

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0115 - 04

红外目标图像循环迭代复原算法的加速技术研究

洪汉玉^{1,2}, 王进¹, 张天序¹, 易新建¹

(1. 华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 电子科学与技术博士后流动站, 湖北 武汉 430074;

2 武汉工程大学 图像处理与智能控制实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了提高图像处理的实时性, 本文针对作者先前提出的循环迭代图像复原算法迭代次数多、收敛速度慢等问题, 提出了一种基于线性搜索的加速迭代技术. 该加速技术利用泰勒级数展开式根据当前次的迭代结果对下次迭代数据进行预测, 合理地跳过原有的一些迭代点, 从而加快算法收敛. 在达到相同复原效果条件下, 减少了迭代次数, 提高了算法的实时性. 本文对收敛加速技术进行了理论分析和推导, 在微机上进行了一系列的对比实验, 实验结果表明, 本文给出的加速技术效果显著, 获取了加速因子的有效取值等一些有用的实验参数, 算法具有实用价值.

关键词: 红外目标; 气动光学; 图像复原; 迭代算法; 加速技术

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

STUDY ON ACCELERATION TECHNIQUE OF CIRCULATION ITERATIVE RESTORATION ALGORITHM FOR INFRARED TARGET IMAGES

HONG Han-Yu^{1,2}, WANG Jin¹, ZHANG Tian-Xu¹, YI Xin-Jian¹

(1. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Electric Science and Technology Postdoctoral Station, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2 Laboratory for Image Processing and Intelligent Control, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problems that our previous proposed the circulation iterative restoration algorithm needs many iterative times and it converges very slowly, an iterative accelerating technique based on linear search was presented here to decrease the time of image processing. By adopting the Taylor series of expansion items, the acceleration technique estimated in advance the next iterative result based on the current iterative result, and skipped some previous iterative points. In this way, it made the algorithm converge more quickly. On condition that the almost same restoration result as the previous restoration algorithm was obtained, the required iterative times were reduced and the real-time processing was heightened. Theoretical analysis and derivation of the accelerating convergence technique were presented. A series of comparison experiments had been made on PC. Our results show that the proposed acceleration technique has a significant effect. Some useful experimental parameters such as valid accelerating factor are obtained. The proposed restoration algorithm can be used in practical application.

Key words: infrared target; aero-optical; image restoration; iterative algorithm; acceleration technique

引言

为了提高新一代防空系统的成像探测、识别能力, 大气扰动引起的湍流退化图像的复原校正问题, 已经引起各国航天和国防部门的特别重视^[1]. 发达国家 20 世纪 80 年代初就投入大量人力与物力, 耗费巨资系统性开展气动光学效应与校正技术研究. 大气湍流引起的光学失真会导致目标图像模糊, 有

碍于目标的检测与跟踪^[2]. 由于高速流场对目标成像影响的复杂多变性, 导致流场的光学点扩展函数难以测定, 其形式也是无法事先确定的, 且是随机变化的, 这就给目标图像的复原带来了很大的困难, 另外, 退化图像还含有噪声, 这进一步增加了复原的难度^[3]. 针对气动光学效应退化图像的校正复原问题, 作者在文献 [4] 中提出了一种有效的循环迭代复原算法, 但这种算法是基于逐步迭代技术, 需要足

收稿日期: 2005 - 12 - 21, 修回日期: 2006 - 06 - 18

Received date: 2005 - 12 - 21, revised date: 2006 - 06 - 18

基金项目: 国家自然科学基金 (60572040) 和中国博士后科学基金 (2005038538) 资助项目

作者简介: 洪汉玉 (1964-), 男, 湖北阳新人, 教授, 博士后, 主要研究方向为光电成像、图像复原和图像分析等.

够多次迭代才能获得满意的复原效果,耗时长.在目标跟踪过程中,图像处理实时性要求比较高.因此,提高图像复原算法的实时性非常重要.迭代收敛加速意味着算法具有更快的处理速度,在不引入外来干扰的条件下,减少复原时间^[5].

针对红外目标图像循环迭代复原算法,本文研究的加速迭代技术改进了循环迭代复原算法,提高了算法的处理速度,达到了快速处理的目的.

1 循环迭代复原算法的原理

作者在文献[4]中提出了一种循环迭代复原算法,其算法原理及推导过程在文献[4]中已经进行了详细论述.在此,将主要结论简介如下:

定义目标强度为非负函数: $\{f(x), x \in X\}$, 定义点扩展函数为: $\{h_k(y|x), y \in Y\}$, $k=1, 2, \dots, K$, 其中 k 为帧序号. 定义 $i_k(y)$ 为第 k 帧图像在坐标 y 处的强度, 则有

$$\begin{aligned} i_k(y) &= \int_x h_k(y|x) \odot f(x) \\ &= \int_x h_k(y-x) f(x) \end{aligned} \quad (1)$$

设图像元位置 y 处实际观测到的图像数据灰度值为 $g_k(y)$, $g_k(y) = i_k(y) + n(y)$, 其中 $n(y)$ 为像元位置 y 处的噪声项. 可以假定 $g_k(y)$ 是一个以 $i_k(y; \mathbf{f}, \mathbf{h}_k)$ 为均值的服从泊松分布的独立随机变量, 因此, 在像元位置 y 处取整数灰度值 $g_k(y)$ 的概率可以表达为

$$P(g_k(y) | \mathbf{f}, \mathbf{h}_k) = \frac{i_k^{g_k} e^{-i_k}}{g_k!} \quad (2)$$

由文献[4]可知, 假定已得到 $f^{(n)}$ 和 $h_k^{(n)}$, 求 $f^{(n+1)}$ 和 $h_k^{(n+1)}$ 时, 可建立如下非线性迭代关系

$$f^{(n+1)}(x) = f^{(n)}(x) \frac{1}{K} \int_y \int_z g_k(y) \frac{h_k^{(n)}(y-x)}{h_k^{(n)}(y-z) f^{(n)}(z)} \quad (3)$$

$$h_k^{(n+1)}(x) = h_k^{(n)}(x) \int_y \int_z g_k(y) \frac{f^{(n+1)}(y-x)}{h_k^{(n)}(z) f^{(n+1)}(y-z)} \quad (4)$$

其中上标 n 为第 n 次迭代.

为充分利用式(3)及式(4)中的目标与点扩展函数的内在关系, 将算法流程作些调整, 增加内循环迭代次数. 算法要进行两个内循环迭代, 假定已得到 $f^{(n)}$, 求 $f^{(n+1)}$ 时, 进行如下 M_1 次迭代

$$f_{(m+1)}^{(n+1)}(x) = f_{(m)}^{(n)}(x) \frac{1}{K} \int_y \int_z g_k(y) \frac{h_k^{(n)}(y-x)}{h_k^{(n)}(y-z) f_{(m)}^{(n)}(z)},$$

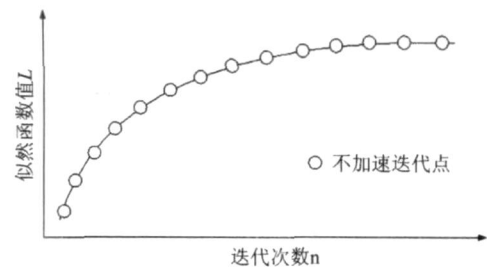


图1 不加速迭代示意图

Fig. 1 Iteration with no acceleration

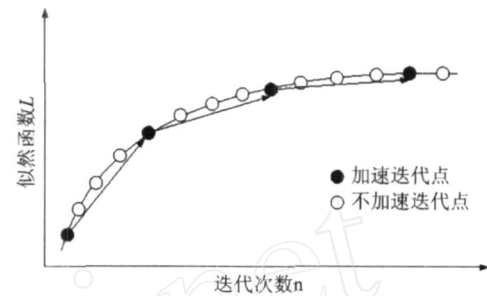


图2 迭代加速示意图

Fig. 2 Iteration with acceleration

$$(m = 0, 1, \dots, M_1 - 1) \quad (5)$$

求解得到 $f^{(n+1)}$ 后, 假定已知 $h_k^{(n)}$ 求 $h_k^{(n+1)}$ 时, 进行如下 M_2 次迭代:

$$h_{k(m+1)}^{(n+1)}(x) = h_{k(m)}^{(n)}(x) \int_y \int_z g_k(y) \frac{f^{(n+1)}(y-x)}{h_{k(m)}^{(n)}(z) f^{(n+1)}(y-z)}, \quad (6)$$

其中下标 m 表示内循环, 在求解 $f^{(n+1)}$ 及 $h_k^{(n+1)}$ 的内循环中, 分别进行 M_1 和 M_2 次迭代. 完成所有内循环迭代后进入外循环, 外循环执行 N 次 ($n=0, 1, \dots, N-1$). 一般情况下, 求解 $f^{(n+1)}$ 的内循环次数 M_1 较少, 求解 $h_k^{(n+1)}$ 的内循环次数 M_2 较多.

2 基于线性搜索的迭代加速方法

基于线性搜索的迭代加速方法利用当前迭代点所具有的信息预测下次迭代的结果, 从而减少迭代次数, 达到迭代加速的目的. 针对本文红外图像复原算法迭代加速方法, 其加速原理可用图1和图2来示意. 图1为原循环迭代算法各迭代点所对应的似然函数值, 随迭代步的增多, 似然函数值变化比较缓慢, 图2为迭代加速后代点与似然函数值的变化.

不加速时, 循环迭代复原算法严格按照迭代步进行, 所需迭代点较多; 应用加速后, 算法能够预测下次迭代点, 从而跳过这些预测迭代点, 在达到相同似然水平条件下减少迭代次数.

利用泰勒级数展开式来对迭代点进行预测. 泰勒级数的完整形式是

$$s_{k+1} = s_k + \frac{1}{2} \Delta^2 s_k + \dots + \frac{1}{n!} \Delta^n s_k + \dots, \quad (7)$$

其中, $\Delta^n s_k$ 是 s_k 的第 n 次差分.

利用泰勒级数的前两项对 s_{k+1} 进行近似

$$s_{k+1} \approx s_k + \frac{1}{2} \Delta^2 s_k. \quad (8)$$

本文循环迭代图像复原算法求解 $h_k^{(n+1)}$ 的内循环迭代次数较多,减少内循环迭代次数 M_2 是加速迭代的重点,应用式 (8)对点扩展函数迭代点进行预测,在式 (6)中,令

$$\begin{aligned} (h_m) &= h_{k(m+1)}^{(n+1)}(x) \\ &= h_{k(m)}^{(n)}(x) + \frac{1}{2} \Delta^2 h_{k(m)}^{(n)}(x) \end{aligned}, \quad (9)$$

h_m 是内循环中 m 次迭代后 PSF 的估计值,即为 h_m^n .

线性搜索技术提供一个加性的校正因子,对点扩展函数估计值进行预测

$$h_{m+1} = h_m + d_m, \quad (10)$$

其中, $d_m = h_{m+1} - h_m$ 在这里, d_m 是由迭代算法产生的差分向量,用来作为梯度方向的估计, d_m 即为式 (8)中的 Δs_k . 称为加速因子. 本文将 μ 设定为常量. 在式 (7)中,取泰勒级数的二阶展开项能够使迭代点更加精确. 为简便起见,本文加速方法主要采用泰勒级数的一阶项.

3 实验结果分析

为了能客观地评价算法的图像恢复质量,本文统一采用归一化均方误差 $NMSE^{[3]}$ 对图像质量进行度量.

同时,为了对加速的效果进行评价,引入加速比 μ , 定义加速比 $\mu = T_N / T_A$, 其中 T_N 为算法未加速时所耗时间, T_A 为加速后耗时. 加速比 μ 越大表明算法加速效果越好,耗时小.

图 3(a)为小目标红外原始图像(红外斑点目标,远距离飞机),大小为 128×128 图 3(b)为退化图像,图 3(c)为采用原循环复原算法复原出的图像,图 3(d),图 3(e)和图 3(f)为采用本文基于线性搜索的加速技术,加速因子 μ 分别取 2, 6 和 8 时,所恢复出的图像. 由实验结果可以看出,原算法处理耗时 10.3s,对该算法应用加速技术后,在复原效果基本相同的条件下, $\mu = 2$ 时,耗时 5.8s,加速比 $\mu = 1.8$; $\mu = 6$ 时,耗时 2.8s,加速比 $\mu = 3.7$; $\mu = 8$ 时,耗

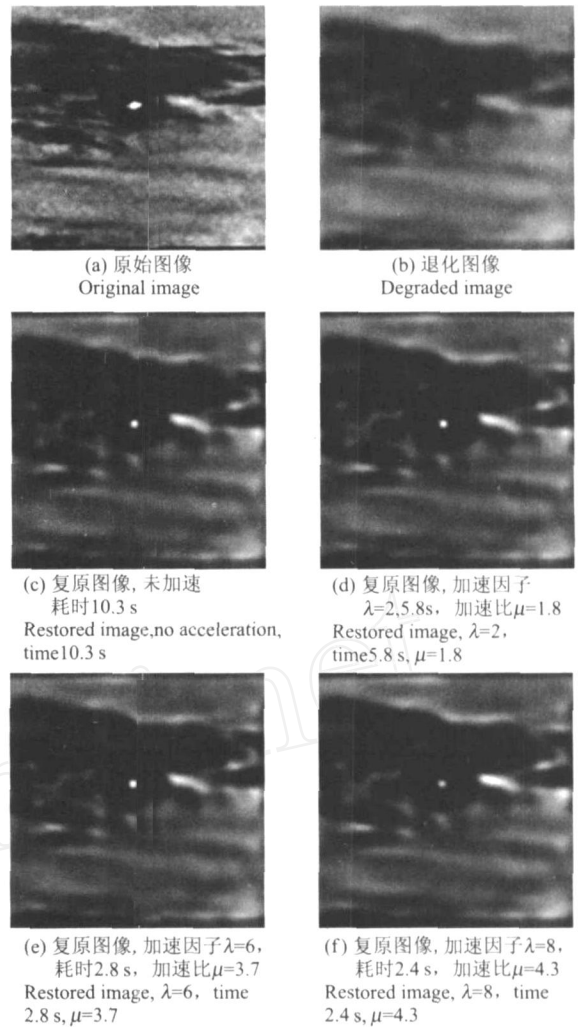


图 3 加速前后复原实验结果对比
Fig. 3 Comparison of restoration result with acceleration and no acceleration

时 2.4s,加速比 $\mu = 4.3$.

图 4给出 μ 在 1~12 之间变化时,在相同复原效果的条件下,算法耗时曲线图. 由图可见,随着 μ 增大,复原算法耗时逐渐减少,当 $\mu = 8$ 时耗时趋近于 2s, 当 μ 过大时,加速太快,引起算法不稳定,复原效果差.

图 5给出了 $NMSE$ 在 1~15 之间变化时,在相同迭代次数的条件下,复原图像与原图像之间的归一化均方误差 $NMSE$ 由图 5 可见:当 $\mu \leq 10$ 时, $NMSE$ 较小,且数值基本上保持不变;当 $\mu > 11$ 时, $NMSE$ 迅速增大,这说明加速因子 μ 过大时,算法将不稳定. 考虑到加速因子 μ 越大算法耗时越少,但 μ 过大时,算法将不稳定.

根据图 4和图 5的试验结果,可以看出,加速因子 μ 在 4到 8之间取值较为合适.

图 6和图 7给出了空中小目标序列图像复原前

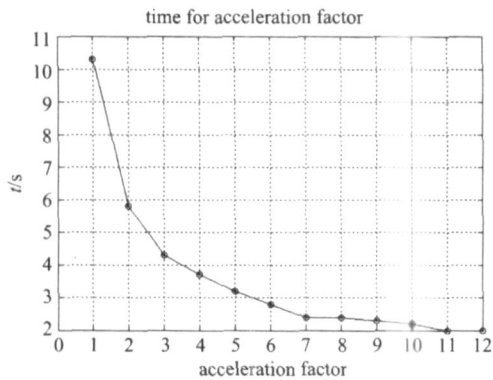


图4 加速因子与耗时关系

Fig.4 Acceleration factor and spending time

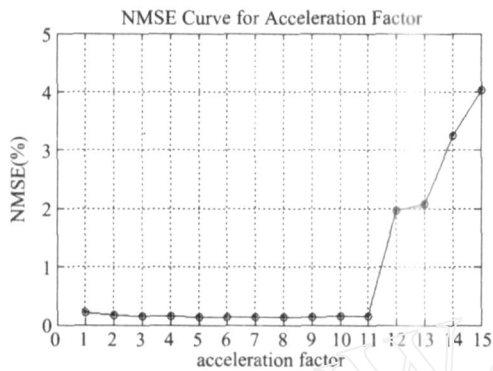


图5 原始图像和复原图像之间的 NMSE

Fig.5 NMSE between original image and restored image

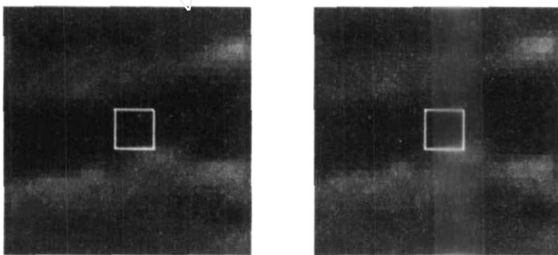


图6 序列模糊图像的跟踪结果,跟踪失败

Fig.6 Track result for serial blurred infrared images, track failed

后跟踪结果对比,图6为序列模糊图像的跟踪结果,跟踪失败,图7为采用本文算法恢复后的小目标序列图像的跟踪结果,能准确捕获目标,这说明算法具有实用价值.

4 结语

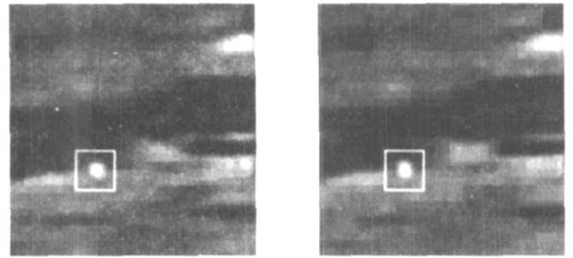


图7 采用本文算法恢复后的小目标序列图像的跟踪结果,准确捕获目标

Fig.7 Small object track result for serial infrared images restored by our algorithm, object is captured

本文将加速收敛技术应用于迭代过程中,有效地减少了迭代次数,提高了算法的处理速度,使循环迭代复原算法更加有利于实际应用.在微机上进行了一系列的对比实验,实验表明本文的加速迭代技术效果显著,从实验中得出了加速因子的合理取值以及加速比结果等一些有用的实验参数,具有实用价值,本文算法已成功移植到了气动光学图像校正多 DSP并行校正实时处理系统中.

REFERENCES

- [1] YN Xing-Lian *Principle of Aero-Optical*[M]. Beijing: China Aerospace Press(殷兴良. 气动光学原理. 北京:中国宇航出版社), 2003.
- [2] HONG Han-Yu, ZHANG Tian-Xu, YU Guo-Lian Regularized restoration algorithm of astronautical turbulence-degrade images using maximum-likelihood estimation[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (洪汉玉,张天序,余国亮. 航天湍流退化图像的极大似然估计复原算法. 红外与毫米波学报), 2005, 24(2): 130—134.
- [3] HONG Han-Yu, ZHANG Tian-Xu Investigation of restoration algorithm for degraded images caused by aero-optics effects using multi-resolution blind deconvolution[J]. *Chinese Journal of Computers* (洪汉玉,张天序. 基于多分辨率盲目去卷积的气动光学效应退化图像复原算法. 计算机学报), 2004, 27(7): 952—963.
- [4] HONG Han-Yu, ZHANG Tian-Xu, YI Xin-Jian, et al Study on circulation iterative restoration algorithm of degraded images with aero-optical effects [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)* (洪汉玉,张天序,易新建,等. 气动光学效应退化图像循环迭代复原算法研究. 华中科技大学学报(自然科学版)), 2005, 33(9): 15—18.
- [5] Biggs S C, Andrews M. Acceleration of iterative image restoration algorithms [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(8): 1766—1775.