

气动光学效应图像恢复 IBD 算法研究 *

赵 剡, 张世军, 宗云花, 杨秋英

(北京航空航天大学, 北京 100083)

摘 要: 采用迭代盲目反卷积进行气动光学效应图像恢复研究, 编制了相应的计算程序, 获得了恢复图像和相应的气动光学效应降解过程的点扩散函数, 同时讨论了共轭梯度 CG 算法在盲目反卷积图像恢复计算过程中的收敛性, 并提出算法策略。

关键词: 气动光学效应; 图像恢复; 盲目反卷积

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0169-05

IBD algorithm for image restoration in aero-optics *

ZHAO Yan, ZHANG Shi-jun, ZONG Yun-hua, YANG Qiu-ying

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Iterative blind deconvolution algorithm is always used to image restoration in aero-optics. These corresponding programmes are coded. The restoration image and the corresponding point spread function(PSF) of aero-optics effect degradation model are gained. In addition, to improve the global convergence of IBD algorithm, the conjugate gradient (CG) algorithm is tried to revise.

Key words: Aero-optic effect; Image restoration; Blind deconvolution

0 引 言

气动光学效应发生于导弹在稠密的大气层中高超声速飞行的过程中, 导弹头部的光学头罩与大气发生剧烈的相互作用, 导致光学侧窗口温度骤升, 周围空气被压缩, 探测窗口附近形成复杂的湍流、激波的高超声速流场, 气体密度、温度、压力和组分发生变化, 甚至产生气体电离现象, 对目标图像产生热辐射

干扰和图像传输干扰, 产生附加的图形模糊、抖动和偏移^[1]。

气动光学效应是一个十分复杂的物理过程, 对其机理分析和建模将涉及空气动力学、光学、光电子学等诸多学科。鉴于气动光学效应研究的重要性, 国内外对此问题极为重视而且讨论很活跃, 最突出的是美国, 其研究进程几乎与光学制导弹的研制开发同步^[2], 在大量的气动光学实验、理论分析及模拟仿真的基础上, 提出了一些先进的校正原理和方法。美国

收稿日期: 2003-09-30; 修订日期: 2003-12-18

基金项目: 武器装备预研基金资助项目(51401020301HK0166)

作者简介: 赵剡(1956-), 男, 山西乡宁人, 教授, 博士, 研究方向为图像处理与成像制导、卫星导航、组合导航。

一些大学和研究所开展了利用图像校正方法校正气动光学效应引起的图像模糊、抖动和偏移,空军 Phillips 实验室利用迭代盲目反卷积 (Iterative Blind Deconvolution, IBD) 和空变图像复原 (Space-varying Restoration) 进行气动光学效应图像校正研究,并将其应用于地基望远系统对海事卫星观测图像数据处理^[3]。

由于气动光学效应的复杂性导致点扩散函数 (PSF) 难以预先较准确地获得,逆滤波方法也难以得到,盲目反卷积算法是一种较好的选择。图像恢复可以在频域和空域进行^[4]。利用傅里叶变换可以将图像从时域到频域反复地变换,在变换中加入希望的限制对图像在两个域中进行反复修改,最后获得希望的图像。Ayers 和 Dainty 提出了一个迭代算法^[5]。空域的盲目反卷积算法,通常使用最小二乘准则,也有为保存图像细节,改用总变分最小化^[6]。对于其中的法方程的解算,可应用最速下降法,也可使用共轭梯度 (Conjugate Gradient, CG) 算法。其他盲目反卷积算法还有采用 EM 算法的边缘噪声比例的方法^[7],使用最大似然准则的 RL 算法^[8]等等。

本文采用共轭梯度法解算其中的法方程,由于共轭梯度法具有二次终止性,即对于二次函数,CG 算法在有限步终止,收敛速度很快。当初值距离真解较远,随着算法 IBD 的循环迭代进行,CG 算法会很快地找到某一数学解,该解可能并不是全局最优解,IBD 算法解的精度决定于最后一次迭代采用的价格函数比较常数,因此文中选择了分段逐步精细化的策略,既保证有较快的收敛速度又有较高的精度。通过 IBD 获得的气动光学效应的恢复图像和点扩散函数,对今后进行导弹制导系统图像恢复和目标精确识别具有参考价值。

1 气动光学效应及其图像恢复 IBD 算法

在导弹成像制导系统中,气动光学效应引起的光学成像质量变化的主要因素有三个:平流流场、湍流流场和光学系统。将三者的光学传递函数相乘便得到总的光学传递函数,进行傅里叶变换得到相应

的点扩散函数:

$$h(x, y) = A \iint MTF_{\text{opt}} MTF_{\text{MF}} MFT_{\text{TF}} \exp \times [jk(x\xi + y\eta)] d\xi d\eta \quad (1)$$

式中 (x, y) 为像面坐标; MTF_{opt} 、 MTF_{MF} 、 MFT_{TF} 分别是光学系统、平流流场和湍流流场的光学调制函数^[9]。图像的降质模型通常用下式描述:

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

式中 y 是失真图像; h 是点扩散函数 PSF 矩阵; x 是原始图像; n 是加性噪声; $*$ 表示卷积运算。为计算方便,将卷积相乘的形式转换为矩阵-向量相乘的形式,这样图像恢复的线性位移不变的模型就可以用下式来描述:

$$y = F_h x + n \quad (3)$$

或者

$$y = F_x h + n \quad (4)$$

式中 F_h 是由点扩散函数矩阵生成卷积核矩阵; F_x 是原始图像生成的卷积核矩阵; x 是原始图像生成的向量; h 是点扩散函数矩阵生成的向量; n 是加性噪声生成的向量; y 是降质图像生成的向量。

人们对价格函数有许多不同的认识,并有不同的选取标准,例如,总变分的方法,最大似然准则等,也有一些迭代的盲目反卷积算法是基于 Richardson-Lucy 算法,这些不同的限制和假设的条件往往符合不同的客观事实。取图像恢复的价格函数为:

$$\min J(x, h) = \|y - F_h x\|^2 \quad (5)$$

或

$$\min J(x, h) = \|y - F_x h\|^2 \quad (6)$$

其最小二乘解构成法方程为:

$$\begin{cases} F_h^T F_h x = F_h^T y \\ F_x^T F_x h = F_x^T y \end{cases} \quad (7)$$

图像恢复的迭代盲目反卷积算法流程如图 1 所示。

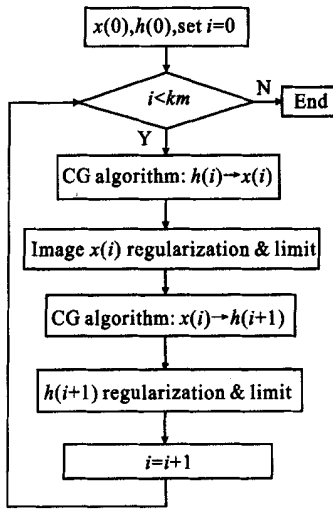


图 1 图像恢复的 IBD 算法流程图

Fig. 1 IBD algorithm of image restoration

2 共轭梯度算法收敛性及循环迭代条件的改进

由于图像恢复问题本身固有的病态特性,算法能否收敛和快速得到结果是图像恢复处理中需要解决的一个关键问题。算法的循环过程依据给定的一个初始值,交替迭代循环求解,随着循环次数的增加,解渐渐收敛到真解,最后到一定次数后停止。在交替迭代循环整个过程中,如果共轭梯度法的迭代次数不变,由于共轭梯度法的收敛速度较快,使得迭代的盲目反卷积算法常常会迅速地局部收敛,“停滞”在某一个解,这个解常常不是真解。其原因为对于任意给定的一个初始值,在交替迭代循环的起始阶段,当 k 较小时,共轭梯度法的数值解 $x(k)$ 和 $h(k)$ 仅符合其数学关系,距离真解较远;随着交替迭代循环的进行,当 k 较大时,共轭梯度法的解 $x(k)$ 和 $h(k)$ 距离真解较近。所以,提出了对共轭梯度算法的迭代次数递进增加的方法,令每轮交替迭代循环中,共轭梯度法的循环次数等于其交替迭代循环的计数器 k 值加上一个适当大的正整数。这样,在交替迭代循环整个过程中,共轭梯度法的解由慢到快地接近真解,显著地改善了迭代的盲目反卷积算法的全局收敛。同时,随着共轭梯度法循环次数增加,其求解精度水平提高,所以控制了共轭梯度法的精度水平。这样,对整个交替迭代循环过程而言,共轭梯度算法的循环次数越来

越大,共轭梯度法的求解精度水平慢慢提高,在交替迭代循环整个过程的最后,共轭梯度算法的循环次数也就足够大,其精度水平也就足够高,保证了最后解的精度水平。

共轭梯度法的基本原理和公式:对于无约束优化问题 $\min f(x)$, $x \in R^n$,其中 $f(x)$ 是一阶可微函数,非线性共轭梯度法具有如下的形式:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}, d^{(k+1)} = \begin{cases} -g_1 \\ -g_{k+1} + \beta_k d^{(k)} \end{cases} \quad (8)$$

式中 λ_k 是通过某种线性搜索获得的步长,

$$f(x^{(k)} + \lambda_k d^{(k)}) = \min_{\lambda} \{ f(x^{(k)} + \lambda d^{(k)}) \mid \lambda \geq 0 \} \quad (9)$$

纯量 β_k 比较常见的取法有 Fletcher-Reeves (FR) 公式和 Polak-Ribiere-Polyak (PRP) 公式:

$$\beta_k = \begin{cases} \beta_k^{FR} = \|g_{k+1}\| / \|g_k\| & g_{k+1}^T g_k < 0 \\ \beta_k^{PRP} = g_{k+1}^T (g_{k+1} - g_k) / \|g_k\|^2 & g_{k+1}^T g_k \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\|\cdot\|$ 取的是欧几里得范数;梯度 $g_k = -\nabla f(x^{(k)})$ 。对于一般的非线性函数,FR 方法具有较好的理论收敛性,而 PRP 具有较好的数值效果。在目标函数是二次函数和精确线性步长搜索之下,两个公式都产生相同的点列。但对一般的非线性函数,上面几个并不等价。因此, β_k 的不同取法对应不同的共轭梯度法,相互比较,各有不同的收敛性质和数值表现。此处取法综合了收敛性和数值效果^[10]。

共轭梯度法的循环迭代结束条件一般有两种情形:设定某一精度,当达到该精度后循环迭代结束;设定某一循环迭代次数阈值 km ,当达到该阈值 km 次数后循环迭代结束。文中提出了将循环迭代的结束条件改为两者逻辑或的关系,即只要当达到了某一精度,或者达到了某一循环迭代次数阈值 km ,循环迭代就结束。并且,将其中的循环迭代次数的阈值 km 置为图像恢复的盲目反卷积算法的循环迭代次数变量 i 加上一个正常数。该方法的优点是:由于初始阶段的 IBD 算法的初值具有一定的人为随意性,很可能不接近真解,这个阶段 CG 算法循环迭代次数阈值 km 如果是固定的值,这个值在 IBD 算法循环迭代的

全过程中不可能都是合适的,那么 CG 算法还可能会发散,选择距离问题的真解反而更加远了或者根本不会收敛一个确切的解。所以,本文提出的改进在 IBD 算法的初始阶段,可以减慢 CG 算法的求解速度,使整个 IBD 算法获得一个更大的搜索空间,改善 IBD 算法的全局收敛性。

关于 IBD 算法的精度,随着 IBD 算法的循环迭代次数的增加,最终需要的只是最后一轮循环迭代的结果,而 CG 算法的循环迭代次数随着 IBD 算法的循环迭代次数 i 的增加而增加,故最后一轮 CG 算法的计算精度达到最大,从而 IBD 算法的精度也得到了保证。

图 2 横坐标是算法中交替迭代循环计数器 k ,每次都求得两个新的 $x(k+1)$ 和 $h(k+1)$,纵坐标是各项差的 F 范数的变化。点划线为恢复后得到的卷积图像和失真图像的差的范数;虚线为恢复后得到的图像和原始图像的差的范数;实线为迭代过程中得到的 PSF 和原始 PSF 的差的范数变化。

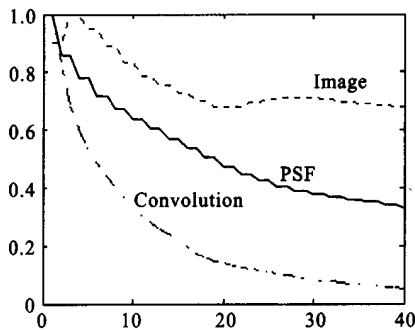
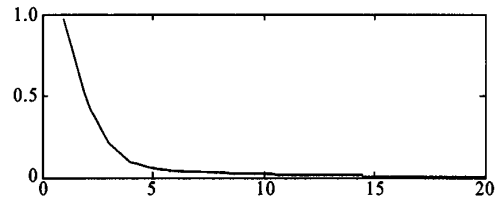


图 2 迭代过程各项差范数的变化

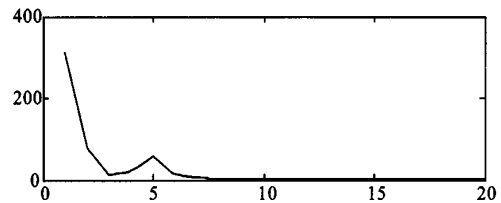
Fig. 2 These norm variation of convolution, image and PSF in iteration cycle

图 3(a)、(b)横坐标是算法中交替迭代循环计数器 k ,每次都求得两个新的 $x(k+1)$ 和 $h(k+1)$,纵坐标是每轮的共轭梯度法求得两个新的 $x(k+1)$ 和 $h(k+1)$ 时,共轭梯度算法中的最后一次求解的梯度范数,该范数反映了其求解的精度。图 3 表明随着交替迭代的进行,曲线大致是单调下降,说明其求解的精度也单调提高。图 3(b)描述的是求解 PSF 精度的变化,在第 5 轮交替循环时,出现一个小小的波动,表明 PSF 规整化和迭代次数限制起的作用,有利于让交替循环收敛到实际的 PSF。



(a) 图像梯度变化曲线

(a) The gradient norm variation in computing image iteration cycle



(b) PSF 梯度变化曲线

(b) The gradient norm variation in computing PSF iteration cycle

图 3 交替迭代过程中 h 和 x 的梯度范数

Fig. 3 The gradient norm variation of h and x in computing image/PSF iteration cycle

3 数值仿真及应用

将上述的算法应用于仿真图像得到图 4 所示结果,与降质图像 I_b 相比,恢复图像 I_r 有了很大的改善,恢复图像与原图像 I_o 的差的二阶范数、降质图像与原图像的差的二阶范数及其比值分别为:

$$\|I_r - I_o\| = 146.2490$$

$$\|I_b - I_o\| = 321.9090$$

$$\|I_r - I_o\| / \|I_b - I_o\| = 0.4543$$



(a) 原始图像 (b) 降质图像 (c) 恢复图像

(a) The original image (b) Degenerated image (c) Restored image

图 4 仿真计算原始图像、降质图像和恢复图像

Fig. 4 The original image, degenerated image and restored image in simulation computation

恢复降质点扩散函数 p_r 、降质点扩散函数 p_b 分

别为:

$$p_r = \begin{bmatrix} 0 & 0.0119 & 0.115 & 0.0127 & 0.0061 & 0 & 0 & 0.0123 & 0 \\ 0.0280 & 0.0151 & 0.0166 & 0.0040 & 0.0022 & 0.0180 & 0.0249 & 0.0558 & 0.0233 \\ 0.0007 & 0.0051 & 0.0042 & 0 & 0 & 0.0092 & 0.0449 & 0.0314 & 0.0072 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0061 & 0.0106 & 0.0356 & 0.0270 & 0.0168 & 0 \\ 0.0026 & 0.0057 & 0.0030 & 0.0081 & 0.0460 & 0.0418 & 0.0074 & 0.0005 & 0.124 \\ 0 & 0.0045 & 0.0157 & 0.0380 & 0.0268 & 0.0049 & 0.0005 & 0.0051 & 0.0100 \\ 0 & 0.0060 & 0.0387 & 0.0270 & 0.0040 & 0 & 0.0072 & 0.0080 & 0 \\ 0.0109 & 0.0465 & 0.0247 & 0.0176 & 0.0130 & 0.0106 & 0.0066 & 0.0197 & 0 \\ 0 & 0.0380 & 0.0227 & 0.0044 & 0.0085 & 0.0095 & 0.0016 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$p_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0145 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0262 & 0.0896 & 0.0145 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0262 & 0.0896 & 0.0262 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0262 & 0.0896 & 0.0262 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0262 & 0.0896 & 0.0262 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0262 & 0.0896 & 0.0262 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0262 & 0.0896 & 0.0262 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0145 & 0.0896 & 0.0262 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0145 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\|p_r - p_b\| = 0.0221$

将上述算法应用于被气动光学效应降质的图像,得到图 5 所示结果,所辨识的气动光学效应降质点扩散函数具有如下形式和参数:

$$p_b = \begin{bmatrix} 0.1237 & 0.1570 & 0.0625 & 0 & 0 & 0.0034 \\ 0.1570 & 0.0008 & 0.1209 & 0 & 0.0204 & 0 \\ 0.0625 & 0.1209 & 0.0826 & 0.0147 & 0.0068 & 0.0044 \\ 0 & 0 & 0.0147 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0204 & 0.0068 & 0 & 0 & 0.0063 \\ 0.0034 & 0 & 0.0044 & 0 & 0.0063 & 0 \end{bmatrix}$$

在对风洞实验数据进行 IBD 处理时,对点扩散函数的尺度进行了优化选择,64 × 64 的图像选择 6 × 6 的尺度,既保证了恢复的精度,又具有较小的计算量。

4 结 论

针对气动光学效应的复杂性,提出采用迭代盲目反卷积图像恢复算法,进行气动光学效应降质图像的图像恢复研究,编写了相应的程序,用仿真图像验证

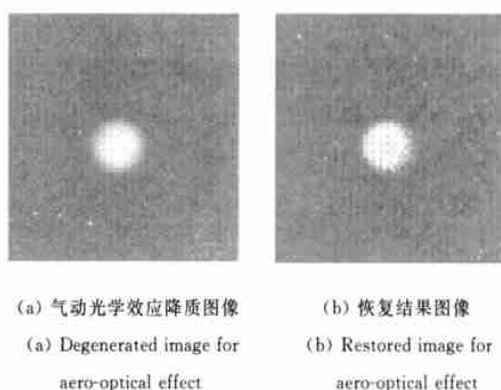


图 5 气动光学效应 IBD 图像恢复结果

Fig. 5 Image restoration result of IBD algorithm for aero-optical effect

了算法的可行性,并获得了较好精度的恢复图像和点扩散函数的参数。应用该算法对风洞实验所得气动光学效应图像进行恢复,获得的恢复图片和降质点扩散函数对气动光学效应分析和校正研究具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社,2003.
- [2] Jumper E J, Fitzgerald E J. Recent advances in aero-optics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(3): 299-339.
- [3] Robert J Plemmons. Numerical method in aero-optical[R]. Air Force Office of Scientific Research ADA385004, 1999.
- [4] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社,2001. 166-171.
- [5] Ayers GA, Dainty J C. Iterative blind deconvolution method and its applications[J]. Optics Letter, 1988, 13(7): 547-549.
- [6] Tony F Chan, Chiur Kwong Wong. Total variation blind deconvolution[J]. IEEE Trans on Image Procession, 1998, 7(3): 370-375.
- [7] Ming Jiang, Ge Wang, Skinner M W, et al. Blind deblurring of spiral CT images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(7): 837-845.
- [8] David S C Biggs. Mark andrews iterative blind deconvolution of extended objects[A]. Proceedings of International Conference on Image Processing[C]. 1997, 2. 454-457.
- [9] 郭永洪,沈忙作. 气动光学效应的数值模拟与预测[J]. 光电工程, 1998, 25(5): 21-24.
- [10] 刘海林. 一种新的无约束最优化共轭梯度法[J]. 广东民族学院学报(自然科学版), 1998, (4): 13-16.