F}_x$, $r_{\Delta x} = F_{\Delta x} \Delta x$ 。当仅考虑 Δx 的一阶项和二阶项时,可以推出误差增量近似为^[9]:

$$\Delta E_r = \frac{1}{2} (|S'|^2 - |S|^2) \approx \Delta x^T J_x^T S + \frac{1}{2} \Delta x^T J_x^T \Delta x \quad (8)$$

E_r 在 Fréchet 意义上关于 x 的梯度 g 和海森矩阵 H 分

别为 $g = \frac{\partial E_r}{\partial x} \Big|_{\Delta x=0} = J_x^T S, H = J_x^T J_x$ 。为了使 E_r 最小,令

$\frac{\partial \Delta E_r}{\partial \Delta x} = 0$,从而可得到迭代方程,即高斯-牛顿方程:

$$H \Delta x = -g = b \quad (9)$$

为提高算法速度,采用共轭梯度法解高斯-牛顿方程。从 Δx_0 开始,并假定初始搜索方向 $p_0 = b$,算法的每一步都沿着与已经搜索过的方向成 H 共轭的新方向 p_k 寻找泛函 ΔE_r 的极小值。

$$\Delta x_{k+1} = \Delta x_k + \alpha_k p_k \quad (10)$$

式中 $d_k = d_{k-1} + \alpha_{k-1} H p_{k-1}$, $\alpha_k = d_k^T d_k / p_k^T H p_k$, $p_k = -d_k + \beta_k p_{k-1}$, $\beta_k = d_k^T d_k / d_{k-1}^T d_{k-1}$ 。

这里 H 共轭的定义为:

$$p_k^T H p_i = 0 \quad i = 0, 1, 2, \dots, k-1 \quad (11)$$

1.3 提高恢复质量的辅助方法

组合 IFT 算法和解相关算法可以构造出更有效的相位恢复算法,提高算法的正确收敛率。在每次迭代完成后,加入保持目标域图像能量守恒的处理。完整的支持域约束条件应包括两个部分^[12]: (1) 保证支持域内像素值非负; (2) 应使图像能量保持不变。后一个条件可通过把像素值为负的能量均匀分布在支持域内各像素上来实现。

$$E = \sum \sum [\hat{f}_{k+1}(x, y) - f_k'(x, y)] \quad (12)$$

$$f_{k+1}(x, y) = \hat{f}_{k+1}(x, y) + E/N \quad (13)$$

式中 $\hat{f}_{k+1}(x, y)$ 、 $f_k'(x, y)$ 分别是正性约束之前和之后的图像; E 是值为负的全部像素的能量之和; N 是图像支持域中全部像素的个数。

2 实验结果

图 2 为原始图像,大小为 128×128 ,图 3 为用气动光学效应仿真软件生成的湍流退化图像,添加了高斯噪声,信噪比为 20 dB。从退化图像中,无法分辨出目标的轮廓形状。图 4 为在假定图像傅里叶变换幅值已知的情况下,采用不同恢复算法对图 2 恢复得到的复

原图像。其中,图4(a)是采用 IFT 算法,使用 HIO-ER 组合迭代 150 次的恢复结果,图(b)是采用基于共轭梯度的解相关算法迭代 150 次的恢复结果,图(c)是采用 IFT 算法和基于共轭梯度的解相关算法组合迭代 150 次的恢复结果。从中可以看出:(1) 组合算法恢复出的目标图像更清晰,细节更清楚,但是由于模糊图像本身信息的丢失以及算法的局限性,恢复结果始终不可能完全与原始图像一致;(2) 该算法具有较好的抗噪声能力和稳定性,在 20 dB 噪声情况下目标信息仍能被恢复出来。

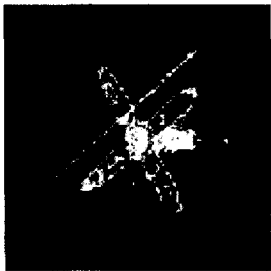


图2 原始图像

Fig.2 Original image

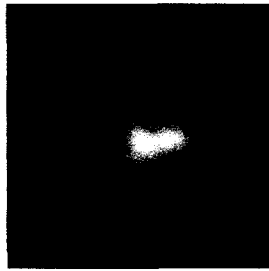


图3 湍流退化仿真图像(20 dB)

Fig.3 Simulated turbulence degraded image with white noise at 20 dB

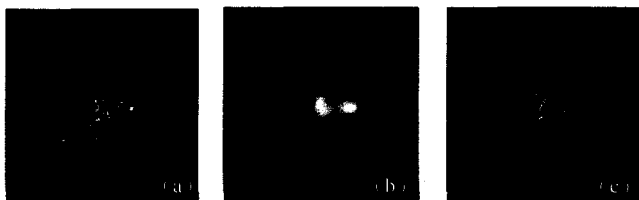


图4 通过 150 次迭代从图 2 恢复出的目标图像

Fig.4 Restored image from Fig.2 by 150 iterations

3 结论

从目标的傅里叶幅值来恢复目标图像的相位恢复算法,在光学图像处理应用中有着广泛的前景。基于实时性的要求,对 MGRD 算法^[11]进行了改进,使用共轭梯度法解线性方程,速度有明显提高,计算时间缩短到原来的 25~40%。理论上,二维序列(图像)相位恢复的解的唯一性是有保证的。然而现有的算法均不能保证总是收敛到正确的解。通过将 IFT 算法和解相关算法组合起来,可以克服 IFT 算法的停滞现象,提高相位恢复算法的正确收敛率。

以上对相位恢复算法的探讨是在假定目标的傅里叶幅值已知的情况下进行的,实际应用中,目标的傅里叶幅值可由下式估计^[7]:

$$|F(u)|=W(u) \left[\frac{\sum_{m=1}^M |I_m(u)|^2 - N_p}{\sum_{m=1}^{2M} |S_m(u)|^2} \right]^{1/2} \quad (14)$$

式中 $I_m(u)$ 是第 m 帧退化图像的傅里叶变换; N_p 是检测到的光子总数; $S_m(u)$ 是第 m 帧退化图像点扩展函数的傅里叶变换; $W(u)$ 是权函数,表示成像系统的光学传递函数。但这样就会给输入目标图像的幅值信息带来一定程度的误差,进而对恢复的结果产生影响。如何利用光学器件准确地测定湍流效应光学传递函数或点扩展函数是值得深入研究的问题。

参考文献:

- [1] YIN Xing-liang. Aero-optics Principle[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House(殷兴良. 气动光学原理. 北京: 中国宇航出版社), 2003.
- [2] FEI Jin-dong. Aero-optical effect technology for high speed missile infrared image guide[J]. Infrared and Laser Engineering(费锦东. 高速红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求. 红外与激光工程), 1998, 27(1): 42-43.
- [3] ZHANG Tian-xu, HONG Han-yu, SUN Xiang-hua, et al. Restoring turbulence degraded images based on estimation of turbulence point spread function values[J]. Acta Automatica Sinica(张天序, 洪汉玉, 孙向华, 等. 基于估计点扩展函数值的湍流退化图像复原. 自动化学报), 2003, 29(4): 573-581.
- [4] HONG Han-Yu, ZHANG Tian-Xu. Fast restoration algorithm for turbulence degraded images based on wavelet decomposition[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves(洪汉玉, 张天序. 基于小波分解的湍流退化图像的快速复原算法. 红外与毫米波学报), 2003, 22(6): 451-456.
- [5] SUN Xiang-hua, HONG Han-yu, ZHANG Tian-xu. Image reconstruction method under aero-optic effect based on ARTUR algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering(孙向华, 洪汉玉, 张天序. 基于 ARTUR 算法的气动光学效应图像校正方法. 红外与激光工程), 2003, 32(4): 377-381.
- [6] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J].

- Optik, 1972, 35: 237-246.
- [7] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21 (15): 2758-2769.
- [8] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform [J]. Optics Letters, 1978, 3 (1): 27-29.
- [9] Fienup J R, Wackerman C C. Phase-retrieval stagnation problems and solutions [J]. Opt Soc Am A, 1986, 3 (11): 1897-1907.
- [10] Perez-Illzarbe M J, Nieto-Vesperinas M, Navarro R. Phase retrie-

- val from experimental far-field intensity data [J]. Opt Soc Am A, 1989, 7 (3): 434-440.
- [11] ZOU Mou-yan, Rolf Unbehauen. Methods for Reconstruction of 2-D Sequences from Fourier Transform Magnitude [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6 (2): 222-233.
- [12] Ayers G R, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications [J]. Optics Letters, 1988, 13 (7): 547-549.

(上接第 555 页)

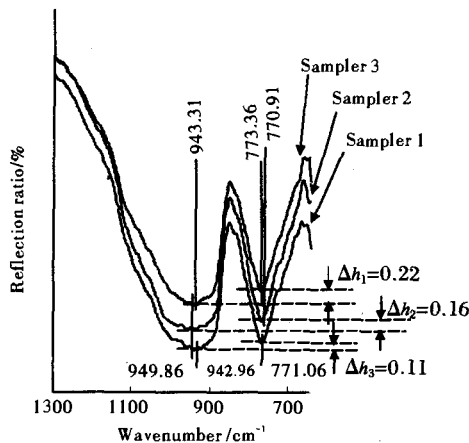


图5 试样的 FT-IR 全反射光谱

Fig.5 IR spectra of couplers at different drawing velocities

的键角在此时最大。

(3) 随着速度的不同, 光纤耦合器的两个特征吸收峰也不同。在 150 $\mu\text{m/s}$ 时, 两者相差最大, 表明波数的移动与光纤耦合器的性能密切相关。

参考文献:

- [1] SONG Jin-sheng. Technical evolvement and developing current of optical passive device in our country [J]. International Broadband Network (宋金声. 我国光无源器件的技术进展和发展趋势. 世界宽带网络), 2002, 9(11): 16-18.
- [2] YANG Wei. Technical development current of optical passive device [J]. Broadband World Forum (杨伟. 光纤无源器件技术发展趋势. 宽带世界), 2003, (3): 38-40.
- [3] AO Hui-jun. Market analysis of fiber coupler in global [J]. Optical

Fiber Communication (敖晖军. 全球光纤耦合器市场浅析. 光纤通信), 2001, 23(2): 41-43.

- [4] WU Xi-ming. Some key specs of optical fiber couplers [J]. Optical Fiber Communication, 2002, 24(1): 41-43.
- [5] HONG Li-feng, GE Chun-feng. The full wave optical fiber coupler of the fused taped [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(2): 390-394.
- [6] WEI Dao-ping, ZHAO Yu-cheng. Study on novel 2x2 single-mode biconical optical fiber couplers [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1998, 22(3): 56-58.
- [7] Diaouov E M. The different condition influence in the process Drawing fiber from prefabricate stick [J]. Glass Tech, 1998, 29 (6): 123-129.
- [8] Saito K, Ogawa N. Effects of aluminium impurity on the structural relaxation in silica glass [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2000, 270(1): 60-65.
- [9] Haken U, Humbach O, Ortner S. Refractive index of silica glass: influence of fictive temperature [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2000, 265(1): 9-18.
- [10] Kusabiraki K. Infrared and Raman spectra of vitreous silica and sodium silicates containing titanium [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1987, 95(4): 411-418.
- [11] Agarwal A, Tomozawa M. Surface and bulk structural relaxation kinetics of silica glass [J]. J Non-Crystalline Solids, 1997, 209(3): 264-272.
- [12] Wong Y W, Choy L K. The Manufacturing of an optical fiber coupler by the fusion elongation method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 63 (1): 325-331.
- [13] Agarwal A, Tomozawa M. Correlation of silica glass properties with the infrared spectra [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1997, 209(1): 166-174.